

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA
INŻYNIERIA LĄDOWA, GEODEZJA I TRANSPORT
DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Katarzyna Jóźwiak

**Metoda wspomagania doboru pojazdów do zadań
transportowych**

Promotor

dr hab. Jolanta Żak, prof. uczelni

Promotor pomocniczy

dr inż. Tomasz R. Waśniewski

WARSZAWA 2024

Podziękowania

Promotorowi dr hab. Jolancie Żak, prof. uczelni,

za udzielone wsparcie, nieocenioną pomoc, wyrozumiałość, cierpliwość, ciągłą mobilizację do pracy i osobiste zaangażowanie.

Promotorowi pomocniczemu dr. inż. Tomaszowi R. Waśniewskiemu,

za opiekę merytoryczną, cenne uwagi i osobiste zaangażowanie.

Mężowi,

za motywację, cierpliwość i nieustające wsparcie.

STRESZCZENIE

Metoda wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych

Rozprawa poświęcona jest problematyce wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych z wykorzystaniem wymagań ładunku, z uwzględnieniem zmiany wolumenów w obsługiwanych magazynach i punktach odbioru. Celem pracy jest opracowanie metody wielokryterialnego wspomagania decyzji w zakresie racjonalnego doboru pojazdów do zadań transportowych. Na potrzeby rozprawy opracowano projekt sieci neuronowej wykorzystany do prognozy popytu i model matematyczny. Zaimplementowano go w postaci modelu symulacyjnego w programie komputerowym. Zaproponowana metoda może posłużyć jako wzbogacenie narzędzi optymalizacyjnych wyznaczających dobór pojazdów do zadań, liczbę i typ pojazdów, a także wyznaczyć trasę tych pojazdów. Ponadto, niweluje możliwość popełnienia błędu przez pracownika, a także w zasadniczy sposób skraca czas doboru pojazdów do zadań i wyznaczenia trasy jazdy pojazdów.

Układ treści rozprawy wynika z przyjętego celu i problemów badawczych. W rozdziale pierwszym zidentyfikowano obszar badawczy pracy. W rozdziale drugim zaprezentowano wprowadzenie do modelowania i ogólne sformułowanie problemu doboru pojazdów do zadań transportowych oraz określono cel, tezę i zakres pracy, a także opisano metodykę badań. W rozdziale trzecim opracowano model matematyczny metody doboru pojazdów do zadań transportowych formułując: dane wejściowe i odpowiednio je parametryzując, opis struktury sieci transportowej, opis zapotrzebowania na przewozy, tryb realizacji i przydziału zadań transportowych, zmienne decyzyjne, ograniczenia i kryteria oceny. Rozdział czwarty opisuje autorską metodę wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych oraz sformułowanie algorytmu jej działania. Prezentuje również modelowanie neuronowe prognozy popytu w programie komputerowym Statistica oraz opisuje implementację metody w postaci autorskiego rozwiązania przy wykorzystaniu programu komputerowego FlexSim. Rozdział piąty przedstawia weryfikację komputerową opracowanej metody. W tym celu przeprowadzono analizę studiów przypadku, dla których poprawność wyników została oceniona przez Autorkę.

W podsumowaniu zawarto wnioski wyciągnięte na podstawie uzyskanych wyników badań oraz przeprowadzono analizę stopnia realizacji celów pracy.

Słowa kluczowe:

dobór pojazdów do zadań, modelowanie matematyczne, sieci neuronowe, wyznaczanie trasy przejazdu, wspomaganie komputerowe.

ABSTRACT

Method of supporting the selection of vehicles for transport tasks

The dissertation is devoted to the issue of supporting the selection of vehicles for transport tasks using cargo requirements, taking into account changes in volumes in serviced warehouses and collection points. The aim of the work is to develop a method to support the selection of vehicles for transport tasks by determining the demand forecast and vehicle driving routes while selecting the types and minimizing the number of selected vehicle types. For the needs of the dissertation, a neural network design used for demand forecasting and a mathematical model were developed. It was implemented in the form of a simulation model in a computer program. The proposed method can be used to enrich optimization tools determining the selection of vehicles for tasks, the number and type of vehicles, as well as determining the route of these vehicles. Moreover, it eliminates the possibility of an employee making a mistake and significantly shortens the time needed to select vehicles for tasks and determine vehicle routes.

