



10. OPTIMALIZACJA TRANSPORTU

Rozdział ten poświęcony jest najważniejszym zagadnieniom związanym z optymalizacją transportu. Zawiera on:



- podstawowe definicje systemu transportowego,
- istotę i znaczenie optymalizacji systemu transportowego,
- opis zastosowania zagadnienia transportowego w praktyce.

10.1. Wprowadzenie

Procesy transportowo-spedycyjne odgrywają dominującą rolę w fazie dystrybucji. Istotnym jest, że wzrastające ich znaczenie generuje potrzebę wprowadzania innowacyjności dotyczących organizacji przemieszczania ładunków przy zastosowaniu odpowiednio dobranych środków transportu i sposobu przewozu (Krawczyk 2001). Poszukuje się więc metod i narzędzi, umożliwiających precyzyjną odpowiedź na kluczowe pytania odnośnie procesów transportowych i spedycyjnych. Można się zastanawiać, czy należy wprowadzić jakieś zmiany, a jeśli tak, to jakimi wynikami finansowymi będzie to skutkować? Wyzwaniem, jak również potrzebą nowoczesnej firmy jest połączenie korzyści gospodarczych, które płyną z utrzymania wysokiej jakości obsługi klienta, a także z ograniczania kosztów transportu, będących jednocześnie funkcją obsługi klienta. Przy tym kwestia minimalizacji kosztów przyjmuje wymiar strategiczny (Christopher 2000).

Transport należy do dziedziny produkcji usług materialnych, wykonuje przewóz osób i towarów, zapewnia dystrybucję i dostawę surowców oraz produktów przemysłu i rolnictwa do wszystkich regionów świata. w kraju i za granicą. Głównym zadaniem transportu jest pełne i terminowe zaspokojenie potrzeb gospodarki narodowej i ludności w zakresie przewozów, zwiększenie efektywności i jakości sieci transportowej. Biorąc pod uwagę wiodącą rolę transportu w gospodarce rynkowej, zarządzanie transportem jest przypisane do odrębnej dziedziny, zwanej logistyką transportu. Logistyka transportu obejmuje szereg elementów, z których główne to (Yahiaoui, 2019; Vakulenko i Evreenova, 2019):



- ładunki,
- stacje konsolidacyjne,
- węzły transportowe,
- sieć transportowa,
- tabor,
- urządzenia przeładunkowe,
- uczestnicy procesów logistycznych,
- kontenery transportowe
- opakowania.

Główne rezerwy dla poprawy procesu transportu i logistyki tkwią w racjonalnej organizacji interakcji uczestników łańcucha dostaw, koordynacji ich interesów i poszukiwaniu wzajemnie korzystnych i odpowiednich rozwiązań. Postęp w technologii informacyjnej może znacząco podnieść efektywność logistyki transportu, a informacja i wsparcie informatyczne mają należne miejsce wśród kluczowych funkcji logistycznych (Liu, Zhang i Wang, 2018; Sun i in., 2019).

Postęp w technologii informacyjnej przyczynił się do zwiększenia wydajności transportu. Wykorzystanie najnowszych technologii informatycznych pozwala zautomatyzować wszystkie działania informatyczne przedsiębiorstw transportowych, które biorą udział w procesach organizacji ruchu towarowego. Automatyzacja logistyki transportu zapewnia zwiększoną wydajność i optymalizację transportu. Dzięki wprowadzeniu zautomatyzowanych systemów trasowania, rozliczania i planowania w przedsiębiorstwach transportowych, logistyka transportu osiąga nowy poziom (Dekhtyaruk i in., 2021).

10.2. Istota i znaczenie optymalizacji systemu transportowego

Badania i prace związane z optymalizacją systemu transportowego wiążą się z istotnymi problemami polityki transportowej, odgrywając ważną rolę w rozwoju teorii ekonomiki transportu. Rozwój prac i badań optymalizacyjnych jest stymulowany przez praktykę gospodarczą transportu, wskazującą na najistotniejsze kwestie do rozwiązania, a także wyznaczającą zakres oraz kierunki badań metodycznych. Z drugiej strony tematyka optymalizacji systemu transportowego była inspiracją dla naukowców do implementacji



osiągnięć teorii systemów oraz cybernetyki do rozwiązywania ekonomicznych problemów transportu. Przyczyniło się to do korzystnych zmian w aspekcie metodyki badań naukowych, jak również wzbudziło zainteresowania aspektami ekonomiki transportu natury metodologicznej (De Maio i Vitetta, 2015).

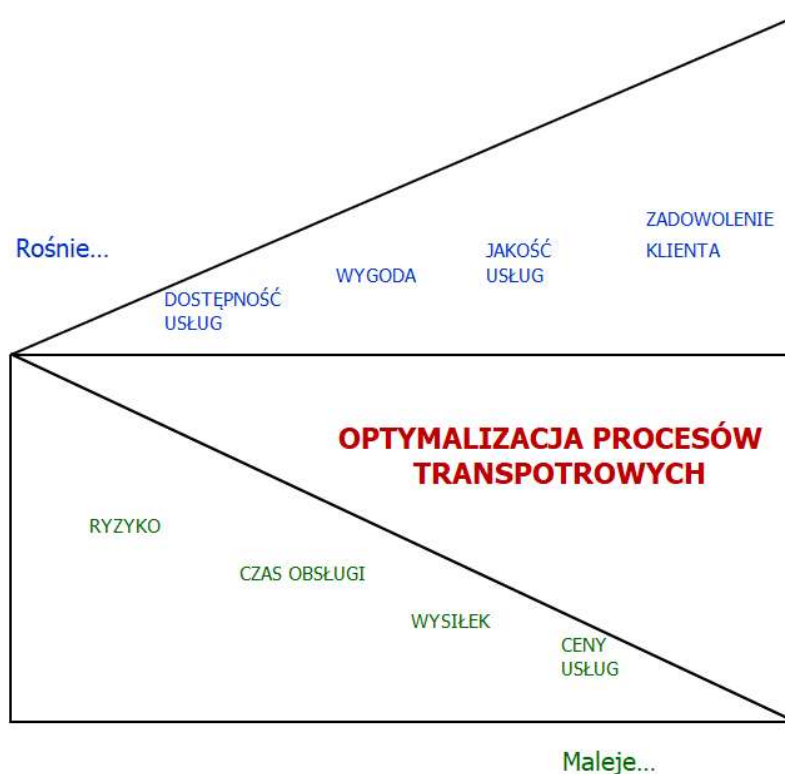
Optymalny system transportowy rozumiany jest jako system w pełni i w prawidłowy sposób zabezpieczający obsługę istniejących potrzeb przewozowych (wielkość, rodzaje, dyspersja terenowa) przy najniższym nakładzie pracy społecznej, przy racjonalnym wykorzystaniu cech i właściwości (technicznych, eksploatacyjnych i ekonomicznych) poszczególnych gałęzi transportu. Ideą tej przyjętej w literaturze definicji zagadnienie optymalizacji systemu transportowego jest sprowadzone do całkowitej oraz właściwej obsługi potrzeb przewozowych przy kryterium minimalizacji nakładów pracy społecznej (Wong i in., 2016).

