

Marek Karkula

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

PRAKTYCZNE ASPEKTY PROBLEMU UKŁADANIA TRAS Z PODZIAŁEM DOSTAW (SDVRP)

Rękopis dostarczono: kwiecień 2018

Streszczenie: Planowanie procesów transportowych i układanie tras przejazdów należy do najważniejszych zadań menedżerów w przedsiębiorstwach dystrybucyjnych, handlowych, a także produkcyjnych. Problem układania tras dotyczy racjonalizacji procesów dystrybucji wyrobów oferowanych przez przedsiębiorstwo sieci klientów. W badaniach operacyjnych problem taki zaliczany jest do klasy zagadnień marszrutyzacji lub układania tras pojazdów (Vehicle Routing Problem – VRP). Problemy planowania dostaw VRP stanowią szeroką rodzinę zagadnień wynikających przede wszystkim z uwarunkowań i ograniczeń pochodzących z praktyki. W pracy przedstawiono praktyczne zastosowanie jednego z wariantów VRP – zagadnienia układania tras uwzględniającego podział dostaw (Split Delivery Vehicle Routing Problem – SDVRP), a wyniki analiz oparto na badaniach przeprowadzonych w przedsiębiorstwie dystrybucyjnym.

Słowa kluczowe: sieć dostaw, SDVRP, optymalizacja dostaw, podział dostaw

1. WPROWADZENIE

Jedną z najważniejszych funkcji systemu logistycznego jest dystrybucja produktów z miejsc ich wytwarzania lub składowania do odbiorców. Wydajność dystrybucji i poziom jej usług wpływają bezpośrednio na koszty logistyczne firm i poziom zadowolenia klienta. Obecnie w przedsiębiorstwach branży FMCG (*Fast Moving Consumer Goods* – dobra szybko zbywalne) prawidłowo zorganizowane procesy dystrybucyjne to już nie tylko konieczność, ale również element przewagi konkurencyjnej. Dynamika zmian obserwowana w funkcjonowaniu sieci handlowych w Polsce ma wpływ na sposób dystrybucji oferowanych produktów i ma silny związek z dużą liczbą jednostek detalicznych (sklepów) określonych sieci. Dystrybucja bezpośrednia, w której towar dostarczany jest przez producentów do placówek detalicznych w dużym stopniu została zastąpiona rozwiązaniami scentralizowanymi w formie nowoczesnych centrów logistycznych i dystrybucyjnych. Najważniejszymi efektami takiej centralizacji zakupów i dostaw z punktu widzenia przedsiębiorstwa są skrócenie czasu obsługi odbiorców, podniesienie standardu oferowanych usług oraz obniżenie kosztów dystrybucji [18].

Podstawowymi procesami, realizowanymi przez centra dystrybucyjne są procesy konsolidacji, sortowania i dostarczania ładunków do odbiorców. Efektywność tych procesów ma zasadniczy wpływ na redukcję kosztów transportu, których udział w łącznych kosztach logistycznych jest wysoki. Obecnie możliwości racjonalizacji kosztów transportu jest wiele – muszą one być jednak wynikiem wnikliwej analizy przedsiębiorstwa i jego otoczenia. Niezwykle ważną rolę w tym procesie odgrywa planowanie, którego istotą jest rozpoznanie przyszłości oraz określenie zadań niezbędnych do osiągnięcia celów oraz zasobów koniecznych do realizacji tych zadań [16]. Racjonalne planowanie tras dla pojazdów wykonujących obsługę dostaw ładunków z centrum dystrybucyjnego do odbiorców może przyczynić się do tego, że koszty realizacji transportu będą mniejsze. Decyzje operacyjne podejmowane w tym obszarze są istotnym czynnikiem mającym wpływ na szybkość realizacji usług, koszty i wydajność transportu w sieci dystrybucyjnej. Problem planowania tras dotyczy racjonalizacji procesów dystrybucji wyrobów oferowanych przez przedsiębiorstwo sieciom klientów. W badaniach operacyjnych problem taki zaliczany jest do klasy zagadnień marszrutyzacji lub układania tras pojazdów (*Vehicle Routing Problem*, VRP), w literaturze spotykany także jako problem dostaw lub jako problem marszrutyzacji [2, 10, 16, 17, 21].