The arrangement of the content of the dissertation results from the adopted goal and research problems. The first chapter identified the research area of the work. The second chapter presents an introduction to modelling and a general formulation of the problem of selecting vehicles for transport tasks, defines the purpose, thesis and scope of the work, and describes the research methodology. In the third chapter, a mathematical model was developed for the method of selecting vehicles for transport tasks, formulating: input data and parameterizing them appropriately, description of the structure of the transport network, description of transport demand, mode of implementation and allocation of transport tasks, decision variables, limitations and evaluation criteria. The fourth chapter describes the author's method of supporting the selection of vehicles for transport tasks and the formulation of its operation algorithm. Chapter five presents computer verification of the developed method. For this purpose, an analysis of case studies was carried out, for which the correctness of the results was assessed by the Author.

The summary includes conclusions drawn on the basis of the obtained research results and an analysis of the degree of achievement of the work's objectives.

Keywords:

selection of vehicles for tasks, mathematical modelling, neural networks, route determination, computer support.

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	9
WSTĘP	11
1. IDENTYFIKACJA OBSZARU BADAWCZEGO	15
1.1. Transport drogowy towarów – analiza stanu obecnego.....	15
1.2. Organizacja przewozów – założenia ogólne	24
1.2.1 Pojęcia podstawowe.....	24
1.2.2 Uwarunkowania przydziału wykonawców do zadań.....	30
1.3. Problematyka wyznaczania tras pojazdów	35
1.4. Sieci neuronowe w logistyce.....	43
2. OGÓLNE SFORMUŁOWANIE PROBLEMU DOBORU POJAZDÓW DO ZADAŃ TRANSPORTOWYCH.....	49
2.1. Wprowadzenie do modelowania	49
2.2. Ogólne sformułowanie problemu doboru pojazdów do zadań transportowych	53
2.2.1 Klasyfikacja problemu doboru pojazdów do zadań transportowych.....	53
2.2.2 Modele z przydziałem jednego zadania do jednego wykonawcy	55
2.2.3 Modele z przydziałem jednego zadania do wielu wykonawców.....	63
2.2.4 Modele z przydziałem wielowymiarowym	65
2.3. Cel i zakres pracy oraz teza.....	68
3. MODEL MATEMATYCZNY DOBORU POJAZDÓW DO ZADAŃ TRANSPORTOWYCH	73
3.1. Założenia do modelowania	73
3.2. Modelowanie matematyczne doboru pojazdów do zadań transportowych	75
3.2.1 Identyfikacja danych wejściowych i parametryzacja elementów	75
3.2.2 Opis struktury sieci drogowej	76
3.2.3 Charakterystyki elementów struktury sieci drogowej oraz środków transportu	78
3.2.4 Opis zapotrzebowania na przewozy	82

3.2.5	Opis trybu realizacji i przydziału zadań transportowych	85
3.2.6	Zmienne decyzyjne	86
3.2.7	Ograniczenia	87
3.2.8	Kryteria oceny/funkcja celu.....	92
4.	METODA WSPOMAGANIA DOBORU POJAZDÓW DO ZADAŃ	
	TRANSPORTOWYCH	94
4.1.	Założenia metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych.....	94
4.2.	Modelowanie neuronowe prognozy popytu.....	98
4.3.	Opis programu FlexSim	103
4.4.	Implementacja Metody Wspomagania Doboru Pojazdów do Zadań Transportowych (MWDPZT) w programie FlexSim.....	105
5.	WERYFIKACJA METODY DOBORU POJAZDÓW DO ZADAŃ	
	TRANSPORTOWYCH NA DANYCH RZECZYWISTYCH	114
5.1.	Charakterystyka przedsiębiorstwa	114
5.2.	Dobór pojazdów do zadań transportowych z wykorzystaniem autorskiej metody – weryfikacja na danych rzeczywistych.....	115
5.3.	Weryfikacja doboru typu i liczby pojazdów do zadania transportowego nr 1.....	123
5.4.	Weryfikacja doboru typu i liczby pojazdów do zadania transportowego nr 2.....	127
5.5.	Podsumowanie weryfikacji metody	129
	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	134
	LITERATURA	138
	SPIS RYSUNKÓW	152
	SPIS WYKRESÓW.....	154
	SPIS TABEL	155