Optymalizacja w transporcie to pojęcie bardzo rozległe, określające rozmaite procesy. Ich cel to polepszenie sytuacji zaangażowanych w transport stron (nadawców, odbiorców, pracowników). Najczęściej w literaturze można znaleźć aspekty odnoszące się do optymalizacji i spedycji. Zazwyczaj chodzi o redukcję kosztów transportu oraz kosztów dostawy. W praktyce zagadnienie to jest jednak wielokryterialne. Istotne są także mniej popularne kryteria, wśród których można wymienić komfort pracy, ekologię, jakość transportowych usług, zadowolenie klienta, a nawet zużycie dróg. Koszt oraz czas są jednak dominującymi czynnikami. Logistyczne procesy powinny być rozpatrywane ze strategicznej, a także operacyjnej perspektywy. Perspektywa strategiczna oznacza długoterminowe planowanie oraz projektowanie wizji przedsiębiorstwa. Operacyjna perspektywa dotyczy obecnej sytuacji. Te aspekty optymalizacji powinny być ze sobą związane, jak również mieć wsparcie ze strony rozmaitych systemów zarządzania logistyką. Tematyka optymalizacji transportu, nawet przy ograniczeniu tylko do zminimalizowania kosztów, obejmuje cały ciąg działań, dotyczący kompletnego łańcucha dostaw. Najważniejsze jest utworzenie efektywnej sieci dystrybucji, dotyczącej identyfikacji zlokalizowania odbiorców oraz ich potrzeb, które potencjalnie zmieniają się w czasie oraz optymalne rozlokowanie centrów dystrybucji, terminali dystrybucyjnych oraz magazynów. Ważne jest także dobranie właściwej floty (wielkości pojazdów, podział na tabor własny oraz zewnętrzny, a także ich możliwości, takie jak wyposażenie w podnośnik, dźwig, chłodnię, przestrzeń ładunkową), albowiem nieodpowiednio dobrana flota może przyczynić się do znacznego ograniczenia potencjału przedsiębiorstwa transportowego. W procesie optymalizacji transportu powinno się też



przeanalizować różne scenariusze przepływu produktów, jak również globalną identyfikację wąskich gardeł oraz czynników zmniejszających zysk firmy (www_10.1).

Zaletą właściwie przeprowadzonego procesu optymalizacji jest między innymi wzrost poziomu bezpieczeństwa, lepsza jakość usług oraz większa dostępność dóbr i usług. Zintegrowanie systemów oraz zastosowanie uprzednio wyznaczonych standardów razem z umiejętnym doбором technik optymalizacji, jest pomocne w komunikacji krajowej i regionalnej, a także jest sprzyja zwiększeniu konkurencyjności przedsiębiorstwa. Najważniejsze korzyści prawidłowo dokonanej optymalizacji ukazuje prezentuje rysunek 10.1. Przedstawia zachodzące zmiany za sprawą wdrożenia procesów optymalizacji.



Rysunek 10.1. Zmiany wynikające z zastosowania optymalizacji procesów transportowych

Źródło: (Zajdel i Filipowicz, 2008)

Można wymienić kilka zagadnień optymalizacyjnych. Najistotniejszymi z nich w grupie drobnych przesylek są:

- wybór między przewoźnikiem pośrednim i bezpośrednim,
- planowanie potencjału dystrybucji,
- rozważenie dystrybucji lokalnej.



Przyjmowanie zleceń związanych z przewozem zawsze jest związane z kwestią dotyczącą wyboru między bezpośrednimi dostawcami a zastosowaniem sieci dystrybucji. Podjęcie decyzji odnośnie przewozu przesyłki zależy od kosztów terminalowych i kosztów dowozu. Problem ten dotyczy gabarytów przesyłki. Przesyłka o dużej wielkości oraz znaczny dystans dowozu skłania do wybrania transportu bezpośredniego. Jeżeli przesyłka jest pojedyncza, zagadnienie staje się łatwe do rozstrzygnięcia, gdyż do jego rozwiązania wystarczy porównać koszty przewozu za pomocą systemu terminalowego. Trzeba jednak mieć na uwadze, iż łączenie przesyłki z innymi powoduje obniżenie kosztów transportu pośredniego. Projektowanie sieci dystrybucji przesyłek drobnych to zagadnienie mające charakter strategiczny. Koszt całkowity systemu można obliczyć za pomocą następującego wzoru (Milewski, 2011):

$$K_{CSD} = \sum_{j=1}^n K_{d-o_j} + K_{T_j} + K_{P_j},$$

gdzie:

K_{CSD} – koszt całkowity systemu dystrybucji,

K_{d-o_j} – koszty dowozowo - odwozowe *i-tego* terminalu,

K_{T_j} – koszty terminalowe *i-tego* terminalu,

K_{P_j} – koszty transportu liniowego *i-tego* terminalu,

n – liczba terminali.

Problemem, mającym charakter operacyjny jest zaplanowanie tras przewozów przesyłek w ramach ustaleń strategicznych. Koszt całkowity przewozu przesyłek po danej trasie może być wyrażony za pomocą poniższego wzoru (Milewski, 2011):

$$K_{CDL} = \sum_{k=1}^o K_{i,k} * d_k,$$

gdzie:

K_{CDL} – koszt całkowity dystrybucji lokalnej,

$K_{i,k}$ – koszt przewozu (zwożenie lub rozwożenie) przesyłek na trasie k

d_k - długość trasy k

o – liczba tras.

Głównym celem metod oraz modeli optymalizacyjnych jest rozwiązanie problemów. Kryterium optymalizacyjne to najczęściej jak najkrótszy czas przewozu lub jak najkrótsza trasa. Podejście to jest wystarczające przy założeniu, że całkowity koszt jest zależny bezpośrednio



od długości tras. Trasę należy zatem tak dobrać, żeby „była najkrótsza lub czas przejazdu po niej jak najmniejszy.” W tym miejscu należy zwrócić uwagę na optymalizacyjny model makrosystemu transportowego (Milewski, 2011). Jego zadanie to wypracowanie odpowiedniej liczby wskaźników oraz miar, koniecznych w procesie racjonalnego zarządzania transportem w trakcie logistycznych realizacji działań operacyjnych. Im model precyzyjniej odzwierciedla badaną rzeczywistość, tym możliwości sterownicze są bardziej skuteczne. W zależności od podobieństwa model optymalizacyjny można zastosować do bezpośredniego tworzenia strategii biznesowej w sektorze usług transportowych. Optymalizacyjny model systemu transportowego dostarcza metody oraz narzędzia naukowe umożliwiające sterowanie systemem transportowym. Można zapisać go w postaci następującego wyrażenia (Ficoń, 2010):

$$MDE_{ST} = \langle Z_{ST}, P_{ST}(t) \parallel G_{ST}, F_{ST}, H_{ST} \rangle \xrightarrow{\max STO_{ST}} \min S_{ST},$$

gdzie:

Z_{ST} – zbiór zasobów operacyjnych (logistycznych) systemu ST ,

P_{ST} – zbiór procesów operacyjnych (logistycznych) systemu ST ,

G_{ST} – zbiór ograniczeń i warunków brzegowych systemu ST ,

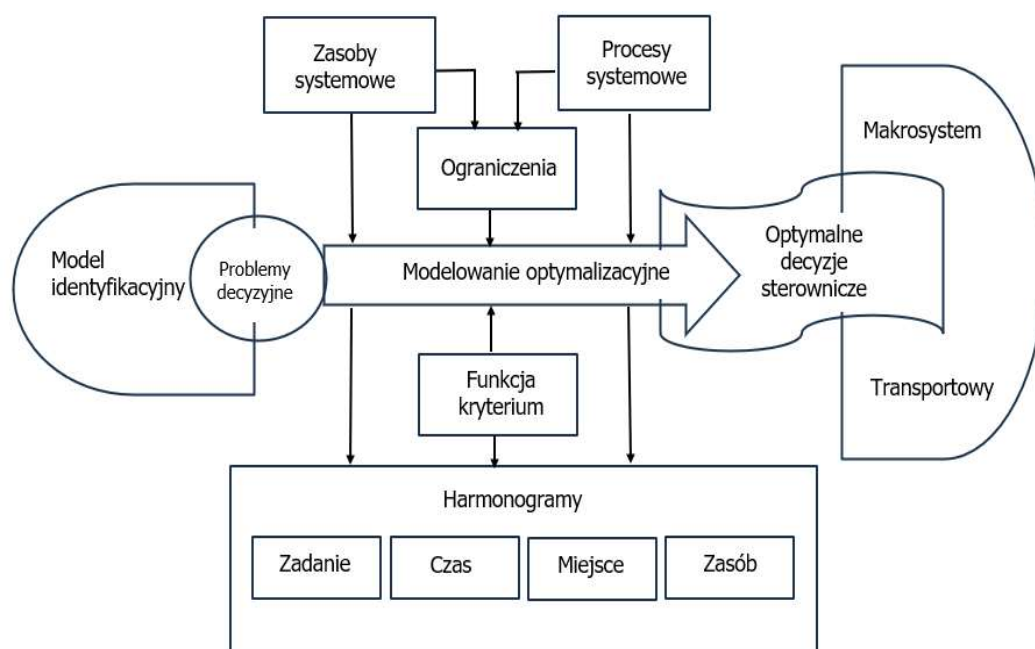
F_{ST} – funkcja kryterium działania systemu ST ,

H_{ST} – zbiór dopuszczalnych harmonogramów działania systemu ST ,

S_{ST} – globalne koszty funkcjonowania makrosystemu transportowego ST ,

STO – logistyczne standardy obsługi klienta przez sektor transportowy.