W niniejszej pracy podjęto tematykę wpływu stosowanych modeli decyzyjnych na proces wyznaczania tras pojazdów w przedsiębiorstwie realizującym dystrybucję dóbr w sieci detalicznej branży FMCG. Skupiono się na zastosowaniu modelu bazującego na problemie układania tras uwzględniającym podział dostaw. Zagadnienie to jest określane w literaturze anglosaskiej jako problem SDVRP (*Split Delivery Vehicle Routing Problem*) i stanowi relaksację klasycznego problemu marszrutyzacji pojazdów VRP. Podobnie jak w klasycznej wersji problemu, celem jest znalezienie takiego zestawu tras, dla którego całkowite koszty transportu obsługi zbioru klientów przez flotę pojazdów będą minimalne. Istotną różnicą w stosunku do bazowego zagadnienia marszrutyzacji pojazdów VRP jest możliwość klient może być odwiedzany więcej niż jeden raz wielokrotnego odwiedzenia klienta przez więcej niż jeden pojazd [13, 14, 15].

Struktura pozostałej części pracy jest następująca. W rozdziale drugim przeprowadzono studium literaturowe, które przedstawia aktualny stan zagadnienia dotyczący przede wszystkim problemu układania tras z podziałem dostaw SDVRP. Zwięźle omówiono dotychczasowe osiągnięcia w tym obszarze uwzględniając różne modyfikacje zagadnienia SDVRP oraz sposoby jego rozwiązywania z wykorzystaniem algorytmów dokładnych, heurystyk i metaheurystyk. W rozdziale trzecim zaprezentowano model matematyczny zagadnienia SDVRP, określając założenia do jego zastosowania w problemach praktycznych. W kolejnym rozdziale pracy przedstawiono studium przypadku – analiza zastosowania modeli SDVRP dla problemu planowania wysyłek w przedsiębiorstwie dystrybucyjnym branży FMCG. Pracę kończy rozdział podsumowujący oraz określający możliwości prowadzenia przyszłych badań.

2. STAN ZAGADNIENIA

Zagadnienie marszrutyzacji środków transportu VRP dotyczy racjonalizacji procesów dystrybucji i zaliczane jest do najtrudniejszych zadań optymalizacji dyskretnej. Problem zdefiniowany przez Dantziga i Ramsera [12] w 1959 r. i polega na zaprojektowaniu optymalnego zestawu tras floty pojazdów celem realizacji zamówień dla danego zbioru odbiorców. W klasycznym ujęciu określanym w literaturze także jako CVRP (*Capacitised VRP*) klienci są odwiedzani dokładnie raz, a każdy pojazd dostarcza całe zapotrzebowanie do określonego klienta.

W przypadku zagadnienia wyznaczania tras z podziałem dostaw SDVRP mamy do czynienia ze złagodzeniem ograniczenia dla problemu CVRP w tym sensie, że określony odbiorca może być odwiedzany więcej niż jeden raz. W tym przypadku popyt zgłoszony przez klienta zostaje podzielony między dwiema lub więcej dostawami. Zagadnienie SDVRP zostało sformułowane przez Drora i Trudeau [13, 14] w 1987 r. Zainteresowanie problemem SDVRP, można wytłumaczyć faktem, że możliwe są znaczne oszczędności w kosztach i liczbie tras w porównaniu z problemami, w których wykluczono możliwość dzielenia popytu. W pracy [3] Archetti, Savelsbergh i Speranza przeprowadzili analizę maksymalnych możliwych oszczędności uzyskanych dzięki podziałowi dostaw w stosunku do wyników dla problemu bez podziału. Ci sami autorzy w pracy [4] przedstawili wyniki badań komputerowych, w których pokazali, w jaki sposób oszczędności zależą od cech instancji problemu. Wnioski z ich analiz pokazują, że korzyści z dzielenia dostaw zależą głównie od relacji między średnim popytem a pojemnością pojazdu i wariancją popytu. Największe korzyści uzyskuje się, gdy średni popyt jest większy niż połowa pojemności pojazdu, ale mniejszy niż trzy czwarte pojemności pojazdu oraz wariancja popytu jest stosunkowo niewielka.

Zagadnienie SDVRP jest sklasyfikowane jako problem NP-trudny [14]. Złożoność obliczeniowa mimo łagodniejszych niż w klasycznym problemie CVRP jest nadal wysoka, a jak wiadomo z literatury, brak jest efektywnych algorytmów do rozwiązywania tego typu problemów. Według autorów pracy [5] zagadnienie SDVRP jest wciąż bardzo trudnym problemem i wyzwaniem dla badaczy, dla którego obecnie można otrzymać rozwiązanie optymalne tylko w przypadku liczby klientów mniejszej niż 30. Piśmiennictwo zagraniczne dotyczące metod rozwiązywania zagadnienia SDVRP jest bardzo bogate i obejmuje kilka różnych podejść opartych na metodach dokładnych i (meta)heurystycznych.