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

B	- rodzaj obsługi zadań
$\beta 1(z(nl,ol))$	- przyporządkowanie zadania transportowego o numerze z do relacji przewozu (nl,ol)
$\beta 2(z,m)$	- przyporządkowanie zadania transportowego o numerze z do rodzaju ładunku m
$\beta 3(s,m)$	- przyporządkowanie ładunku typu m do typu środka transportowego s
$d^{p,nl,ol}$	- droga w grafie V o numerze p w relacji (nl,ol)
$dk1(nl)$	- liczba doków przeładunkowych u nl -tego dostawcy
$dk2(ol)$	- liczba doków przeładunkowych u ol -tego odbiorcy
h	- tryb obsługi zadań
K_{max}	- maksymalny koszt wykonania wszystkich zadań
$K_{max}(nl)$	- maksymalny koszt wykonania wszystkich zadań nadawcy nl
$k(m,s)$	- koszt jednostkowy przejazdu środkiem transportowym typu s z ładunkiem typu m
LP	- zbiór bezpośrednich połączeń drogowych $LP = \{(v, v') : \beta(v, v') = 1, \text{ dla } v, v' \in V \wedge v \neq v'\}$
$lv(nl,s)$	- liczba pojazdów typu s znajdujących się u nl -tego nadawcy
$l(v, v')$	- długości połączenia drogowego (v, v')
m	- numer rodzajów przewożonych ładunków: $M = \{m : m = 1, \dots, m', \dots, M\}$
nl	- numer węzła w grafie V będącego punktem nadania $NL = \{v \equiv nl : \alpha(v) = 1, \text{ dla } v \in V\}$
ol	- numer węzła w grafie V będącego punktem odbioru $OL = \{v \equiv ol : \alpha(v) = 2, \text{ dla } v \in V\}$
$\pi(s, u)$	- pojemność środka transportowego typu s
s	- numer rodzaju stosowanych do przewozu środków transportowych $S = \{s : s = 1, \dots, s', \dots, S\}$
T	- zbiór numerów okresów czasu $T = \{t : t = 1, \dots, t', \dots, T\}$
$t1(nl,s,m)$	- czas załadunku ładunku rodzaju m na pojazd typu s u nl -tego nadawcy
$t2(ol,s,m)$	- czas rozładunku ładunku rodzaju m z pojazdu typu s u ol -tego odbiorcy