Koncepcja modelowania optymalizacyjnego systemu transportowego została przedstawiona na rysunku 10.2.



Rysunek 10.2. Koncepcja modelowania optymalizacyjnego systemu transportowego

Źródło: (Ficoń, 2010)

Istnieją oczywiście jeszcze inne modele, pomagające rozwiązać optymalizacyjne problemy w transporcie. Zagadnień dotyczących optymalizacji transportu jest znacznie więcej. Występują między nimi różnice w zależności od przedsiębiorstwa, jego wielkości oraz produktów, którymi dysponuje.

10.3. Zagadnienia optymalizacji transportu w praktyce

Jedną z podstawowych składowych optymalizacji transportu jest **optymalizacja tras**. Polega ona na zaprojektowaniu takich tras dla pojazdów, którymi są przewożone wyroby, żeby optymalizować zyski oraz jakość obsługi klientów. Dla przedsiębiorstwa znaczy to najczęściej redukcję kosztów oraz czasu transportu, natomiast z perspektywy odbiorców oznacza obniżenie kosztów i terminowe dostawy. Cele te osiągnąć są przez minimalizację długości przejechanego dystansu, możliwość dostosowania harmonogramów przewozów do zmieniających się w czasie warunków oraz nowych sytuacji, zsynchronizowanie transportu z pracą magazynów, a także możliwość częstego i szybkiego przeprowadzenia optymalizacji w celu aktualizacji bieżącego planu. Chociaż w zadaniach transportowych najczęściej wyznaczanym celem jest redukcja do minimum kosztów transportu lub dążenie do zminimalizowania odległości, to w przypadku przewozów produktów, głównie spożywczych,



mogących szybko utracić swą przydatność do spożycia, wyrobów, które szybko tracą własności użytkowe lub tych, które są dostarczane zgodnie z zasadą *Just in Time* ze względu na ograniczone możliwości magazynowania lub zbyt wygórowane koszty magazynowania u odbiorcy albo na zbyt późne dostawy realizowane przez poprzednie ogniwa łańcucha dostaw, jako priorytetowy cel obierane jest minimalizowanie czasu realizacji wszystkich dostaw. Krótszy czas dostaw daje możliwość spełnienia oczekiwań odbiorców dotyczących terminów dostaw, a także zachowanie wartości użytkowych przewożonych wyrobów, co może stanowić rekompensatę wydatków, które wynikają z zaangażowania środków transportowych. W powyższych przypadkach najważniejsza jest zatem redukcja czasu przewozu o najdłuższym czasie trwania w danym systemie dostaw, czyli obliczenie najkrótszego czasu, w jakim dostawy mogłyby się zakończyć (Gaspars-Wieloch, 2011).

Z perspektywy informatycznej optymalizacja tras w transporcie i logistyce ściśle wiąże się z **zagadnieniem komiwojażera** (TSP, Travelling Salesman Problem) i problemem marszrutyzacji (VRP, Vehicle Routing Problem). Problem komiwojażera należy do klasycznych problemów optymalizacji kombinatorycznej i wiąże się z zaplanowaniem najkrótszej trasy, a zarazem najtańszego transportu, przebiegającej przez n określonych punktów nadania oraz odbioru, przy danych kosztach przejazdu między każdą parą punktów. Problem VRP jest uogólnieniem zagadnienia TSP. Jest w nim możliwe występowanie wielu komiwojażerów (wielu pojazdów), mających możliwość wielokrotnego powrotu do bazy przed dotarciem do wszystkich n lokalizacji. Zarówno dla problemu TSP, jak i VRP istnieje wiele uogólnień oraz dodatkowych, praktycznych ograniczeń, do których można zaliczyć okienka czasowe, ograniczenia kolejnościowe odwiedzanych lokalizacji, różne możliwości pojazdów oraz kierowców, czy też ograniczenia pojemnościowe, które są przydatne przy rozwożeniu i odbieraniu towarów (www_10.2).

W celu rozwiązania zadania TSP należy podać: poziom zapasu produktów w każdym punkcie nadania, wielkość zapotrzebowania w każdym punkcie odbioru, jak również koszty transportu z każdego punktu nadania do każdego punktu odbioru (Winiczenko, 2009). Jeżeli w tym zagadnieniu mamy do czynienia tylko z jednym wyrobem, wówczas zapotrzebowanie punktów odbioru może być uzupełniane z jednego lub więcej punktu nadania. Zamierzeniem takiego planu jest obliczenie ilości produktów wysłanej z każdego punktu nadania do każdego punktu odbioru w celu minimalizacji całkowitego kosztu transportu (Stachurski i Wierzbicki, 2001).



Jeśli koszt przejazdu jest wprost proporcjonalny do ilości transportowanego towaru, mamy do czynienia z zadaniem transportowym liniowym. W przeciwnym razie, jeżeli ten warunek nie będzie spełniony, to zadanie transportowe stanie się zadaniem nieliniowym. Jedną z najpopularniejszych metod optymalizacyjnych jest programowanie liniowe (Silaen i in., 2019; Gass, 2013). Największa przydatność tej metody odnotowuje się przy tworzeniu sieci obiektów, przy czym warunkami ograniczającymi dla modelu jest wielkość popytu i podaży dla zakładów produkcyjnych, centrów dystrybucji lub poszczególnych rynków. Przy danej funkcji celu, zakładającej na przykład redukcję kosztu całkowitego, programowanie liniowe jest pomocne przy tworzeniu optymalnego wzorca rozlokowania obiektów, który uwzględnia ograniczenia popytowo-podażowe. Chociaż metoda programowania liniowego jest dość praktyczna, to jednak istnieją ograniczenia w jej stosowaniu, gdyż należy w sposób deterministyczny sformułować problem rozwiązywany za jej pomocą, jak również należy poddać to zagadnienie powinien liniowemu przybliżeniu. Oprócz tego w programowaniu liniowym nie mogą być uwzględniane stałe oraz zmienne koszty funkcjonowania obiektów logistycznych (Coyle i in., 2002).

W literaturze logistycznej można znaleźć wiele prac naukowych, poświęconych teorii i praktyce organizacji optymalnego systemu transportowego przy użyciu różnych modeli oraz metod. Publikacje (Lai i Bierlaire, 2015; De Maio i Vitetta, 2015; Manley, Orr i Cheng, 2015; Vitetta, 2016) przedstawiają badania optymalizacji tras według kryterium minimalnego czasu dostawy.

W artykułach (Hess i in., 2015; Nyrkov, Sokolov i Belousov, 2015) do wyznaczenia optymalnej trasy zastosowano metody oparte na alternatywnym próbkowaniu. Natomiast autorzy publikacji (Zhilenkov, Nyrkov, i Cherniy, 2015; Omelianenko i in., 2019; Tomashevskiy, 2007; Cheng i Wu, 2020; Zaychenko, 2014) posłużyli się metodami modelowania tras w systemach transportowych opartymi na logice rozmytej. W publikacjach (Shang i in., 2020; Shramenko. i Shramenko, 2019) ich autorzy chcąc zaplanować optymalną trasę, zastosowali model heurystyczny model, natomiast w artykułach (Maleev i in., 2019; Skvortsov, Pshonkin i Luk'yanov, 2018) został opisany kwantowy model wyznaczenia optymalnej trasy w systemach transportowych.

Z wynikami modelowania wyboru optymalnych tras z wykorzystaniem danych z **Globalnego Systemu Pozycjonowania** (GPS), które są skoncentrowane na samochodach ciężarowych, wykonujących długie przejazdy, można zapoznać się w publikacjach (Khripach i in., 2018; Navrodska i in., 2019; Fialko i in., 2020). Poniżej zostały przedstawione



w szczegółowy sposób poszczególne etapy postępowania podczas rozwiązywania zadania transportowego na praktycznym przykładzie zagadnienia transportowego z kryterium czasu do optymalizacji zaopatrzenia sieci supermarketów, który został opisany w artykule (Gaspars-Wieloch, 2011).