Pierwsza heurystyka to dwuetapowy algorytm lokalnego wyszukiwania opracowany przez Drora i Trudeau [13]. Badacze ci, po uzyskaniu wiedzy o optymalnych właściwościach rozwiązania, przedstawili dwie procedury heurystyczne, w oparciu o znane i skuteczne procedury klasycznego zagadnienia CVRP. W pierwszej procedurze próbowano podzielić zlecenie (popyt), które ma zostać dostarczone do odbiorcy między pewną liczbą pojazdów, natomiast w drugiej sprawdzano, czy wyeliminowanie podziału dostaw przez dodanie trasy może przynieść korzyść końcowej strukturze tras. Wnioski z badań wskazują, że dopuszczenie podziału dostaw może przynieść znaczące oszczędności. Autorzy kolejnych prac stosują różne rozwiązania hybrydowe [4, 9, 10, 24] lub wykorzystują metaheurystyki [8, 22, 23]. Chen i inni [9] opracowali hybrydową heurystykę, która łączy mieszane programowanie całkowitoliczbowe z algorytmem

record-to-record travel, będącym odmianą heurystyki symulowanego wyżarzania (rozwiązanie jest akceptowane jeżeli nie jest ono dużo gorsze od poprzedniego rozwiązania – rekordu). Autorzy pracy zrealizowali badania dla sześciu problemów testowych, które mają 50–199 klientów i jak wskazują jakość rozwiązania jest na ogół znacznie lepsza niż w przypadku innych, używanych algorytmów, np. metaheurystyki wyszukiwania z zakazami (*tabu search*). Liczna grupa metod rozwiązywania problemów wyznaczania tras pojazdów obejmuje tzw. heurystyki konstrukcyjne. Najbardziej znanym rozwiązaniem w tej grupie jest zaproponowany przez Clarka i Wrighta [11] algorytm oszczędności (*savings*). Algorytm ten doczekał się wielu rozszerzeń i modyfikacji i jest również wykorzystywany do generowania rozwiązań początkowych dla zagadnienia SDVRP. Między innymi Wilck i Cavalier, w pracy [24] proponują nową heurystykę konstrukcyjną umożliwiającą generowanie dobrych rozwiązań początkowych o najkrótszym całkowitym dystansie podróży spośród testowanych algorytmów. Również Wilck i Cavalier opracowali hybrydowy algorytm genetyczny, który porównali z metodami dokładnymi (generowanie kolumn i metoda dwufazowa) [23]. Archetti i Speranza w pracy [5] zaprezentowały wyczerpującą dyskusję dotyczącą wykorzystania heurystyk do rozwiązywania zagadnień SDVRP.

Pierwszym dokładnym algorytmem stosowanym do rozwiązania problemu SDVRP był zmodyfikowany algorytm podziału i ograniczeń (*branch and bound*) zaprezentowany przez Drora i innych w pracy [15]. Problem został sformułowany jako zadanie programowania liniowego całkowitoliczbowego i autorzy sformułowali dodatkowe ograniczenia dla zagadnienia SDVRP. W kilku pracach autorzy stosują technikę generowania kolumn (*column generation*) [5, 10, 19, 21].

Rozszerzenie dla problemu SDVRP dotyczące generowania rozwiązań wykraczających ponad jeden horyzont planowania opracowali Bertoli i inni w pracy [7]. Autorzy zaproponowali nowy problem, MDSVRP (*Multi-Day Split Deliveries VRP*), w którym połączyli planowanie poziomów zapasów, tras pojazdów i dostaw, z możliwością podziału popytu określonych klientów. Szczegółowy opis rozszerzeń i szczególnych wariantów dla problemu SDVRP można znaleźć w pracy [5]. Autorki prezentują przegląd kilku zbadanych w literaturze wariantów problemu planowania tras z podziałem dostaw. Mimo, że warianty uwzględniające okna czasowe dostaw (*time windows*), problem rozwózek i zwózek (*pickup and delivery problem*), czy flotę o różnej pojemności (*heterogenous fleet*) są dobrze zbadane dla tradycyjnych zagadnień CVRP, jednak w przypadku, gdy dozwolony jest podział dostaw dostępnych jest niewiele prac.

Ciekawe podejście do rozwiązania problemu planowania tras z podziałem dostaw zaprezentowali Chen i inni w pracy [10]. Autorzy opracowania proponują zastosowanie strategii *a priori* podziału dostaw, która polega na dzieleniu popytu każdego odbiorcy na kilka mniejszych porcji. Przedstawiono dwie reguły podziału zleceń ściśle powiązanych z pojemnością wykorzystywanych środków transportu. Badacze przekonują, że ich motywacją było dostarczenie metody dla zagadnienia SDVRP, która jest łatwa do zrozumienia, prosta w implementacji i szybko dostarcza wysokiej jakości rozwiązania. Po operacji podziału zleceń (popytów) problem może być rozwiązany jako klasyczne zagadnienie CVRP, umożliwiając w ten sposób praktykom wydajne i skuteczne generowanie rozwiązań dla problemu SDVRP. W badaniach testowych wykorzystano bibliotekę VRPH (dostępnej na stronie: <https://projects.coin-or.org/VRPH>). Wyniki eksperymentów obliczeniowych pokazały, że proponowane podejście poprawia

rozwiązania bez podziału dostaw, a w przypadku 82 instancji testowych jest znacznie szybszy niż najnowocześniejsze algorytmy i potrafi generować rozwiązania o porównywalnej jakości.