$tp1(nl)$	-	czas rozpoczęcia pracy w miejscowości nl
$tp2(ol)$	-	czas rozpoczęcia pracy w miejscowości ol
$tk1(nl)$	-	czas zakończenia pracy w miejscowości nl
$tk2(ol)$	-	czas zakończenia pracy w miejscowości ol
$tw(z, nl)$	-	zmienna decyzyjna czasu, w którym rozpoczęto wykonanie zadania z .
u	-	numer jednostki ładunku $U = \{u: u=1,2,\dots,U\}$
$Q(z, (nl, ol), m, u)$	-	wielkość przewozu ładunku typu m w zadaniu o numerze z w jednostkach u
$Q(z, (nl, ol), m)$	-	tonaż przewozu ładunku typu m w zadaniu o numerze z
w	-	numer wężła w grafie V będącego punktem nadania $W = \{v \equiv w : \alpha(v) = 3, \text{ dla } v \in V\}$
V	-	numer wężła w grafie V
$v_{max}(t, (v, v'), m, s)$	-	prędkość maksymalna przejazdu środków transportowych typu s z ładunkiem typu m przez połączenie transportowe (v, v')
$vp(t, (v, v'), m, s)$	-	prędkość przejazdu środków transportowych typu s z ładunkiem typu m , w przedziale czasu t przez połączenie transportowe (v, v')
$x1(nl, s, k, z)$	-	zmienna decyzyjna przydziału pojazdów do zadań
$x2((v, v'), z, s, k)$	-	zmienna decyzyjna przyporządkowania łuku (v, v') do trasy k -tego pojazdu s -tego typu wykonującego zadanie z
$y1(h, z, z')$	-	zmienna decyzyjna wyboru trybu obsługi
$y2(b, z)$	-	zmienna decyzyjna zastosowania rodzaju obsługi
$\gamma((v, v'), s)$	-	przyporządkowanie środków transportowych do połączeń
z	-	numer zadania transportowego $Z = \{z: z=1,2,\dots,Z\}$
$\{t1(nl, s, m, u), p(t1(nl, s, m, u))\}$	-	rozkład zmiennej losowej o interpretacji czasu załadunku jednostki ładunku rodzaju m na pojazd typu s w miejscowości nl
$\{t2(ol, s, m, u), p(t2(ol, s, m, u))\}$	-	rozkład zmiennej losowej o interpretacji czasu wyładunku jednostki ładunku rodzaju m na pojazd typu s w miejscowości ol
$\{vp(t, (v, v'), m, s), p(vp(t, (v, v'), m, s))\}$	-	rozkład prędkości przejazdu środków transportowych typu s z ładunkiem typu m przez połączenie transportowe (v, v')
(v, v')	-	odwzorowanie powiązań między poszczególnymi wierzchołkami jeżeli $\beta(v, v')=1$, wtedy między wierzchołkami $v, v', (v, v' \in V)$ oraz $v \neq v'$ istnieje bezpośrednie połączenie drogowe, w przeciwnym przypadku $\beta(v, v')=0$.

WSTĘP

Dynamicznie rosnąca liczba przedsiębiorstw z branży TSL (transport-logistyka-spedycja) i magazynowania przyczynia się do wzrostu konkurencji w tym segmencie. Poszukuje się nowych rozwiązań, narzędzi informatycznych, bazujących m.in. na algorytmach sztucznej inteligencji, których celem jest optymalizacja funkcjonowania przedsiębiorstw. Wyścig technologiczny widoczny jest również w rozwoju urządzeń technicznych, wyposażeniu pojazdów i budynków, którego celem jest osiągnięcie maksymalnej efektywności oraz wydajności posiadanych zasobów. Dodatkowo należy mieć na uwadze nieprzewidziane obostrzenia i dodatkowe ograniczenia związane ze światową pandemią wywołaną wirusem SARS-COV-2. Wymienione aspekty powodują, iż rozwiązane do tej pory problemy optymalizacyjne przedsiębiorstw analizowane są ponownie z uwzględnieniem dodatkowych wymagań, współczesnych możliwości technologicznych i zmiennego otoczenia przedsiębiorstw. Dotyczy to również zagadnienia doboru pojazdów do zadań transportowych, w tym w przedsiębiorstwach transportowo-logistycznych, przed którymi stawiane są wyzwania, dotyczące: specyfiki przewozu poszerzonej o różne dostępne typy pojazdów czy ładunków, pakietu mobilności, regulacji klimatycznych i niedoboru kierowców.

Przedmiotem rozważań naukowych prowadzonych w rozprawie jest problematyka doboru pojazdów do zadań transportowych. Problem ten jest zagadnieniem złożonym, biorąc pod uwagę, iż w tym samym czasie należy uwzględnić wiele aspektów, np.: rodzaj i liczbę zadań transportowych oraz dostępnych pojazdów, czas pracy kierowcy, ograniczenia prawne przewozu ładunków, czy też różną lokalizację punktów załadunkowych i wyładunkowych z uwzględnieniem parametrów tych punktów oraz niestabilność popytu.