Charakterystyka problemu zagadnienia transportowego z kryterium czasu do optymalizacji zaopatrzenia sieci supermarketów

W opisywanym zagadnieniu z zakresu optymalizacji transportu rozpatrywana jest rozmieszczona w różnych częściach kraju sieć supermarketów. Na każdy tydzień opracowywana jest nowa propozycja towarów, które, obok zawsze dostępnego w sprzedaży asortymentu, do których należą produkty spożywcze, drogerijne, są sprzedawane klientom jedynie przez sześć dni od poniedziałku do soboty albo do ewentualnego wyczerpania zapasów. W skład oferty tygodnia wchodzi m.in. produkty AGD, wyroby papiernicze, ubrania, zabawki, narzędzia czy artykuły ogrodnicze. Często oferta produktowa dopasowywana jest do pory roku oraz dni świątecznych, takich jak Boże Narodzenie, Wielkanoc, walentynki, Wszystkich Świętych, Pierwsza Komunia Święta itd. Ofertę tygodnia ustala się z dużym wyprzedzeniem, a produkty, które ona obejmuje, są magazynowane w hurtowniach rozlokowanych po całym państwie. Zależnie od możliwości, jakimi dysponują dostawcy, poszczególne typy towarów są dostarczane do hurtowni tydzień wcześniej w różnych dniach (wliczając też soboty rano) zanim trafią do sprzedaży. Hurtownie mają obowiązek przygotować zestawy produktów dla każdego sklepu. W przykładowym zestawie może znajdować się 20 serwetek, 30 telewizorów, 40 wiader, 20 par kłapek, 30 garnków, 20 misiów, 30 par spodni, 60 kremów do rąk, 50 piłek i 40 zeszytów.

Z uwagi na to, że zestawy mogą być skompletowane dopiero pod koniec tygodnia, a także ze względu na niewystarczającą powierzchnię magazynów w supermarketach, przedsiębiorstwu zależy na dostarczeniu asortymentu z oferty tygodnia do wszystkich sklepów w nocy z niedzieli na poniedziałek i niezwłoczne rozłożenie ich na regałach.

Każdy samochód ciężarowy, który wyjeżdża z hurtowni, dostarcza zestawy produktów od razu do kilku lub nawet kilkunastu supermarketów, tworzących sektor. Supermarkety w danym sektorze są rozmieszczone dość blisko siebie (np. w tej samej miejscowości). Czas zaopatrzenia sektora jest zależny od tego, z której hurtowni zostanie skierowany do niego dany pojazd. Kluczowy cel przedsiębiorstwa to zminimalizowanie czasu najdłuższej dostawy.



Model matematyczny zadania transportowego

Ogólną postać modelu opisującego zamknięte zagadnienie transportowe z kryterium czasu można przedstawić następująco (Gaspars-Wieloch, 2011):

$$\max_{x_{ij} > 0} \{t_{ij}\} \rightarrow \min \quad (1)$$

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

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

$$x_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (5),$$

gdzie:

x_{ij} – wielkość towaru przewożona na trasie od i -tego dostawcy do j -tego odbiorcy,

t_{ij} – czas transportu towaru na trasie od i -tego dostawcy do j -tego odbiorcy,

n – liczba odbiorców,

m – liczba dostawców,

a_i – podaż i -tego dostawcy,

b_j – popyt j -tego odbiorcy.

Kiedy nie zachodzi równość między całkowitą podażą a całkowitym popytem, ostatni wzór (5) nie jest brany pod uwagę, a warunki podażowe (2) albo popytowe (3) zmieniają się w nierówności. Opisany wyżej model matematyczny dotyczy okoliczności, kiedy to osoba podejmująca decyzje nie zakłada innych przesłanek, dotyczących np. niedostatecznej kubatury samochodów rozwożących towar, wymaganego minimalnego poziomu zaspokojenia popytu lub różnicy w charakterze czasu transportu i czasu rozładunku.

W pracach naukowych (Sikora, 2008) został przedstawiony algorytm, umożliwiający rozwiązanie opisanego wcześniej problemu transportowego. Kolejne etapy toku postępowania według wspomnianego algorytmu zostały wymienione poniżej (Gaspars-Wieloch, 2011):



1. Pierwszym krokiem jest wyznaczenie dopuszczalnego równania bazowego za pomocą metody minimalnego elementu macierzy, zwaną metodą MEM w oparciu o tablicę z czasami.
2. W drugim etapie ważne jest ustalenie dla określonego rozwiązania maksymalnego czasu na realizację dostawy (T^k) na podstawie wzoru (6):

$$T^k = \max_{x_{ij} > 0} \{t_{ij}\}, \quad (6)$$

gdzie:

T^k – maksymalny czas realizacji dostawy w k -tej iteracji.

3. Kolejno musi być przedstawiona tablica kosztów (c_{ij}) dla k -tego rozwiązania według wzoru (7):

$$c_{ij}^k = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & t_{ij} < T^k \\ 1 & t_{ij} = T^k \\ 10 & t_{ij} > T^k \end{array} \right. \quad \text{jeżeli} \quad (7)$$

4. Następny krok polega na sprawdzeniu optymalności rozwiązania w oparciu o tablicę kosztów. W przypadku nieujemności kryteriów optymalności (Δ_{ij}) dla wszystkich tras bazowych, procedura kończy się na tym etapie. Jeśli kryteria optymalne będą ujemne, należy wykonać czynności podane w punkcie piątym.

$$\Delta_{ij}^k = c_{ij}^k - \alpha_i^k - \beta_j^k, \quad (8)$$

gdzie:

α_i^k, β_j^k – zmienne dualne, czyli potencjały w k -tej iteracji.

5. Powinno zostać ponownie wyznaczone dopuszczalne rozwiązanie bazowe, przy czym należy wziąć pod uwagę najbardziej ujemne kryterium optymalności, a następnie powrócić do kroku drugiego.

Powyższy algorytm jest oparty na tzw. metodzie potencjałów, która została opisana w wielu publikacjach, m.in. (Leonard, 1997). Jeśli w określonym zagadnieniu decyzyjnym występują jeszcze inne założenia, dotyczące ograniczonej pakowności środków transportu,



wówczas w omówionej procedurze powinno się dodatkowo odwołać do zasad, które zostały przyjęte w toku postępowania dla zadania transportowego o ograniczonej przepustowości tras (Codeca i Cahill, 2022; Sanz i Escobar Gomez, 2013).

Algorytm ten może być wykorzystywany jako ręczna procedura, gdy mamy do czynienia z zadaniami z niewielką liczbą dostawców i odbiorców. Dla problemów o większej złożoności rekomendowane jest zastosowanie właściwego programu stworzonego dla algorytmu w dowolnym języku programowania.

Inną opcją dla przedstawionej procedury może być opracowane optymalizacyjne narzędzie informatyczne, którego przykładem może być Solver, zamieszczony w programie Microsoft Excel. Należy jednak wziąć pod uwagę, iż wersja Solvera ma wpływ na typ zadań możliwych do rozwiązania. Z każdą nowszą wersją są oferowane są większe możliwości odnośnie liczby warunków czy liczby zmiennych w zadaniu, czasu niezbędnego do rozwiązania problemu, a także rodzaju używanych funkcji. W wersji standardowej Solvera nie może być używana funkcja „if”, „max{ }” czy „min{ }”. Funkcja „max” pojawia się w modelu matematycznym, opisanym wzorami (1)–(5), zatem pozornie odnosi się wrażenie, że zadania przy użyciu standardowej wersji Solvera nie da się rozwiązać.

W celu przeprowadzenia obliczeń poniżej został rozważony przykład z konkretnymi danymi liczbowymi, dla którego został sformułowany odpowiedni model matematyczny. Przykład dotyczy sieci supermarketów, w skład której wchodzi trzy hurtownie: P (na południu kraju), Z (na zachodzie kraju) i PW (na północnym-wschodzie kraju) oraz 50 sklepów, podzielonych na 8 różnorodnych sektorów, oznaczonych literami (A, B, C, D, E, F, G oraz H). W oparciu o przetransportowane wyroby, przez każdą hurtownię może być sporządzonych 18 zestawów.