W literaturze dostępne są także opracowania inspirowane praktycznymi problemami. Ambrosino i Sciomachen w [1] analizowali problem dystrybucji żywności, który można rozważać jako uogólnienie asymetrycznego problemu SDVRP. Zbadano zastosowanie modelu związane z włoską firmą, która posiada sieć dystrybucji artykułów spożywczych wzdłuż krajowej sieci autostrad. Sierksma i Tijssen w [20] opisali praktyczny przypadek określenia rozkładu lotów śmigłowców do platform zlokalizowanych na Morzu Północnego, w celu przewozu pracowników na te platformy. W pracy [6] Belfiore i Yoshizaki przedstawili studium przypadku dla dużego rynku detalicznego w Brazylii i uwzględniali dodatkowe warianty problemu SDVRP, m.in. okna czasowe dla dostaw i założenie o heterogeniczności floty (dostępne pojazdy o różnych pojemnościach oraz kosztach stałych i zmiennych). Wszystkie praktyczne problemy prezentowane w cytowanych pracach rozwiązano za pomocą metod heurystycznych.

Wyniki prac [13–15] pokazują, redukcja całkowitej długości dla zaplanowanych tras w stosunku do klasycznego zagadnienia CVRP jest najbardziej widoczna dla problemów, w których klienci mają wysoki popyt, tj. ponad 15% pojemności pojazdu. Analiza literaturowa problemu wskazuje na jego istotne znaczenie zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia.

3. MODEL MATEMATYCZNY ZAGADNIENIA UKŁADANIA TRAS Z PODZIAŁEM DOSTAW

W problemie marszrutyzacji z podziałem dostaw (SDVRP) dana jest sieć reprezentowana przez nieskierowany graf $G = (V, A)$ ze zbiorem wierzchołków $V = \{0, 1, \dots, n\}$, gdzie 0 oznacza centrum dystrybucyjne (magazyn), a pozostałe punkty reprezentują odbiorców (klientów), natomiast $A = \{(i, j): i, j \in V, i \neq j\}$ jest zbiorem łuków (tras). Niech $V' = V \setminus \{0\}$ oznacza zbiór wierzchołków grafu G reprezentujących klientów ($V' = \{1, \dots, n\}$). Do każdego łuku (i, j) przypisany jest koszt c_{ij} , który w tym przypadku stanowi długość trasy $(i, j) \in A$ oraz jest nieujemny i spełnia nierówność trójkąta (dla dowolnych trzech węzłów i, j, k spełniony jest warunek $c_{ij} \leq c_{ik} + c_{kj}$). Do każdego klienta przypisano popyt $d_i > 0$. Zakłada się, że dostępnych jest m identycznych pojazdów, a każdy z nich charakteryzuje się tą samą ładownością $Q \in \mathbb{Z}^+$. Dostępna flota pojazdów jest odpowiednio duża (nieograniczona).

Zmienna x_{ij}^v jest binarną zmienną decyzyjną, która przyjmuje wartość 1, jeżeli pojazd v przejeżdża przez łuk (i, j) , a wartość 0 w przeciwnym przypadku. Kolejna zmienna y_{iv} oznacza wielkość zapotrzebowania dostarczoną do i -tego klienta przez v -ty pojazd. Niech S oznacza zbiór wszystkich cykli na zbiorze V , które obejmują skład. Biorąc pod uwagę, że $S \subseteq V$, $|S|$ oznacza liczbę wierzchołków w zbiorze S . Minimalną liczbę pojazdów koniecznych do realizacji wysyłek do odbiorców można wyznaczyć z zależności (1):

$$m = \left\lceil \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{Q} \right\rceil \quad (1)$$

W pracy [5] zostało pokazane, że zawsze istnieje rozwiązanie optymalne, które wykorzystuje liczbę pojazdów nie większą niż

$$m = 2 \left\lceil \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{Q} \right\rceil$$

Kolejnym założeniem jest, że każda trasa pojazdu rozpoczyna się i kończy w punkcie wysyłek (magazynie). Zakłada się także, że popyt klientów musi być w pełni zaspokojony, a ilość towaru dostarczona podczas jednej podróży nie może przekraczać ładowności pojazdów Q . Celem jest zminimalizowanie całkowitej odległości przebytej przez pojazdy. Poniżej podano mieszaną formułę programowania liczb całkowitych dla SDVRP.