Aby skutecznie rozwiązać problem doboru pojazdów do zadań niezbędna jest wiedza z takich obszarów, jak: prognozowanie, modelowanie matematyczne, teoria optymalizacji, znajomość uregulowań prawnych segmentu transportowego, w tym przewozu ładunków. W treści rozprawy usystematyzowano poruszane obszary i podstawowe pojęcia takie, jak np.: model, modelowanie, metoda, algorytm, algorytmy heurystyczne, sieci neuronowe, proces transportowy, zadanie transportowe, dobór pojazdów, wyznaczanie tras. Umożliwiło to jednoznaczne zdefiniowanie: obszaru badawczego, w tym problemów badawczych, celu dysertacji, tezy, projektu sieci neuronowej, modelu matematycznego i w konsekwencji metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych.

Zmieniające się oczekiwania i potrzeby klientów w odniesieniu do przedsiębiorstw logistycznych, w tym dynamicznie rosnący rynek kurierów, przesyłek ekspresowych i paczek (KEP), powoduje ciągłe poszukiwania nowych narzędzi do ich realizacji. Złożoność tego problemu wynika z wielu czynników i aspektów, które należy uwzględnić na coraz bardziej konkurencyjnym rynku. Branża transportowa jest jedną z najbardziej uregulowanych prawnie części rynku, zaczynając od szczegółowych wymagań technicznych pojazdów, opakowań ładunków i ich warunków przewozu, po czas pracy kierowcy i inne. Uregulowania te definiowane są na poziomie krajowym i międzynarodowym. Obserwowany jest również wzrost wymagań w zakresie efektywności urządzeń technicznych, w tym pojazdów, jak i pracy człowieka, wyposażonego w różnego rodzaju urządzenia wspomagające. Różnorodność przedsiębiorstw i ich zasobów, generuje różne podejście do zagadnienia doboru pojazdów do zadań.

Kolejnym aspektem uwzględnianym podczas doboru pojazdów do zadań jest różnorodność zamawianych ładunków, a także ich rozproszenie wynikające z dużej liczby miejsc nadejścia i odbioru tych ładunków.

Istotną rolę w doborze pojazdów do zadań odgrywa koszt realizacji zadań transportowych oraz czas realizacji zadań. Miernikiem poprawnie wygenerowanego przydziału jest najczęściej minimalny koszt, czy współczynnik wypełnienia przestrzeni ładunkowej, w ostatnim okresie również czas realizacji zadania, nawet wyższym kosztem. Po przeanalizowaniu literatury dotyczącej problematyki doboru pojazdów do zadań transportowych można stwierdzić, iż brak jest holistycznego podejścia wyznaczającego dobór pojazdów do zadań w tych przedsiębiorstwach. Holistyczne podejście uwzględnia m.in.:

- wyznaczania prognozy popytu;
- wyznaczenie tras jazdy pojazdów;
- wyznaczenie typów pojazdów realizujących zadania transportowe;
- wyznaczenie liczby pojazdów określonego typu do przydzielonych zadań transportowych;
- dobór pojazdów do zadań w ujęciu wielokryterialnym.

W celu rozwiązania tego problemu w dysertacji zaproponowano metodę wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych. Autorską metodę zaimplementowano i zweryfikowano przy wykorzystaniu programów komputerowych odzwierciedlających algorytm metody i model matematyczny metody.

Zaproponowana w rozprawie metoda uwzględnia prognozę doboru pojazdów do zadań jest metodą uniwersalną, którą można zastosować w innych przedsiębiorstwach, w których mogą wystąpić np. problemy z efektywnym wykorzystaniem potencjału floty samochodowej.

W pracy przyjęto następującą metodologię:

- określono stan zagadnienia;
- sformułowano problemy badawcze;
- sformułowano tezę;
- sformułowano cel badań;
- określono szczegółowe cele badań;
- określono przedmiot badań i zastosowane metody badawcze;
- opracowano metodę doboru pojazdów do zadań w przedsiębiorstwach transportowo-logistycznych;
- opracowano model matematyczny wykorzystany w metodzie;
- opracowano projekt sieci neuronowej;
- zaimplementowano i zweryfikowano opracowaną metodę prognozy doboru pojazdów do zadań;
- zweryfikowano tezę i cel pracy oraz sformułowano wnioski;
- określono kierunki dalszych badań.