Zapotrzebowanie na zestawy poszczególnych sektorów przedstawia się następująco:

$$Z_A = 6; Z_B = 7; Z_C = 9; Z_D = 6; Z_E = 8; Z_F = 5; Z_G = 4; Z_H = 5, \text{ przy czym } \sum_{j=1}^8 50$$

Czas obsługiwanego każdego z sektorów przez pojazdy rozwożące towar tworzy czas przejazdu z hurtowni do sektora, który nie jest zależny od liczby sklepów w sektorze, jak również czas wyładunku w samym sektorze, który jest zależny od liczby sklepów, co ilustrują tabele 10.1 i 10.2.

**Tabela 10.1. Przybliżony czas przejazdu (t_{ij}^p , w godzinach)**

Sektory Hurtownie	A	B	C	D	E	F	G	H
P	9	6	3	3	6	9	12	7
Z	5	4	5	6	9	12	9	7
PW	8	5	11	5	3	3	4	3

Źródło: (Gaspars-Wieloch, 2011)

Przyjęte zostało założenie, iż czas transportu w danym sektorze, który w praktyce jest uwarunkowany dystansem pomiędzy sklepami w danym sektorze, jest wzięty pod uwagę w czasach wyładunku asortymentu w każdym sklepie. Celem jest minimalizacja czasu dostawy trwającej najdłużej.

Tabela 10.2. Średni jednostkowy czas rozładunku (t_i^r , w godzinach)

Sektory	A	B	C	D	E	F	G	H
t_i^r	1/3	1/2	1/3	2/5	1/2	2/5	1/4	2/5

Źródło: (Gaspars-Wieloch, 2011)

Zaprezentowany powyżej przykład z danymi liczbowymi ma trochę większy stopień skomplikowania niż standardowe zagadnienie transportowe z kryterium czasu. Z tego względu dokładne zapisanie zadania optymalizacyjnego, które odnosi się do omawianego przykładu, jedynie fragmentarycznie jest podobne do ogólnego modelu matematycznego, co obrazują wzory (9)-(21). Funkcję celu do minimalizacji czasu dostawy można zapisać w następujący sposób (Gaspars-Wieloch, 2011):

$$\begin{aligned} \max \{ & (9 \min \{x_{11}, 1\} + \frac{1}{3}x_{11}), (6 \min \{x_{12}, 1\} + \frac{1}{2}x_{12}), (3 \min \{x_{13}, 1\} + \frac{1}{3}x_{13}), (3 \min \{x_{14}, 1\} + \\ & + \frac{2}{5}x_{14}), (6 \min \{x_{15}, 1\} + \frac{1}{2}x_{15}), (9 \min \{x_{16}, 1\} + \frac{2}{5}x_{16}), (12 \min \{x_{17}, 1\} + \frac{1}{4}x_{17}), (7 \min \{x_{18}, 1\} \\ & + \frac{2}{5}x_{18}), (5 \min \{x_{21}, 1\} + \frac{1}{3}x_{21}), (4 \min \{x_{22}, 1\} + \frac{1}{2}x_{22}), (5 \min \{x_{23}, 1\} + \frac{1}{3}x_{23}), (6 \min \{x_{24}, 1\} \\ & + \frac{2}{5}x_{24}), (9 \min \{x_{25}, 1\} + \frac{1}{2}x_{25}), (12 \min \{x_{26}, 1\} + \frac{2}{5}x_{26}), (9 \min \{x_{27}, 1\} + \frac{1}{4}x_{27}), \end{aligned}$$



$$\left(7 \min\{x_{28}, 1\} + \frac{2}{5}x_{28}\right), \left(8 \min\{x_{31}, 1\} + \frac{1}{3}x_{31}\right), \left(5 \min\{x_{32}, 1\} + \frac{1}{2}x_{32}\right), \left(11 \min\{x_{33}, 1\} + \frac{1}{3}x_{33}\right), \left(5 \min\{x_{34}, 1\} + \frac{2}{5}x_{34}\right), \left(3 \min\{x_{35}, 1\} + \frac{1}{2}x_{35}\right), \left(3 \min\{x_{36}, 1\} + \frac{2}{5}x_{36}\right), \left(4 \min\{x_{37}, 1\} + \frac{1}{4}x_{37}\right), \left(3 \min\{x_{38}, 1\} + \frac{2}{5}x_{38}\right) \rightarrow \min \quad (9)$$

Warunki, które odnoszą się do popytu w sektorach zapisane są następująco (Gaspars-Wieloch, 2011):

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} = 6 \quad (10)$$

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} = 7 \quad (11)$$

$$x_{13} + x_{23} + x_{33} = 9 \quad (12)$$

$$x_{14} + x_{24} + x_{34} = 6 \quad (13)$$

$$x_{15} + x_{25} + x_{35} = 8 \quad (14)$$

$$x_{16} + x_{26} + x_{36} = 5 \quad (15)$$

$$x_{17} + x_{27} + x_{37} = 4 \quad (16)$$

$$x_{18} + x_{28} + x_{38} = 5 \quad (17)$$

Warunki, które dotyczą podaży hurtowni przedstawione są poniżej (Gaspars-Wieloch, 2011):

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{18} \leq 18 \quad (18)$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{28} \leq 18 \quad (19)$$

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} + x_{38} \leq 18 \quad (20)$$

Warunek mający związek z całkowitoliczbowością zmiennych decyzyjnych ma postać (Gaspars-Wieloch, 2011):

$$x_{11}, x_{12}, \dots, x_{38} \in N, \quad (21)$$

gdzie:

x_{11} – liczba zestawów przewiezionych z hurtowni P do supermarketu A,

⋮

x_{38} – liczba zestawów przewiezionych z hurtowni PW do supermarketu H.



Omówiony przykład należy do dosyć zawiłych nie tylko ze względu na brak bezpośredniej możliwości rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych zawierających funkcję „max{ }” i „min{ }” w standardowej wersji Solvera. Do kolejnych utrudnień należą wprowadzone dwa rodzaje czasów: czas dojazdu do każdego sektora, a także czas wyładunku w danym sektorze. Było to niezbędne, ponieważ produkty transportowane ciężarówkami nie są wyładowywane w jednym miejscu, ale w kilku sklepach. Istnieje zatem zależność między czasem rozładunku a liczbą obsłużonych supermarketów. Do tego typu problemów nie powinien być bezpośrednio stosowany opisany wcześniej algorytm.

Konstrukcja arkusza kalkulacyjnego Excel w przedstawionym przykładzie zadania transportowego

Sposób wprowadzenia danych w arkuszu kalkulacyjnym Microsoft Excel omówionego przykładu zadania transportowego prezentuje rysunek 10.3. Komórki o adresach C8-J10 są polami, w których będą widoczne optymalne wartości zmiennych decyzyjnych (x_{11} , x_{12} , ..., x_{38}). Zsumowane wartości pól odpowiednich kolumn tabeli C8-J10 zostały obliczone w wierszu z numerem 11. Reprezentują one lewą stronę warunków (10)-(17). Sformułowany popyt został zamieszczony w wierszu o numerze 12. Dodane wartości z zakresów komórek C8:J8, C9:J9, C10:J10 są widoczne w kolumnie oznaczonej literą K. Zawarta jest w nich całkowita liczba zestawów przewiezionych odpowiednio z hurtowni P, Z, PW, czyli lewa strona ograniczeń dotyczących podaży (18)-(20). Wartości podaży poszczególnych hurtowni są umieszczone w kolumnie L.