Model MIP dla zagadnienia planowania tras z podziałem dostaw SDVRP może być sformułowany następująco [5, 13].

Należy zminimalizować:

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{v=1}^m c_{ij} x_{ij}^v \quad (2)$$

przy spełnieniu następujących warunków ograniczających:

$$\sum_{i=0}^n \sum_{v=1}^m x_{ij}^v \geq 1 \quad \forall j = 0, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ip}^v - \sum_{j=0}^n x_{pj}^v = 0 \quad \forall p = 0, \dots, n; v = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{pj}^v \leq |S| - 1 \quad \forall v = 1, \dots, m; S \subseteq V - \{0\} \quad (5)$$

$$y_{iv} \leq d_i \sum_{j=0}^n x_{ij}^v \quad \forall i = 0, \dots, n; v = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{v=1}^m y_{iv} = d_i \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{iv} \leq Q \quad \forall v = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$x_{ij}^v \in \{0, 1\} \quad \forall i = 0, \dots, n; j = 0, \dots, n; v = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$y_{iv} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; v = 1, \dots, m \quad (10)$$

Funkcja celu wyrażona wzorem (2) minimalizuje globalne koszty transportu. Warunek (3) gwarantuje, że każdy pojazd opuści magazyn i wszyscy odbiorcy zostaną odwiedzeni co najmniej jeden raz. Ograniczenie (4) dotyczy zachowania ciągłości przepływu i zapewnia powrót do punktu centralnego po odwiedzeniu zadanych klientów, natomiast ograniczenie (5) odnosi się do eliminacji podcykli i pochodzi od odpowiednich ograniczeń dla problemów komiwojażera TSP i klasycznego CVRP. Warunek (6) dotyczy obsługi i -ego klienta przez v -ty pojazd tylko wtedy, gdy jego trasa przecina i -tą lokalizację, z kolei warunek (7) zapewnia, że cały popyt każdego klienta jest spełniony, Warunek (8) gwarantuje, że łączna ilość towaru dostarczana przez każdy pojazd nie przekracza jego ładowności Q . Ograniczenia (9) oraz (10) dotyczą odpowiednio przyjmowania przez zmienną x_{ij}^v wartości binarnych, a także zagwarantowania, że wielkość dostarczonego zamówienia y_{iv} jest wartością nieujemną. Rozwinięcia zaprezentowanego modelu o dodatkowe ograniczenia można zaobserwować w literaturze [1, 3, 6, 7, 9, 15, 19, 22].

3. STUDIUM PRZYPADKU – PLANOWANIE DYSTRYBUCJI W SIECI DOSTAW BRANŻY FMCG

W niniejszym rozdziale zastaną zaprezentowane wybrane wyniki badań, w ramach których dokonano analizy i symulacji problemu dotyczącego racjonalizacji dostaw wyrobów oferowanych przez przedsiębiorstwo dystrybucyjno-handlowe z branży towarów szybko zbywalnych (FMCG) dostarczającego towar do sieci detalicznej klientów. Struktura dostaw obejmuje kilka makroregionów Polski, w których zlokalizowane są centra dystrybucyjne. Każde z centrów realizuje zlecenia na terenie makroregionów, adużym wyzwaniem okazuje się codzienne zaplanowanie tras pojazdów i znalezienie optymalnego rozwiązania. Do obowiązków planistów należy przede wszystkim dbałość o minimalizację kosztów przejazdu ze względu na podejmowanie zleceń rozliczanych nie tylko na podstawie stawki kilometrowej.

Zrealizowane badania obejmowały przede wszystkim symulację planowania tras dla przewoźników (firm transportowych) współpracujących z badanym przedsiębiorstwem realizujących wysyłki całopojazdowe z jednego z dostępnych centrów dystrybucyjnych. W sytuacji zastanej (AS-IS) proces planowania tras przejazdów odbywał się w badanym przedsiębiorstwie w sposób intuicyjny, w oparciu o wiedzę ekspercką i doświadczenie własne planistów. Każdy z nich dla własnych potrzeb opracowywał metody efektywnego obsługiwanie klientów docelowych w jak najkrótszym czasie.

Zdiagnozowano problemy związane przede wszystkim z długim czasem opracowania planu wysyłek (rozmiar problemu to 100–200 odbiorców dziennie o różnorodnej wielkości popytu), koniecznością angażowania grupy doświadczonych planistów, niesatysfakcjonującym poziomem wykorzystania przestrzeni ładunkowej środków pojazdu (średnio ok. 80%) oraz na całkowitej długości tras pokonanych przez pojazdy w celu

obsłużenia popytu klientów. Przed wdrożeniem algorytmów układania tras spodziewano się także redukcji liczby tras (czyli potrzebnych pojazdów i kierowców) oraz całkowitej długości tras pokonanych przez pojazdy w celu obsłużenia popytu klientów.

