Radosław IDZIKOWSKI, Michał JAROSZCZUK,
Piotr NOWAK, Mariusz UCHROŃSKI
Politechnika Wrocławska

OPTYMALIZACJA KOSZTÓW W TRANSPORCIE MULTIMODALNYM

Streszczenie. W pracy rozpatrywany jest problem transportu multimodalnego pomiędzy zbiorem magazynów przeładunkowych a zbiorem odbiorców końcowych. Do modelu problemu dodano wiele ograniczeń, takich jak pojemność i ładowność pojazdu, liczba dostępnych pojazdów w danym magazynie czy brak możliwości podziału zamówienia. W celu rozwiązania problemu został sformułowany model problemu Programowania Całkowitoliczbowego Mieszanego (MILP), a następnie zaproponowano metaheurystyczny algorytm przeszukiwania z zabronieniami. Wyniki pokazują znaczną poprawę rozwiązania początkowego zarówno dla transportu lokalnego jak i globalnego z wykorzystaniem zaproponowanego algorytmu.

COST OPTIMIZATION IN MULTIMODAL TRANSPORT

Summary. The paper examines the problem of multimodal transport between a set of transshipment depots and a set of final recipients. Many restrictions have been added to the model, such as vehicle and load capacity, the number of vehicles in a given depot, and the inability to divide the order. A Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model and metaheuristic tabu search algorithm were proposed to solve the problem. The results show significant improvement in the initial solution for both local and global transport using the proposed algorithm.

1. Wstęp

Jedną z podstawowych koncepcji Przemysłu 4.0 jest optymalizacja wielokryterialna procesu produkcji, począwszy od dostarczenia komponentów, przez proces produkcyjny sam w sobie, aż po dostarczenie gotowego produktu do konsumenta. Łańcuch ten jest tak skomplikowany, że w celu jego efektywnej optymalizacji często musi być podzielony na poszczególne fragmenty, gdzie część logistyki dostaw produktu do końcowego odbiorcy stanowi osobną część problemu [1]. Dużą rolę odgrywają w nim kwestie ekonomiczne oraz czasowe procesu dostawy, jednak nie mniej ważny jest aspekt ekologiczny, często narzucany przez instytucje rządowe w postaci dodatkowych kosztów transportu. W ostatnim czasie na znaczeniu zyskuje model sprzedaży, w którym konsument ma do dyspozycji gęstą sieć mniejszych sklepów, zamiast rzadko rozmieszczonych dużych marketów. Firmy prowadzące tego typu biznes zazwyczaj posiadają sieć magazynów, pomiędzy którymi dostawa realizowana jest z użyciem środków transportu o większej ładowności. Transport pomiędzy magazynem a sklepem końcowym jest zaś realizowany mniejszymi pojazdami [10]. W niniejszej pracy rozpatrywany jest model dostawy multimodalnej do sieci gęsto rozmieszczonych, niewielkich sklepów znajdującej się na terenie Polski. Przedstawiony zostanie model matematyczny problemu wraz z założonymi ograniczeniami, które mają na celu jego urealnienie. Celem badań będzie sprawdzenie poprawy jakości funkcji celu z wykorzystaniem zaproponowanego algorytmu przeszukiwania z zabronieniami dla transportu międzymagazynowego i lokalnego.