W rozdziale I zidentyfikowano obszar badawczy. Analizie poddano stan obecny transportu drogowego towarów. Zaprezentowano założenia ogólne do organizacji przewozów, w tym pojęcia podstawowe związaną z obszarem badawczym pracy oraz uwarunkowania przydziału wykonawców do zadań. W dalszej części przedstawiono zastosowanie sieci neuronowych w logistyce oraz problematykę wyznaczania tras.

W rozdziale II zaprezentowano wprowadzenie do modelowania i ogólne sformułowanie problemu doboru pojazdów do zadań transportowych oraz sformułowano cel, tezę i zakres pracy, a także opisano metodykę badań.

W rozdziale III opracowano model matematyczny metody doboru pojazdów do zadań transportowych formułując: dane wejściowe i odpowiednio je parametryzując, opis struktury sieci transportowej, opis zapotrzebowania na przewozy, tryb realizacji i przydziału zadań transportowych, zmienne decyzyjne, ograniczenia i kryteria oceny.

Rozdział IV opisuje autorską metodę wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych oraz sformułowanie algorytmu jej działania. Następna część rozdziału zawiera modelowanie neuronowe oraz opis implementacji metody w postaci autorskiego rozwiązania przy wykorzystaniu programu komputerowego FlexSim.

Rozdział V przedstawia weryfikację komputerową opracowanej metody. W tym celu przeprowadzono analizę studiów przypadku, dla których poprawność wyników została oceniona przez Autorkę.

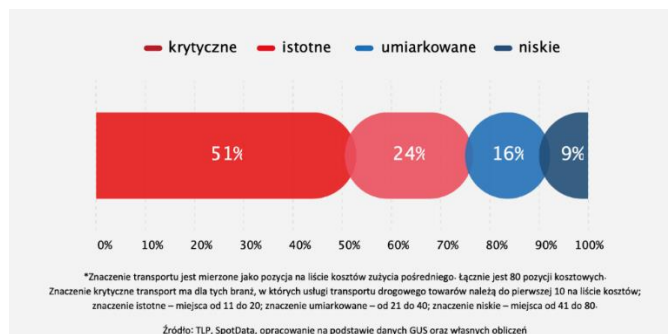
W podsumowaniu zawarto omówienie wniosków, wyciągniętych na podstawie wyników badań oraz przeprowadzono analizę stopnia realizacji celów pracy. Ponadto dokonano oceny rozwiązania sformułowanego problemu badawczego i potwierdzenia tezy rozprawy. Na podstawie dorobku poznawczego osiągniętego w badaniach, określono kierunki dalszych prac naukowych w zakresie doskonalenia rozwiązań wspomagających dobór pojazdów do zadań transportowych.

1. IDENTYFIKACJA OBSZARU BADAWCZEGO

1.1. Transport drogowy towarów – analiza stanu obecnego

Transport stanowi szybko rozwijający się sektor gospodarki o istotnym znaczeniu dla pozostałych podmiotów. Istnieje wiele opracowań [36], [37], [58], [85], [104], [130], które wprost pokazują zależność pomiędzy rozwojem gospodarczym danego kraju, a rozwojem sektora transportu. Rozwój infrastruktury drogowej bezpośrednio wpływa na rozwój transportu, co z kolei przekłada się na rozwój gospodarki. Wg Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości po wybudowaniu nowej drogi lub modernizacji już istniejącej poprzez poprawę jej standardu wokół tej drogi powstają nowe firmy, centra logistyczne itp. co bezpośrednio przekłada się na rozwój regionu. Branża transportowo-logistyczna jest jedną z 3 najważniejszych w polskiej gospodarce (obok handlu hurtowego i handlu detalicznego) i od początku XXI wieku była drugą najszybciej rozwijającą się pod względem wytwarzanej wartości dodanej brutto wynoszącej średniorocznie ponad 8% [35]. Rozwój motoryzacji i rozwój międzynarodowego transportu towarowego wymaga dodatkowych wysiłków i nowych pomysłów, aby utrzymać pozycję przedsiębiorstw transportowych na rynku usług transportowych [162].