Do rozwiązania zadania przyjęte zostały następujące założenia:

- planowany jest powrót pojazdu do centrum dystrybucji (problem zamknięty);
- należy przyjąć ograniczenia dla pojazdu dotyczące jego pojemności wyrażanej w liczbie jednostek ładunkowych i dopuszczalnej ładowności wyrażanej w [kg];
- przyjęto także ograniczenia określające maksymalną liczbę punktów należących do trasy (maksymalną liczbę punktów rozładunku) oraz maksymalną długość pojedynczej trasy;
- istotnymi parametrami były także minimalny poziom wypełnienia pojazdu wyrażany w % oraz minimalny paletowy poziom załadunku – maksymalizacja wykorzystania przestrzeni ładunkowej pojazdów jest zwykle podstawowym kryterium stawianym planistom.

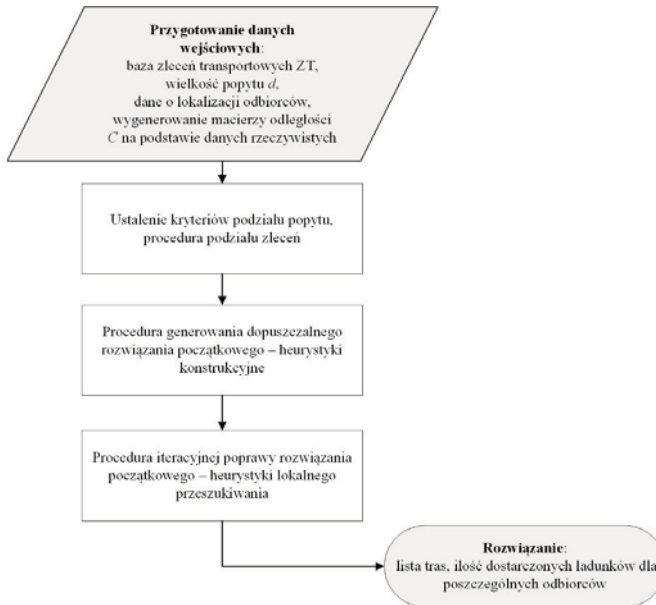
Zestawienie przyjętych wartości parametrów planowania przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1.

Zestawienie parametrów algorytmu planowania dostaw

Nazwa parametru	Wartość
Rodzaj środka transport [-]	Zestaw ciągnik+ naczepa
Ładowność środka transport [kg]	24 000
Pojemność paletowa pojazdu [szt.]	33
Minimalny paletowy poziom załadunku [szt.]	23
Minimalny poziom wypełnienia pojazdu [%]	70
Średnia prędkość jazdy pojazdu [km/h]	45
Maksymalna liczba punktów dostaw na zleceniu transportowym [szt.]	4
Maksymalna długość pojedynczej trasy [km]	600
Średni czas rozładunku [min.]	30

Punktem wyjściowym planowania tras było przygotowanie danych na podstawie dokumentów transportowych, danych potrzebnych do planowania, określenie parametrów podziału dostaw oraz wybór parametrów algorytmu planującego trasy. Procedura realizacji generowania rozwiązań przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Procedura generowania rozwiązania – planu realizacji dostaw do klientów obsługiwanych przez centrum dystrybucyjne

Wstępne badania przeprowadzono z zastosowaniem klasycznego modelu planowania tras CVRP, jednak w porównaniu z pracami planistów wyniki nie były zadowalające. Z tego powodu podjęto próbę zastosowania problemu SDVRP do generowania planów dostaw. Ze względu na złożoność obliczeniową zagadnienia SDVRP i czas potrzebny do otrzymania rozwiązania optymalnego, dla rzeczywistych problemów, w zasadzie jedyną rozsądną strategią rozwiązania jest opracowanie algorytmów heurystycznych. W rozpatrywanym przypadku zastosowano podejście opisane przez Chena i innych [10]. W podejściu tym dokonano podziału zleceń *a priori* (w przeciwieństwie do klasycznego podejścia SDVRP, w którym podział następuje w trakcie konstrukcji tras), a następnie nowy zbiór stanowił wejście dla algorytmów konstrukcji tras i ich poprawy. Jako algorytmy konstrukcyjne testom poddana została zmodyfikowana na potrzeby rozwiązania heurystyka oszczędności (*savings*) [11] oraz algorytm włączania (*insertion heuristics*) [17, 21], w którym start rozpoczyna się od jednego (np. losowo wybranego) wierzchołka, a następnie iteracyjnie dodawane są kolejne wierzchołki i tworzone kolejne trasy zgodnie ze zdefiniowanymi ograniczeniami. Podział ładunków był realizowany dla tych dostaw, których wielkość była między 50 a 75 % maksymalnego załadunku ($Q=33$ palety) i dostawa taka była dzielona na dwie części (*2-split*). Zaletą wymienionych heurystyk jest stosunkowo prosta implementacja oraz szybkość działania. Prezentowane algorytmy zaimplementowano w środowisku MATLAB (www.mathworks.com), a następnie przeprowadzono eksperymenty symulacyjne. Wyniki dla wybranych eksperymentów oraz ich zestawienie z rezultatami planowania ręcznego zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2.