2. Przegląd literatury

Problem dostawy z użyciem wielu rodzajów środków transportu jest problemem, który posiada szeroki zakres praktycznych zastosowań i na temat którego napisano wiele publikacji naukowych. Podobny problem rozwiązywany jest dedykowanym algorytmem programowania dynamicznego w pracy Hao C. i in. [6], na rzeczywistym studium przypadku dla regionu Chin, dla lądowego, kolejowego i wodnego transportu kontenerów. Autorzy biorą pod uwagę ograniczenia pojemności pojazdu oraz kryterium czasowe, jednakże nie uwzględniają ładowności pojazdu. W pracy Real i in. funkcja celu zaproponowana przez autorów jest minimalizowana w celu redukcji kosztów transportu pomiędzy odbiorcami i magazynami z użyciem różnych typów pojazdów. Optymalizacja dokonywana jest z wykorzystaniem metaheurystyk bazujących na podejściu adaptacyjnego przeszukiwania sąsiedztwa (ang. Adaptive Large Nieghbourhood Search, ALNS) [13]. Z kolei problem z odbiorem i dostawą z uwzględnieniem kosztu przeładunku towarów, badany jest przez Bowen i in. [2]. Jest on optymalizowany z użyciem algorytmu genetycznego z wybranymi operatorami krzyżowania i przy uprzednio dostrojonych parametrach. W artykule Moccia i in. [11], problem transportu multimodalnego rozpatrywany jest pod kątem ograniczeń czasowych, takich jak okna dostaw czy uprzednio zaplanowany transport. W nim autorzy skupiają się na wariantach algorytmu generowania kolumn pozwalającym na rozwiązywanie dużych problemów programowania liniowego. Kara za niedostosowanie do okien czasowych brana pod uwagę jest również w artykule Xichun i in. [15], gdzie przedstawiony jest problem transportu drogowo-kolejowego i rozwiązywany zmodyfikowanym algorytmem Clarke-Wright'a. Kwestie ekologiczne transportu multimodalnego są brane pod uwagę w artykule Hrusowsky i in. [7], gdzie jednym ze składników funkcji celu jest model zanieczyszczeń CO_2 danego typu pojazdu a sposobem rozwiązania heurstyczny algorytm hybrydowy.

3. Model matematyczny

Problem optymalizacji transportu multimodalnego rozpatrywany w niniejszej pracy zakłada istnienie $\mathcal{D} = \{1, 2, \ldots, d\}$ zbioru magazynów przeładunkowych będących jednocześnie nadawcami towaru (ang. depot) oraz $\mathcal{R} = \{1, 2, \ldots, r\}$ zbioru odbiorców (ang. recipient). Dodatkowo poprzez $\mathcal{L} = \mathcal{D} \cup \mathcal{R}$ oznaczono łączny zbiór wszystkich lokalizacji. W problemie zdefiniowane są 4 rodzaje dostępnych środków transportu $\mathcal{G} = \{b, t, h, s\}$ - kolejno bus, ciężarówka, mały wagon kolejowy oraz duży wagon kolejowy. Zarówno dla transportu międzymagazynowego jak i lokalnego możliwe jest użycie wyłącznie wybranych typów pojazdów. Z tego powodu wyznaczono $\mathcal{G}_G$ zbiór dostępnych typów pojazdów w transporcie międzymagazynowym oraz $\mathcal{G}_L$ analogicznie dla transportu lokalnego. Oba wspomniane zbiory są podzbiorem $\mathcal{G}$. Każdy magazyn i posiada przypisane dostępne ilości środków transportu $T_i^b, T_i^t, T_i^h, T_i^s$, gdzie $i \in \mathcal{D}$. Pojemność (dopuszczalna liczba palet) każdego z nich jest ograniczona $V_b, V_t, V_h, V_s \in \mathbb{N}^+$. Wprowadzono także ograniczenie na ładowność (dopuszczalna sumaryczna waga) busa, ciężarówki oraz małego i dużego wagonu $W_b, W_t, W_h, W_s \in \mathbb{N}^+$. Dla transportu pomiędzy magazynami zdefiniowano funkcję kosztu $c(i, j, k, \gamma_{i,k,z}))$, która uwzględnia dystans między magazynami i oraz j, a także łączną wagę zamówień przewożonych k-tym rodzajem transportu, opisaną zmienną decyzyjną $\gamma_{i,k,z}$. Dla transportu z magazynów do odbiorców końcowych, niezależnie od wagi przewożonego ładunku, zdefiniowano trójwymiarową macierz $C_{a,b,k}$, gdzie $a, b \in \mathcal{L}$ oraz $k \in \mathcal{G}_L$. Na początku problemu zdefiniowany jest zbiór zamówień $\mathcal{O} = \{1, 2, \ldots, o\}$. Każde zamówienie składa się z ustandaryzowanych palet i posiada swoją wielkość (liczbę palet) $v_e \in (0, v_{max})$, wagę $w_e \in (0, w_{max})$ oraz miejsce dostarczenia m_e, gdzie $v_e, w_e \in \mathbb{N}^+$ i $e \in \mathcal{O}$. Zamówienia są niepodzielne, znane i dostępne na początku rozwiązywania problemu. Dodatkowo została zdefiniowana funkcja $d(e)$, która zwraca magazyn przejściowy dla zamówienia e. Celem niniejszej pracy jest minimalizacja funkcji kosztów uwzględniającej następujące czynniki:

1. Koszt transportu pomiędzy wszystkimi parami magazynów i, j, z uwzględnieniem rodzaju środka transportu k, konkretnego pojazdu z pokonującego daną trasę oraz łącznej wagi zamówień $\gamma_{i,k,z}$ przewożonych danym pojazdem. Transport zamówienia jest wykonywany bezpośrednio pomiędzy magazynami - niedopuszczalna jest sytuacja, że zamówienie jest transportowane przez inny magazyn;
2. Koszt transportu pomiędzy wszystkimi lokalizacjami a, b dla każdego magazynu i z którego wyruszył pojazd, z uwzględnieniem rodzaju środka transportu k, oraz konkretnego pojazdu z wykorzystanego w transporcie.

Minimalizowany model kosztowy opisanego problemu, przedstawia się następująco:

$$\min \sum_{i \in \mathcal{D}} \left(\sum_{j \in \mathcal{D}} \sum_{k \in \mathcal{G}_G} \sum_{z=1}^{T_i^k} (x_{i,j,k,z} c(i, j, k, \gamma_{i,k,z})) + \sum_{a \in \mathcal{L}} \sum_{b \in \mathcal{L}} \sum_{k \in \mathcal{G}_L} \sum_{z=1}^{T_i^k} (y_{i,a,b,k,z} C_{a,b,k}) \right), \quad (1)$$

przy poniżej zdefiniowanych ograniczeniach:

$$\sum_{e\in\mathcal{O}} v_e\alpha_{e,i,k,z} \leqslant V_k \qquad \forall i\in\mathcal{D}, k\in\mathcal{G}_G, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{2}$$

$$\sum_{e\in\mathcal{O}} v_e\beta_{e,i,k,z} \leqslant V_k \qquad \forall i\in\mathcal{D}, k\in\mathcal{G}_L, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{3}$$

$$\gamma_{i,k,z} = \sum_{e\in\mathcal{O}} w_e\alpha_{e,i,k,z} \qquad \forall i\in\mathcal{D}, k\in\mathcal{G}_G, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{4}$$

$$\gamma_{i,k,z} \leqslant W_k \qquad \forall i\in\mathcal{D}, k\in\mathcal{G}_G, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{5}$$

$$\sum_{e\in\mathcal{O}} w_e\beta_{e,i,k,z} \leqslant W_k \qquad \forall i\in\mathcal{D}, k\in\mathcal{G}_L, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{6}$$

$$\sum_{i\in\mathcal{D}}\sum_{k\in\mathcal{G}_G}\sum_{z=1}^{T_i^k} \alpha_{e,i,k,z} = 1 \qquad \forall e\in\mathcal{O}, \tag{7}$$

$$\alpha_{e,i,k,z} = x_{i,d(e),k,z} \qquad \forall e\in\mathcal{O}, i\in\mathcal{D}, k\in\mathcal{G}_G, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{8}$$

$$\sum_{j\in\mathcal{D}} x_{i,j,k,z} = 1 \qquad \forall i\in\mathcal{D}, k\in\mathcal{G}_G, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{9}$$

$$\sum_{i\in\mathcal{D}}\sum_{k\in\mathcal{G}_L}\sum_{z=1}^{T_i^k} \beta_{e,i,k,z} = 1 \qquad \forall e\in\mathcal{O}, \tag{10}$$