Pozostałe branże nie mogłyby funkcjonować bez transportu. Z szacunków TLP (Transport i Logistyka Polska) i SpotData wynika, że transport jest jedną z krytycznych pozycji kosztowych dla branż, które wytwarzają 50 proc. Polskiego PKB, jednocześnie firmy transportowe przewożą 85 proc. Polskiego eksportu i płacą ponad 16 mld zł podatków do budżetu państwa i samorządów [190]. Część PKB generowana przy krytycznym, istotnym, umiarkowanym lub niskim udziale transportu drogowego towarów przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Część PKB generowana przy krytycznym, istotnym, umiarkowanym lub niskim udziale transportu drogowego towarów

Źródło: [190].

Z przedstawionych danych wynika iż w ok. 75% firmach transport jest podstawową pozycją kosztową realizacji usługi/zadania.

Sektor gospodarczy bardzo mocno skorelowany jest z gospodarką magazynową. W tym przypadku również udowodniono, iż segment transportu i magazynowania silnie na siebie wpływają i są w pewnych aspektach od siebie uzależnione [75], [103], [149]. Dlatego w niektórych zestawieniach, np. GUS, mówi się o podmiotach transportu i magazynowania w ujęciu jednej grupy.

Rynek transportowy w Europie i w Polsce skoncentrowany jest na transporcie międzynarodowym samochodowym. Procentowy udział poszczególnych gałęzi transportu w Polsce w latach 2010-2022 przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Procentowy udział poszczególnych gałęzi transportu w Polsce w latach 2010-2022

Lata	2010	2015	2020	2021	2022
Transport kolejowy	13,1%	12,4%	9,9%	10,6%	10,4%
Transport samochodowy	83,1%	83,5%	87,2%	86,6%	86,8%
Transport lotniczy	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Transport rurociągowy	3,1%	3,0%	2,3%	2,2%	2,3%
Transport śródlądowy	0,3%	0,7%	0,2%	0,2%	0,1%
Transport morski	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%

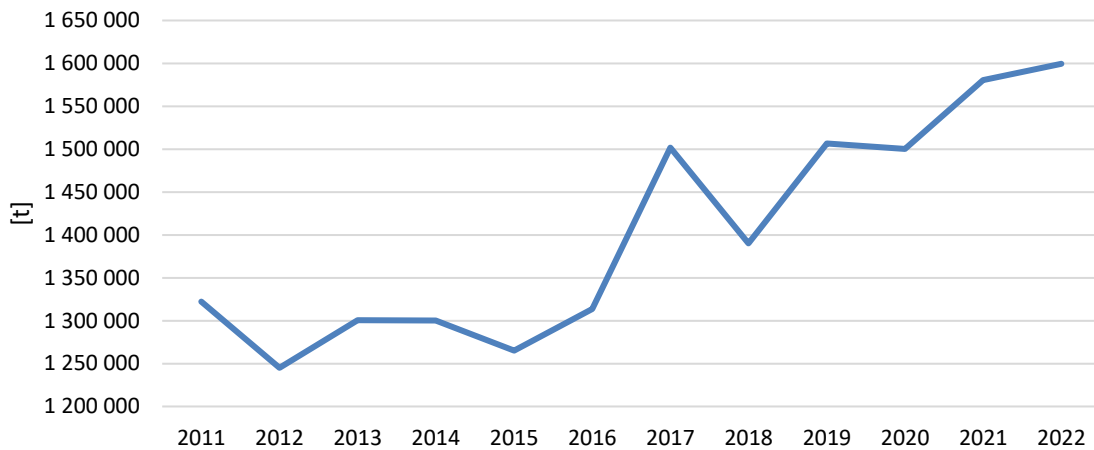
Źródło: [80].

Procentowy udział transportu samochodowego w Europie to ok. 78 %, natomiast transport samochodowy w Polsce stanowi ok. 87 %. Jest to przesłanka do tego, iż ten rodzaj transportu również będzie rozwijał się w przyszłości, mimo ciągle nakładanych kolejnych ograniczeń i obowiązków na przewoźników drogowych wynikających m.in. z ochrony środowiska, emisji CO₂, czy pakietu mobilności UE.