Porównanie wyników planowania realizowanego przez planistów i uzyskanych w wyniku symulacji na modelu SDVRP

Zbiór danych	Min. liczba pojazdów [szt.]	Planiści		Model SDVRP	
		Długość tras [km]	Liczba pojazdów [szt.]	Długość tras [km]	Liczba pojazdów [szt.]
1	40	17 961	43	17 306	42
2	27	12 948	28	12 442	27
3	34	15 139	36	15 007	36
4	38	15 927	40	15 391	39
5	72	32 191	80	30 695	76
7	60	26 328	64	25 777	62
8	47	21 923	52	21 474	51
9	52	22 611	57	21 852	55

Dokonując analizy wyników można stwierdzić, że zastosowanie modelu odwzorowującego zagadnienie SDVRP przyniosło wymierne korzyści w postaci planów dostaw o lepszej jakości. Udało się osiągnąć krótsze całkowite długości tras (średnio o ok. 630 km) oraz zredukować liczbę tras, czyli liczbę pojazdów koniecznych do realizacji wysyłek do odbiorców. Dodatkowo poprawiony został wskaźnik wypełnienia przestrzeni środków transportu z średniej ok. 85 % przy planowaniu ręcznym do średniej ok. 94 % przy zastosowaniu zagadnienia SDVRP w procesie generowania planu wysyłek.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podsumowując należy stwierdzić, że wyniki symulacji wskazują na duży potencjał i możliwości w usprawnieniu aktualnych procesów dotyczących planowania dostaw realizowanych przez zespoły zarządzające transportem w badanym przedsiębiorstwie dystrybucyjnym. Z punktu widzenia przedsiębiorstwa do najważniejszych korzyści wynikających z zastosowania rozwiązań wynikających z zastosowanego podejścia oraz przeprowadzonych symulacji mogą być:

- 1) Usprawnienie procesów układania tras dla floty samochodów przy dostawach towarów do klientów.
- 2) Minimalizacja/racjonalizacja kosztów dostaw.
- 3) Maksymalizacja wykorzystania dostępnej przestrzeni załadunkowej wykorzystywanej floty.
- 4) Automatyzacja wybranych działań w ramach procesów planowania transportu, obniżenie kosztów obsługi planowania transportu – redukcja personelu działu planowania.
- 5) Optymalizacja długości tras – pośrednio redukcja kosztów.

- 6) Aktywny wpływ na obniżenie tzw. „kosztów społecznych” transportu – przez ograniczenie liczby taboru wykorzystanego do realizacji dostaw, co może prowadzić do redukcji emisji spalin i wypadków.

Zaprezentowane w pracy wyniki pokazały, że heurystyki opracowane dla zagadnienia planowania tras z podziałem dostaw (Split Delivery VRP) mogą być brane pod uwagę jako skuteczne narzędzia wspomagające podejmowanie decyzji planistycznych w badanym przedsiębiorstwie dystrybucyjnym. Wykazane oszczędności powinny przełożyć się na zmniejszenie kosztów obsługi, a zautomatyzowanie prac planistycznych i implementacja algorytmów w środowisku informatycznym (np. w systemie ERP/SCM) może znacznie usprawnić i skrócić prace planistów. Dalsze badania powinny dotyczyć poszukiwań algorytmów, które umożliwią uzyskanie jeszcze lepszych wyników (np. metaheurystyki, algorytmy hybrydowe, łączące heurystyki z metodami dokładnymi) oraz rozszerzenia założeń rozpatrywanego problemu o uwzględnienie okien czasowych dostaw u odbiorców oraz możliwość wykorzystania floty heterogenicznej.

Podziękowania

Wydanie publikacji finansowane przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie (dotacja podmiotowa na utrzymanie potencjału badawczego).