	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
7	Hurtownie i sektory	A	B	C	D	E	F	G	H	Suma w danej hurtowni	Podaż
8	P									0	18
9	Z									0	18
10	PW									0	18
11	Suma w danym sektorze	0	0	0	0	0	0	0	0		
12	Popyt	6	7	9	6	8	5	4	5		
13											
16	Czas przejazdu do sektora	9	6	3	3	6	9	12	7		
17		5	4	5	6	9	12	9	7		
18		8	5	11	5	3	3	4	3		
19											
20	Czas rozładunku	0,33	0,50	0,33	0,40	0,50	0,40	0,25	0,40		
21											
24	Całkowity czas rozładunku	0	0	0	0	0	0	0	0		
25		0	0	0	0	0	0	0	0		
26		0	0	0	0	0	0	0	0		
27											
30	Całkowity czas przejazdu (stały) i rozładunku	9	6	3	3	6	9	12	7		
31		5	4	5	6	9	12	9	7		
32		8	5	11	5	3	3	4	3		
33											
36	Trasy bazowe i niebazowe	0	0	0	0	0	0	0	0		
37		0	0	0	0	0	0	0	0		
38		0	0	0	0	0	0	0	0		
39											
43	Całkowity czas na trasach bazowych	0	0	0	0	0	0	0	0		Funkcja celu
44		0	0	0	0	0	0	0	0		0,0
45		0	0	0	0	0	0	0	0		

Rysunek 10.3. Dane wprowadzone do arkusza kalkulacyjnego w omawianym przykładzie zadania transportowego

Źródło: (Gaspars-Wieloch, 2011)

W wierszach 16-45 zostało zaprezentowane zestawienie parametrów oraz formuł, niezbędnych do wyznaczenia funkcji celu. W wierszach 16-18, a także 20 umieszczone są dane, pochodzące z tabel 1 oraz 2. Całkowity czas rozładunku z i -tej hurtowni do j -tego sektora w wierszach 24-26 zostały obliczone przez pomnożenie jednostkowego czasu rozładunku z wiersza 20. przez liczbę dostarczonych zestawów, znajdujących się w wierszach 8-10, co przedstawia rysunek 10.4.

24	Całkowity czas rozładunku	=C20*C8	=D20*D8	=E20*E8	=F20*F8	=G20*G8	=H20*H8	=I20*I8	=J20*J8
25		=C20*C9	=D20*D9	=E20*E9	=F20*F9	=G20*G9	=H20*H9	=I20*I9	=J20*J9
26		=C20*C10	=D20*D10	=E20*E10	=F20*F10	=G20*G10	=H20*H10	=I20*I10	=J20*J10

Rysunek 10.4. Obliczenie całkowitego czasu rozładunku

Źródło: opracowanie na podstawie (Gaspars-Wieloch, 2011)

Sposób wyznaczenia całkowitego czasu przejazdu oraz rozładunku w wierszach o numerach 30-32 został pokazany na rysunku 10.5.



30		=C16+C24	=D16+D24	=E16+E24	=F16+F24	=G16+G24	=H16+H24	=I16+I24	=J16+J24
31	Całkowity czas przejazdu (stały) i	=C17+C25	=D17+D25	=E17+E25	=F17+F25	=G17+G25	=H17+H25	=I17+I25	=J17+J25
32	rozładunku (zmienny)	=C18+C26	=D18+D26	=E18+E26	=F18+F26	=G18+G26	=H18+H26	=I18+I26	=J18+J26

Rysunek 10.5. Obliczenie całkowitego czasu przejazdu

Źródło: opracowanie na podstawie (Gaspars-Wieloch, 2011)

Celem zapisanie „ $\min\{x_{ij}, 1\}$ ” we wzorze (9) jest wyodrębnienie tras bazowych. W standardowej wersji Solvera nie ma możliwości rozwiązywania zadań, w których występuje funkcja „ $\min\{\}$ ”. Z tego względu należy inaczej wyznaczyć trasy bazowe. Jeśli iloraz w formule (22) ma wartość zbliżoną do liczby 1, wówczas tę trasę można określić jako bazową. Jeżeli zaś iloraz jest równy zero, wtedy przewóz na badanej trasie się nie odbędzie, co pokazuje rysunek 10.6.

$$\frac{x_{ij}}{x_{ij} + 0,00001} \quad (22)$$

36		=C8/(C8+0,00001)	=D8/(D8+0,00001)	=E8/(E8+0,00001)	=F8/(F8+0,00001)	=G8/(G8+0,00001)	=H8/(H8+0,00001)	=I8/(I8+0,00001)	=J8/(J8+0,00001)
37	Trasy bazowe i niebazowe	=C9/(C9+0,00001)	=D9/(D9+0,00001)	=E9/(E9+0,00001)	=F9/(F9+0,00001)	=G9/(G9+0,00001)	=H9/(H9+0,00001)	=I9/(I9+0,00001)	=J9/(J9+0,00001)
38		=C10/(C10+0,00001)	=D10/(D10+0,00001)	=E10/(E10+0,00001)	=F10/(F10+0,00001)	=G10/(G10+0,00001)	=H10/(H10+0,00001)	=I10/(I10+0,00001)	=J10/(J10+0,00001)

Rysunek 10.6. Wyznaczenie tras bazowych i niebazowych

Źródło: opracowanie na podstawie (Gaspars-Wieloch, 2011)

Przy użyciu opisanej metody w końcowym etapie mogą być uwzględnione jedynie czasy dotyczące tras bazowych. Formuły do obliczenia całkowitego czasu na trasach bazowych widnieją na rysunku 10.7. i znajdują się w wierszach 43-45.

43		=C36*C30	=D36*D30	=E36*E30	=F36*F30	=G36*G30	=H36*H30	=I36*I30	=J36*J30
44	Całkowity czas na trasach bazowych	=C37*C31	=D37*D31	=E37*E31	=F37*F31	=G37*G31	=H37*H31	=I37*I31	=J37*J31
45		=C38*C32	=D38*D32	=E38*E32	=F38*F32	=G38*G32	=H38*H32	=I38*I32	=J38*J32

Rysunek 10.7. Wyznaczenie całkowitego kosztu na trasach bazowych

Źródło: opracowanie na podstawie (Gaspars-Wieloch, 2011)

Komórki znajdujące się w wierszach 43-45 stanowią kolejne argumenty funkcji {max}, która występuje we wzorze (9). Sama funkcja została zamieszczona w komórce L44.

Rozwiązanie problemu w przedstawianym zadaniu transportowym

Aby uzyskać rozwiązanie optymalne, trzeba jeszcze uzupełnić okno programu Solver (rys. 10.8). W opcjach musi być zaznaczona nieujemność zmiennych, a potem wybrane polecenie „Rozwiąż”, „Przechowaj rozwiązanie” i „Ok”.



Rysunek 10.8. Formuły w oknie programu Solver

Źródło: opracowanie na podstawie (Gaspars-Wieloch, 2011)

Otrzymane rezultaty obliczeń zostały zaprezentowane na rysunku 10.9. Powinno się jednak podchodzić do nich z ostrożnością, ponieważ tworząc arkusz udało się jedynie uniknąć użycia funkcji typu „min{ }”, zaś funkcja „max{ }” nadal została. Należy przyrzeć się więc dokładniej wynikom. Transport wyrobów na trasie, która łączy hurtownię P z sektorem F ma aktualnie najdłuższy czas trwania, tj. 9,8 godzin i potrzebuje obsługi dwóch sklepów ($x_{16} = 2$). Należy więc podjąć próbę znalezienia korzystniejszego zaplanowania dostaw przez dodanie warunku $x_{16} \leq 1$, czyli $H6 \leq 1$. Przyczyni się on do skrócenia czasu przejazdu oraz wyładunku maksymalnie do wartości $9,8 - 0,4 = 9,4$ godz., co w rezultacie będzie korzystniejszym rozwiązaniem.