$$\mathcal{L}_{i,k,z} = \{m_e : e\in\mathcal{O}\wedge\alpha_{e,i,k,z}=1\} \qquad \forall i\in\mathcal{D}, k\in\mathcal{G}_L, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{11}$$

$$\sum_{a\in\mathcal{J}}\sum_{b\in\mathcal{L}_{i,k,z}\setminus\mathcal{J}} y_{i,a,b,k,z} \geqslant 2 \qquad \forall\mathcal{J}\subseteq\mathcal{L}_{i,k,z}, i\in\mathcal{D}, k\in\mathcal{G}_L, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{12}$$

$$\alpha_{e,i,k,z}\in\{0,1\} \qquad \forall e\in\mathcal{O}, k\in\mathcal{G}_G, i\in\mathcal{D}, \forall z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{13}$$

$$\beta_{e,i,k,z}\in\{0,1\} \qquad \forall e\in\mathcal{O}, k\in\mathcal{G}_G, i\in\mathcal{D}, \forall z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{14}$$

$$x_{i,j,k,z}\in\{0,1\} \qquad \forall k\in\mathcal{G}_G, i,j\in\mathcal{D}, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{15}$$

$$y_{i,a,b,k,z}\in\{0,1\} \qquad \forall k\in\mathcal{G}_L, i,\in\mathcal{D}, a,b\in\mathcal{L}, z\in\{1,\dots,T_i^k\}, \tag{16}$$

Ograniczenia (2) oraz (3) zapewniają, że suma zamówień rozwożonych danym środkiem transportu, odpowiednio dla transportu pomiędzy magazynami i lokalnego, nie przekroczy jego pojemności. Analogicznie wprowadzono ograniczenia (5) oraz (6) z tą różnicą, że dla transportu międzymagazynowego dodano zmienną decyzyjną $\gamma_{i,k,z}$ (4), która jest łączną wagą przewożonych zamówień z i-tego magazynu z-tym pojazdem k-tego typu. Zmienna ta została wprowadzona, ze względu na jej wykorzystanie w funkcji celu, gdzie koszt przejazdu między magazynami jest zależny jednocześnie od odległości i wagi przewożonych zamówień. Ograniczenia (7) oraz (10) gwarantują, że każde zamówienie zostanie przypisane dokładnie do jednego pojazdu odpowiednio podczas transportu międzymagazynowego oraz lokalnego. W kontekście dostawy między magazynami ograniczenie (8) zapewnia, że zamówienia trafią do odpowiednich magazynów, a (9) zagwarantuje, że wszystkie zamówienia jadące tym samym pojazdem trafią do tego samego magazynu. W przypadku transportu lokalnego, w celu zachowania ciągłości trasy, wprowadzono ograniczenia (11) oraz (12). W modelu użyto także binarnych zmiennych decyzyjnych. Zmienna (15) odpowiada za to, iż pojazd z o typie k porusza się pomiędzy magazynami i i j. Zmienna (16) stanowi, iż pojazd z wyjeżdżający z i-tego magazynu o typie k porusza się pomiędzy lokalizacjami a i b. Wreszcie zmienna (13) mówi, że zamówienie e przewożone jest pojazdem z o typie k, przypisanym do magazynu i dla transportu międzymagazynowego oraz analogicznie (14) dla lokalnego.

4. Metody rozwiązywania

Opisywany w pracy problem został zdekomponowany na problem przydziału zamówień do środków transportu dla przewozu pomiędzy magazynami oraz na problem CWVRP (ang. *Capacity and Weight constrained Vehicle Routing Problem*) dla transportu lokalnego, gdzie do zapisu użyto reprezentacji wielkiej trasy (ang. *Giant Tour Representation*) [3]. Napisane zostały funkcje pozwalające sprawdzić, czy wykonanie wygenerowanego przez algorytm ruchu jest możliwe w przestrzeni dopuszczalnych rozwiązań, tzn. czy łączna wielkość oraz waga zamówień w poszczególnych pojazdach nie przekracza ograniczeń nałożonych na pojazdy. Zamówienia przydzielane są do magazynów celem przetransportowania ich lokalnie na podstawie kryterium odległości odbiorcy od magazynu.