Bibliografia

1. Ambrosino D., Sciomachen A.: A food distribution network problem: a case study, *IMA Journal of Management Mathematics*, 18(1), s. 33–53, 2007
2. Ambroziak T., Jachimowski R., 2011, Wybrane aspekty zagadnienia okien czasowych w problemie trasowania pojazdów, *Automatyka*, 15(2), s. 51–59.
3. Archetti C., Savelsbergh M.W.P., Speranza M.G.: Worst-Case Analysis for Split Delivery Vehicle Routing Problems, *Transportation Science*, 40(2), s. 226–234, 2006.
4. Archetti C., Savelsbergh M.W.P., Speranza M.G.: To split or not to split: That is the question, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(1), s. 114–123, 2008.
5. Archetti C., Speranza M.G.: Vehicle routing problems with split deliveries, *International Transactions in Operational Research* 19(1–2), s. 3–22, 2012.
6. Belfiore P, Yoshizaki H.T.Y.: Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil, *European Journal of Operational Research*, 199(3) s. 750–758, 2009.
7. Bertoli F., Kilby P., Urli T.: Vehicle routing problems with deliveries split over days, *Journal on Vehicle Routing Algorithms* 1(1), s. 1–17, 2018.
8. Bolduc M.-C., Laporte G., Renaud J., Boctor F.F.: A tabu search heuristic for the split delivery vehicle routing problem with production and demand calendars, *European Journal of Operational Research*, 202(1), s. 122–130, 2010.
9. Chen S., Golden B., Wasil E.: The split delivery vehicle routing problem: Applications, algorithms, test problems, and computational results, *Networks*, 49(4), s. 318–329, 2007.
10. Chen P., Golden B., Wang X., Wasil E.: A novel approach to solve the split delivery vehicle routing problem, *International Transactions in Operational Research*, 24(1–2), s. 27–41, 2017.
11. Clarke G., Wright J.W.: Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4), s. 568–582, 1964.
12. Dantzig G.B., Ramser J.H.: The truck dispatching problem, *Management Science*, 6(1), s. 80–92, 1959.
13. Dror M., Trudeau P.: Savings by split delivery routing, *Transportation Science*, 23(2), s. 141–145, 1989.

14. Dror M., Trudeau P.: Split Delivery Routing, *Naval Research Logistics*, 37(3), s. 383–402, 1990.
15. Dror M., Laporte G., Trudeau P.: Vehicle routing with split deliveries, *Discrete Applied Mathematics* 50(3), s. 239–254, 1994.
16. Hanczar P.: *Modele decyzyjne w koordynacji strumieni podaży produktów w łańcuchu dostaw*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław, 2013.
17. Karkula M.: Zarządzanie transportem i wspomaganie decyzji transportowych, [w]: *Zarządzanie systemami logistycznymi*, Kraków, Wydawnictwo AGH, s. 61–93, 2014.
18. Lubańska A.: System scentralizowanych dostaw w sieciach hipermarketów – korzyści i zagrożenia dla dostawców owoców i warzyw, *Zeszyty Naukowe SGGW – Ekonomika i Organizacja Gospodarki Żywnościowej*, vol., nr 74, s. 81–90, 2009.
19. Ozbaygin G., Karasan O., Yaman H.: New exact solution approaches for the split delivery vehicle routing problem, *EURO Journal on Computational Optimization*, 6(1), s. 85–115, 2018.
20. Sierksma G., Tijssen G.A.: Routing helicopters for crew exchanges on off-shore locations, *Annals of Operations Research*, 76, s. 261–286, 1998.
21. Toth P., Vigo D. (eds.): *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, 2nd Ed., SIAM, 2014.
22. Xia Y., Fu, Z.: An Adaptive Tabu Search Algorithm for the Open Vehicle Routing Problem with Split Deliveries by Order, *Wireless Pers Commun*, s. 1–15, 2018.
23. Wilck IV J.H., Cavalier T.: A Genetic Algorithm for the Split Delivery Vehicle Routing Problem, *American Journal of Operations Research*, 2(2), s. 207–216, 2012.
24. Wilck IV J.H., Cavalier T.: A Construction Heuristic for the Split Delivery Vehicle Routing Problem, *American Journal of Operations Research*, 2(2) 153–162, 2012.

PRACTICAL ASPECTS OF THE SPLIT DELIVERY VEHICLE ROUTING PROBLEM (SDVRP)

Summary: Transport process arrangement and delivery route planning is one of the most important tasks of managers in distribution, trade and production enterprises. The problem of route planning concerns the rationalization of product distribution processes offered by company for the customer's network. In operational research, such a problem is included in the class of issues of Vehicle Routing Problem – VRP. The VRP delivery planning problems constitute a wide family of issues arising primarily from the conditions and constraints of the practice. The paper presents the practical application of one of the VRP variants – the problem of arranging routes for the Split Delivery Vehicle Routing Problem – SDVRP, and the results of analyses based on research carried out in a distribution company.

Keywords: supply network, SDVRP, optimization of deliveries, split of deliveries