	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1											
5	Hurtownie i sektory	A	B	C	D	E	F	G	H	Suma w danej hurtowni	Podaż
6	P	0,0	3,0	7,0	2,0	3,0	2,0	0,0	0,0	17	18
7	Z	6,0	1,0	2,0	4,0	0,0	0,0	1,0	1,0	15	18
8	PW	0,0	3,0	0,0	0,0	5,0	3,0	3,0	4,0	18	18
9	Suma w danym sektorze	6	7	9	6	8	5	4	5		
10	Popyt	6	7	9	6	8	5	4	5		
11											
12	Czas przejazdu do sektora	9	6	3	3	6	9	12	7		
13		5	4	5	6	9	12	9	7		
14		8	5	11	5	3	3	4	3		
15											
16	Czas rozładunku	0,33	0,50	0,33	0,40	0,50	0,40	0,25	0,40		
17											
18	Całkowity czas rozładunku	0	1,5	2,31	0,8	1,5	0,8	0	0		
19		1,98	0,5	0,66	1,6	0	0	0,25	0,4		
20		0	1,5	0	0	2,5	1,2	0,75	1,6		
21											
22	Całkowity czas przejazdu (stały) i rozładunku (zmienny)	9	7,5	5,31	3,8	7,5	9,8	12	7		
23		6,98	4,5	5,66	7,6	9	12	9,25	7,4		
24		8	6,5	11	5	5,5	4,2	4,75	4,6		
25											
26	Trasy bazowe i niebazowe	0	1	1	1	1	1	0	0		
27		1	1	1	1	0	0	1	1		
28		0	1	0	0	1	1	1	1		
29											
30	Całkowity czas na trasach bazowych	0,0	7,5	5,3	3,8	7,5	9,8	0,0	0,0		Funkcja celu
31		7,0	4,5	5,7	7,6	0,0	0,0	9,2	7,4		9,8
32		0,0	6,5	0,0	0,0	5,5	4,2	4,7	4,6		

Rysunek 10.9. Pierwsze rozwiązanie zadania optymalizacyjnego

Źródło: (Gaspars-Wieloch, 2011)

Drugi z kolei plan został uwzględniony na rysunku 10.10. W nim warto zawrzeć warunek $x_{28} \leq 2$, czyli $\$/\$9 \leq 2$, ponieważ przyczyni się on wówczas do skrócenia czasu dostawy na trasie Z-H o co najmniej 0,4 godziny (czas rozładowania produktów w sektorze H wyniesie wówczas $8,2 - 0,4 = 7,8$ godz.).

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
4											
5	Hurtownie i sektory	A	B	C	D	E	F	G	H	Suma w danej hurtowni	Podaż
6	P	0,0	3,0	8,0	1,0	3,0	0,0	0,0	1,0	16	18
7	Z	6,0	2,0	1,0	4,0	0,0	0,0	0,0	3,0	16	18
8	PW	0,0	2,0	0,0	1,0	5,0	5,0	4,0	1,0	18	18
9	Suma w danym sektorze	6	7	9	6	8	5	4	5		
10	Popyt	6	7	9	6	8	5	4	5		
11											
29											
30	Całkowity czas na trasach bazowych	0,0	7,5	5,6	3,4	7,5	0,0	0,0	7,4		Funkcja celu
31		7,0	5,0	5,3	7,6	0,0	0,0	0,0	8,2		8,2
32		0,0	6,0	0,0	5,4	5,5	5,0	5,0	3,4		

Rysunek 10.10. Drugie rozwiązanie zadania optymalizacyjnego

Źródło: (Gaspars-Wieloch, 2011)



Trzecie rozwiązanie ilustruje rysunek 10.11. Czas na trasie Z-H faktycznie skrócił się do 7,5 godziny, ale najdłuższy czas odnotowany został na trasie P-E (8 godzin). Można pokusić się o sprawdzenie, czy po dodaniu kryterium $x_{15} \leq 3$, czyli $\$G\$8 \leq 3$ przyczyni się do poprawy wyniku końcowego?

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
4											
5	Hurtownie i sektory	A	B	C	D	E	F	G	H	Suma w danej hurtowni	Podaż
6	P	0,0	2,0	8,0	4,0	4,0	0,0	0,0	0,0	18	18
7	Z	6,0	4,0	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0	2,0	15	18
8	PW	0,0	1,0	0,0	0,0	4,0	5,0	4,0	3,0	17	18
9	Suma w danym sektorze	6	7	9	6	8	5	4	5		
10	Popyt	6	7	9	6	8	5	4	5		
11											
29											
30	Całkowity czas na trasach bazowych	0,0	7,0	5,6	4,6	8,0	0,0	0,0	0,0		Funkcja celu
31		7,0	6,0	5,3	6,8	0,0	0,0	0,0	7,8		8,0
32		0,0	5,5	0,0	0,0	5,0	5,0	5,0	4,2		

Rysunek 10.11. Trzecie rozwiązanie zadania optymalizacyjnego

Źródło: (Gaspars-Wieloch, 2011)

W czwartym rozwiązaniu, pokazanym na rys. 10.12, najdłuższy czas dostawy trwa już jedynie 7,5 godziny. Po wprowadzeniu ograniczeń na trasach, które teraz determinują wartość funkcji celu: $x_{12} \leq 2$, czyli $\$D\$8 \leq 2$ i $x_{15} \leq 2$, czyli $\$G\$8 \leq 2$.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
4											
5	Hurtownie i sektory	A	B	C	D	E	F	G	H	Suma w danej hurtowni	Podaż
6	P	0,0	3,0	4,0	6,0	3,0	0,0	0,0	1,0	17	18
7	Z	6,0	3,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	15	18
8	PW	0,0	1,0	0,0	0,0	5,0	5,0	4,0	3,0	18	18
9	Suma w danym sektorze	6	7	9	6	8	5	4	5		
10	Popyt	6	7	9	6	8	5	4	5		
11											
29											
30	Całkowity czas na trasach bazowych	0,0	7,5	4,3	5,4	7,5	0,0	0,0	7,4		Funkcja celu
31		7,0	5,5	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4		7,5
32		0,0	5,5	0,0	0,0	5,5	5,0	5,0	4,2		

Rysunek 10.12. Czwarte rozwiązanie zadania optymalizacyjnego

Źródło: (Gaspars-Wieloch, 2011)

Na rysunku 10.13. można znaleźć piąte, najbardziej optymalne rozwiązanie. Nawet jeśli zostaną dodane następne ograniczenia, nie wpłyną one już na poprawę czasu dostawy.



	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
4											
5	Hurtownie i sektory	A	B	C	D	E	F	G	H	Suma w danej hurtowni	Podaż
6	P	0,0	2,0	4,0	6,0	2,0	0,0	0,0	1,0	15	18
7	Z	6,0	5,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	17	18
8	PW	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	5,0	4,0	3,0	18	18
9	Suma w danym sektorze	6	7	9	6	8	5	4	5		
10	Popyt	6	7	9	6	8	5	4	5		
11											
29											
30	Całkowity czas na trasach bazowych	0,0	7,0	4,3	5,4	7,0	0,0	0,0	7,4		Funkcja celu
31		7,0	6,5	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4		7,4
32		0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	5,0	5,0	4,2		

Rysunek 10.13. Piąte rozwiązanie zadania optymalizacyjnego

Źródło: (Gaspars-Wieloch, 2013)

Założeniem optymalnego rozwiązania zadania jest czas realizacji najdłuższej dostawy, trwający 7,4 godziny, który zostanie odnotowany na dwóch trasach: P-H oraz Z-H. Do każdego sektora trafią zestawy zgodne ze zgłoszonym popytem. Podaż hurtowni PW będzie maksymalnie zużytkowana. Do zaopatrzenia sieci supermarketów będzie potrzebnych 13 ciężarówek.

Dokonując porównania rezultatów otrzymanych w czwartym oraz piątym rozwiązaniu, można by właściwie zakończyć na zrealizowaniu czwartego wariantu ze względu na niewielką różnicę w czasie ($7,5 - 7,4 = 0,1$ h). Warto podkreślić jest tutaj fakt, iż w czwartym planie, oprócz trochę wydłużonego czasu dostawy, musiałoby być wysłanych aż 14 pojazdów transportujących towar. Uzyskany efekt to oczywiście niejedynie optymalne rozwiązanie. Po przeprowadzeniu różnych symulacji mogą nasunąć się inne wnioski.

Analiza prac naukowych, które były wspomniane we wcześniejszych fragmentach niniejszego artykułu pokazuje, że badania naukowców wykorzystują różne podejścia analityczne do organizacji ruchu towarowego oraz trybów funkcjonowania obiektów, jak również sposoby działania poszczególnych elementów i części systemów logistycznych. Umożliwia to wybór metody, przy pomocy której można dokonać optymalizacji systemu transportowego, będącego niezwykle istotną składową procesów logistycznych w przedsiębiorstwie, wpływającą na rentowność firmy.