4.1. Generacja rozwiązania początkowego

Do optymalizacji za pomocą algorytmów metaheurystycznych wymagane jest rozwiązanie początkowe, którego konstrukcja rozdzielona została na dwie fazy. Generacja dla transportu międzymagazynowego, czyli problemu przydziału, polega na dodawaniu zamówień do pojazdów do momentu ich wypełnienia. Zamówienia przydzielane są w kolejności odpowiadającej ich numerowi identyfikacyjnemu, do największego dostępnego środka transportu (duży wagon). Jeśli liczba dostępnych pojazdów danego typu skończy się, wówczas brany pod uwagę jest typ o mniejszej pojemności/ładowności.

Dla transportu lokalnego z kolei, zastosowano algorytm zachłanny, bazujący na algorytmie najbliższego sąsiada [9]. Jego zasada działania polega na odwiedzaniu odbiorcy znajdującego się najbliżej aktualnie odwiedzanego. W przypadku, gdy zamówienie transportowane do kolejnego adresata nie mieści się w pojeździe aktualnie rozważanym, przydzielany jest kolejny pojazd. Jednocześnie sprawdzana jest możliwość zmiany typu pojazdu poprzedniego na mniejszy w celu obniżenia kosztów transportu.

4.2. Metaheurystyczny algorytm przeszukiwania z zabronieniami

Jedną z zaproponowanych metod rozwiązania jest algorytm przeszukiwania z zabronieniami (ang. *Tabu Search*) zaproponowany przez Glovera [4]. Algorytm wybiera najlepsze dostępne rozwiązanie z sąsiedztwa obecnego rozwiązania, jednocześnie zapisując je do listy ruchów zabronionych. W rozpatrywanym problemie dodatkowo sprawdzane jest, czy dany ruch jest dopuszczalny w zadanych ograniczeniach pojazdu. Jeśli ruch nie jest dopuszczalny, to zmieniany jest typ pojazdu, tak aby umożliwić wykonanie ruchu. Zmiana wykonywana jest tylko w przypadku gdy dostępny jest większy pojazd, odpowiednio dla zbiorów $\mathcal{G}_G$ oraz $\mathcal{G}_L$. Sprawdzane jest również czy pojazd może być zmniejszony, celem redukcji kosztu transportu. Najlepsze dopuszczalne rozwiązanie z sąsiedztwa rozwiązania obecnego zapisywane jest jako ruch zabroniony (tabu), dzięki czemu możliwe jest obszerniejsze przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań. Czas (liczbę iteracji), przez jaki rozwiązanie pozostaje zabronione, definiuje parametr zwany kadencją. W rozpatrywanym problemie, algorytm przeszukiwania z zabronieniami jest wywoływany niezależnie dla każdego z magazynów, zarówno dla permutacji transportu lokalnego, jak i dla transportu globalnego sprowadzonego do problemu przydziału.

5. Eksperymenty obliczeniowe

Celem przeprowadzenia eksperymentów było przetestowanie działającego modelu oraz poprawa rozwiązania z wykorzystaniem zaproponowanej metaheurystyki, względem rozwiązania początkowego. W tym celu zostało wygenerowane po 10 instancji testowych dla ziaren generatora będących liczbami naturalnymi z przedziału $< 1, 10 >$, a uzyskane wyniki uśredniono. Instancje zostały wygenerowane dla każdego z zestawów parametrów $(d \times r \times o)$: $5 \times 5 \times 10$, $5 \times 10 \times 50$, $10 \times 10 \times 100$, $20 \times 20 \times 200$, gdzie d – liczba magazynów, r – liczba odbiorców końcowych oraz o – liczba zamówień. Niektóre parametry, podane poniżej wygenerowano losowo z rozkładem jednostajnym dla typu całkowitoliczbowego:

- waga zamówienia $w \in (1, 1500)$,
- wielkość zamówienia $v \in (1, 12)$,
- źródło zamówienia $i \in (1, h)$, gdzie h - liczba magazynów,
- odbiorca zamówienia $r \in (1, r)$, gdzie r - liczba odbiorców,
- współrzędne magazynów i odbiorców $x, y \in (1, 100)$,
- liczba pojazdów w hubie $T_i^b, T_i^t, T_i^h, T_i^s \in (10, 30)$.

Koszty transportu z użyciem busa i ciężarówki zostały obliczone na podstawie odległości pomiędzy punktami z uwzględnieniem kosztów paliwa, średniej stawki godzinowej kierowcy i kosztów stałych. Koszty transportu kolejowego obliczono na podstawie cenników `PKP Cargo` [12]. Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem serwera klasy NVIDIA DGX A100, wyposażonego w procesor AMD EPYC 7742 3,2 GHz z 64 fizycznymi rdzeniami, 512 GB pamięci RAM oraz pracującym pod systemem Ubuntu 20.04.5 LTS. Wszystkie algorytmy zostały napisane z użyciem języka `Python 3.12`. Jako miarę jakości przyjęto procentowe odchylenie standardowe (*ang. percentage relative deviation, PRD*) określone wzorem (17).

$$PRD(\pi^*) = \frac{IS - F(\pi^*)}{IS} * 100\%, \tag{17}$$

gdzie $F(\pi^*)$ to wartość funkcji celu najlepszego rozwiązana π^* zwróconego w danym uruchomieniu badanego algorytmu dla konkretnej instancji a IS to wartość funkcji celu dla rozwiązania referencyjnego przedstawionego w rozdziale 4.1. Wyniki pokazujące procent poprawy jakości z wykorzystaniem algorytmu przeszukiwania z zabronieniami, w stosunku do rozwiązania początkowego, przedstawiono w tabeli 1. Wyniki zostały rozdzielone na transport międzymagazynowy (PRD_{global}) i lokalny (PRD_{local}), ze względu na ich niezależną optymalizację oraz przedstawione całościowo. Algorytm przeszukiwania z zabronieniami został uruchomiony z parametrami: liczba iteracji $it = 250$ i długość listy tabu $tabu\_list = 9$. Można zauważyć, że dla transportu globalnego poprawa funkcji celu jest większa niż dla transportu lokalnego. Wynika to z faktu, że rozwiązaniem początkowym dla transportu lokalnego było zaproponowane podejście zachłanne bazujące na algorytmie najbliższego sąsiada. Gdyby jako rozwiązanie referencyjne zaproponować podobne podejście jak dla transportu miedzymagazynowego, poprawa jakości byłaby dużo bardziej znacząca. Z kolei dla transportu pomiędzy magazynami poprawa ta ograniczała się jedynie do optymalnego przydziału zamówień do pojazdów, stąd niewielki zakres ruchów umożliwiających lepsze rozwiązanie. Widać, że gdy jest większa liczba tych ruchów (instancja o parametrach $5 \times 10 \times 50$), poprawa wynosi $PRD_{global} = 11,37\%$. Sumarycznie jednak, zarówno dla transportu międzymagazynowego jak i transportu lokalnego zastosowanie algorytmu przeszukiwania z zabronieniami pozwoliło na poprawę rozwiązań początkowych, opisanych w rozdziale 4.1. Dla instancji testowych o większych rozmiarach jakość uzyskanych rozwiązań ulega pogorszeniu wraz ze wzrostem rozmiaru problemu co związane jest ze wzrostem złożoności rozwiązywanego problemu i stałymi parametrami algorytmu przeszukiwania z zabronieniami, niezależnie od wielkości instancji.