Pytania do rozdziału

1. Jakie są główne problemy polityki transportowej związane z optymalizacją systemu transportowego?
2. Jakie są główne cele optymalizacji tras dla przedsiębiorstwa i odbiorców?
3. Co to jest problem komiwożacza (TSP) i jak jest związany z optymalizacją tras?

LITERATURA

Abdulsalam, K., A., Siti, Z., I., (2020). Developing Palm Oil Inventory Control System Using Excel Macro, Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology, vol. 5, 51-55

Cheng, C. i Wu, J., (2020). Intelligent Management and Control of Transportation Hubs Based on Big Data Technology, in Advances in Intelligent Systems and Computing: International Conference on Cyber Security Intelligence and Analytics, Haikou: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.

Codeca, L., Cahill, V., (2022); Using Deep Reinforcement Learning to Coordinate Multi-Modal Journey Planning with Limited Transportation Capacity, SUMO User Conference.

Coyle, J., Bardi, J., Langley, J., (2002) The Management of Business Logistics: A Supply Chain Perspective, South-Western.

De Maio, L. M., Vitetta, A., (2015). Route Choice on Road Transport System: A Fuzzy Approach, Journal of Intelligent i Fuzzy Systems, vol. 28, no. 5, 2015-2027.

Dekhtyaruk, M.T., Shao, M., Yang, S, Kontrobayeva, Z.D., Vashchilina, E. (2021). Automated system of freight traffic optimisation in the interaction of various modes of transport, Periodicals of Engineering and Natural Sciences, Vol. 9, No. 3, September 2021, 844-857

Fialko, N.M., Navrodska, R.O., Gnedash, G.O., Presich, G.O. i Shevchuk, S.I., (2020). Study of Heat Recovery Systems of or Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units, Science and Innovation, vol. 16, no. 3, 43-49.



- Ficoń, K., (2010). Optymalizacja makrosystemów transportowych według kryteriów logistycznych, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej Rok Li Nr 3 (182).
- Gaspars-Wieloch, H. w: Szymczak, M. (red.), (2011). Zastosowanie zagadnienia transportowego z kryterium czasu do optymalizacji zaopatrzenia sieci supermarketów, Difin, Warszawa).
- Gass, S., (2013). An Illustrated Guide to Linnear Programming, Dover Publications.
- Hess, S., Quddus, M., Rieser-Schüssler, N. i Daly, A., (2015). Developing Advanced Route Choice Models for Heavy Goods Vehicles Using GPS Data, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 77, 29-44.
- Khripach, N., Lezhnev, L., Tatarnikov, A., Stukolkin, R. i Skvortsov, A., (2018). Turbo-Generators in Energy Recovery Systems, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, vol. 9, no. 6, 1009-1018.
- Krawczyk, S., (2001). Zarządzanie procesami logistycznymi, PWE, Warszawa.
- Lai, X. i Bierlaire, M., (2015), Specification of the Cross-Nested Logit Model with Sampling of Alternatives for Route Choice Models, Transportation Research Part B: Methodological, vol. 80, 220-234.
- Leonard, W.H., (1997). The Quantitative Approach to Managerial Decisions, Prentice-Hall, New Jersey, 25-29.
- Liu, S., Zhang, G. i Wang, L., (2018). IoT-enabled Dynamic Optimisation for Sustainable Reverse Logistics, Procedia CIRP, vol. 69, 662-667.
- Maleev, R. A., Zuev, S. M., Fironov, A. M., Volchkov, N. A.. i Skvortsov, A. A., (2019). The Starting Processes of a Car Engine Using Capacitive Energy Storages," Periodico Tche Quimica, vol. 16, no. 33, 877-888
- Manley, E., Orr, S. i Cheng, T. A., (2015). A Heuristic Model of Bounded Route Choice in Urban Areas, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 56, 195-209.
- Milewski, D., (2011). Problemy optymalizacji w przewozach przesyłek drobnych, Problemy Transportu i Logistyki, Uniwersytet Szczeciński. Zeszyty naukowe nr 644, Szczecin.



- Navrodska, R., Fialko, N.G. Presich, N.G., Gnedash, G., Alioshko, S. and Shevcuk, S., (2019). Reducing Nitrogen Oxide Emissions in Boilers at Moistening of Blowing Air in Heat Recovery Systems, E3S Web of Conferences, vol. 100, article number 00055.
- Nyrkov, A. P., Sokolov, S. S. i Belousov, A. S., (2015). Algorithmic Support of Optimization of Multicast Data Transmission in Networks with Dynamic Routing, Modern Applied Science, vol. 9, no. 5, 162-176.
- Omelianenko, S., Kondratenko, Y., Kondratenko, G. i Sidenko, I., (2019). Advanced System of Planning and Optimization of Cargo Delivery and Its Iot Application, in Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies," Lviv: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Sanz, F.T., Escobar Gomez, E.N., (2013). The Vehicle Routing Problem with Limited Vehicle Capacities, International Journal for Traffic.
- Shang, X., Yang, K., Wang, W., Zhang, H. i Celic, S., (2020). Stochastic Hierarchical Multimodal Hub Location Problem for Cargo Delivery Systems: Formulation and Algorithm," IEEE Access, vol. 8, 55076-55090.
- Shramenko, N. Y. i Shramenko, V. O., (2019). Optimization of Technological Specifications and Methodology of Estimating the Efficiency of the Bulk Cargo Delivery Process, Scientific Bulletin of National Mining University, vol. 2019, no. 3, 146 151.
- Sikora, W. (red.), (2008). Badania operacyjne, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 57-58.
- Silaen, N.E., Savaluddin, Tulus, (2019), Optimization Model in Logistics Planning and Supply Chain, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1255 (2019).
- Skvortsov, A. A., Pshonkin, D. E. i Luk'yanov, M. N., (2018). Influence of Constant Magnetic Fields on Defect Formation Under Conditions of Heat Shock in Surface Layers of Silicon," Key Engineering Materials, vol. 771, 124-129.
- Stachurski, A., Wierzbicki, A. (2001). Podstawy optymalizacji, Warszawa, PW.
- Sun, F., Dubey, A., White, J. i Gokhale, A., (2019). Transit-Hub: A Smart Public Transportation Decision Support System with Multi-Timescale Analytical Services, Cluster Computing, vol. 22, 2239-2254.



Tomashevskiy, V. N., (2007). Systems Modeling, Kyiv: Publishing Group BHV.

Trzaskalik, T. (red.). Wprowadzenie do badań operacyjnych z komputerem, wyd. II zmienione, PWE, Warszawa, 147-155.

Vakulenko, S. i Evreenova, N., (2019). Transport Hubs as the Basis of Multimodal Passenger Transportation, in Proceedings of the 12th International Conference "Management of Large-Scale System Development," Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Vitetta, A., (2016). A Quantum Utility Model for Route Choice in Transport Systems, Travel Behaviour and Society, vol. 3, 29-37.

Winiczenko, R., (2009). Optymalizacja kosztów transportu metodą bezpośredniego poszukiwania, Postępy techniki przetwórstwa spożywczego 1/2009, 133.

Wong, K.Y.M., SAAD, D., Yeung, C.H., (2016). Distributed Optimization in Transportation and Logistics Networks, IEICE Trans. Commun., vol. E99-B., No.11.

Yahiaoui, A., (2019). Stability Analysis of Following Vehicles on a Highway for Safety of Automated Transportation Systems, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, vol. 17, no. 3, 190-199

Zajdel, M., Filipowicz, B., (2008). Dobór metod optymalizacji dla sieci transportowych, Automatyka tom 12 zeszyt 13, 999.

Zaychenko, Ju. P., (2014). Operations Research, Kyiv: Slovo.

Zhilentov, A. A. Nyrkov, A. P. i Cherniy, S. G., (2015). Evaluation of Reliability and Efficiency of Distributed Systems Rigs, Automation in the Industry, vol. 6, 50-52.

(www_10.1) <http://optifacility.mooncoder.com/site/pl/optymalizacja-transportu>, access 2024.05.30.

(www_10.2) <http://optifacility.mooncoder.com/site/pl/optymalizacja-tras>, access 2024.05.30.