Tabela 1

Wpływ algorytmu przeszukiwania z zabronieniami
na poprawę jakości rozwiązania początkowego

d	**r**	**o**	PRD_{global} [%]	PRD_{local} [%]	PRD_{total} [%]
5	5	10	1,21	4,01	2,61
5	10	50	11,37	0,96	6,16
10	10	100	4,72	0,34	2,53
20	20	200	2,37	0,34	1,36

6. Podsumowanie

W niniejszej pracy zaproponowano model matematyczny rzeczywistego problemu multimodalnego CWVRP (*ang. Capacity and Weight constrained Vehicle Routing Problem*). W modelu sformułowano ograniczenia mające na celu lepsze odzwierciedlenie rzeczywistego przypadku biznesowego badanego problemu. Zaimplementowano funkcję celu oraz funkcję generującą rozwiązanie początkowe, będące jednocześnie rozwiązaniem referencyjnym. Do rozwiązania problemu dostosowany został algorytm przeszukiwania z zabronieniami, a wyniki uzyskane z jego użyciem porównane z rozwiązaniem początkowym. W przyszłości problem może być rozwijany do problemu marszrutyzacji z dostawą i odbiorem zamówień (*ang. Pick-Up and Delivery*) oraz umożliwiającego podział zamówień (*ang. Partial Delivery*). Takie podejście lepiej odwzorowuje rzeczywisty problem, ale zarazem komplikuje model matematyczny. Planowane jest również zaproponowanie innych algorytmów metaheurystycznych, zrównoleglenie obecnie zaimplementowanego algorytmu oraz porównanie uzyskanych rezultatów z tymi uzyskanymi z użyciem solvera matematycznego.

LITERATURA

1. Asdecker B., Felch V.: Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains. Journal of Modelling in Management, 2018, p. 840-883.

2. Boven L. and Bin Y. and Xiaolin Z.: Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport. Computers & Industrial Engineering, 2019.

3. Funke B, Grunert T, Irnich S.: Local search for vehicle routing and scheduling problems: review and conceptual integration. Journal of Heuristics, 2005, p. 267–306.

4. Glover F.: Tabu search Part I. ORSA Journal on Computing 1, 1989.

5. Gocmen E., Erol R.: The Problem of Sustainable Intermodal Transportation: A Case Study of an International Logistics Company. MDPI, 2018.

6. Hao C., Yue Y.: Optimization on Combination of Transport Routes and Modes on Dynamic Programming for a Container Multimodal Transport System. Procedia Engineering, 2016, vol. 137, p. 382–390.

7. Hrusowsky M., Demir E., Jammernegg W., Woensel T.: Hybrid simulation and optimization approach for green intermodal transportation problem with travel time uncertainty. Springer, 2016.

8. Infante D., Paletta G., Vocaturo F.: A ship-truck intermodal transportation problem. Maritime Economics & Logistics, 2009.

9. Kizilateş G. and Nuriyeva F.: On the Nearest Neighbor Algorithms for the Traveling Salesman Problem. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2013.

10. Kucharska B.: Bliskość sklepów wygodnego zakupu wobec klienta. Zeszyty naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, 2016, p. 57–60.

11. Moccia L., Cordeau J-F., Laporte G., Ropke S., Valentini M.: Modeling and Solving a Multimodal Transportation Problem with Flexible-time and Scheduled Services. Networks, 2011.

12. PKP Cargo S.A.: Taryfa towarowa PKP Cargo S.A. od 1 stycznia 2024 r., `https://www.pkpcargo.com/strefa-klienta/przepisy/?f=taryfa-towarowa-pkp-cargo-s-a-pl`, 2024.

13. Real L.B. and Conteras I. and Cordeau J.-F.: Multimodal hub network design with flexible routes. Transportation Research Part E 146, 2021.

14. Ustundag A., Cevikcan E.: Industry 4.0: Managing The Digital Transformation. Springer Series in Advanced Manufacturing, 2018, p. 440–445.

15. Xichun C. and Huimin N.: Modeling Vehicle Routing Problem with Pick-Up Time Constraint for Multimodal Transportation. ICTE, 2011.