Tylko w ostatnich sześciu latach odnotowano ponad dwuprocentowy spadek długości linii kolejowych w Europie. Natomiast długość autostrad w krajach EU27 wzrosła o ponad 5%.

Przykładem odbiegającym od ogólnego wzrostu segmentu transportu jest pandemia wywołana przez SARS-COV-2 w wyniku, której szacuje się, że jedynie w Polsce 17,6% małych przedsiębiorstw transportowych zawiesiło działalność z powodu pandemii, a 86,3% przedsiębiorstw było zmuszonych do co najmniej częściowego ograniczenia działalności w 2020 r. [101].

Potwierdzeniem tych danych są informacje dotyczą transportu drogowego towarów. Wyk. 1 przedstawia transport drogowy towarów w Polsce w latach 2011-2022.

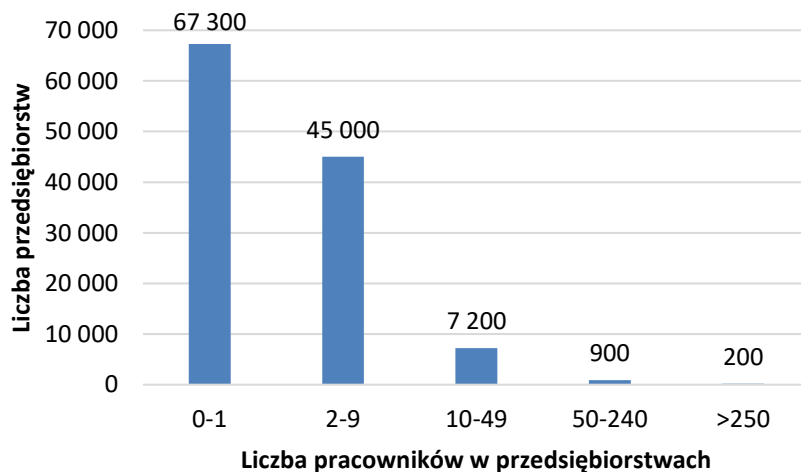


Wyk. 1. Transport drogowy towarów w Polsce w latach 2011-2022

Źródło: [53].

W Polsce funkcjonuje ok. 120 tys. firm zajmujących się transportem drogowym towarów, w tym ok. 38 tys. firm posiadających licencję wspólnotową, co stanowi ok. 32 % wszystkich firm z tego obszaru. Od 2019 r. polskie firmy są liderem pracy przewozowej na rynku europejskim.

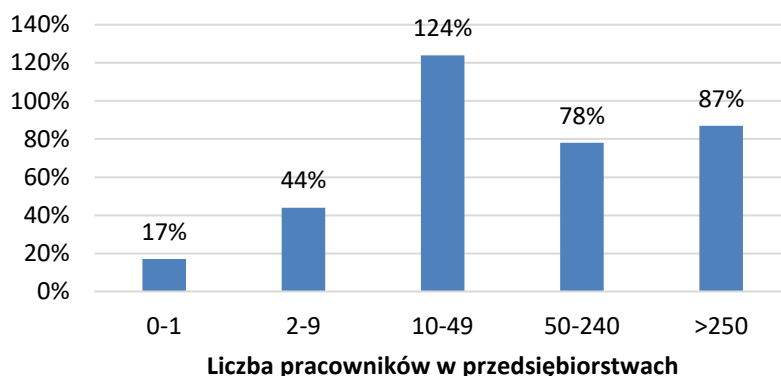
Przedsiębiorstwa działające w branży transportu drogowego według wielkości zatrudnienia przedstawiono na wyk. 2.



Wyk. 2. Przedsiębiorstwa działające w branży transportu drogowego według wielkości zatrudnienia w Polsce w 2021

Źródło: [190].

Procentową zmianę liczby przedsiębiorstw działających w branży transportu drogowego przedstawiono na wyk. 3.

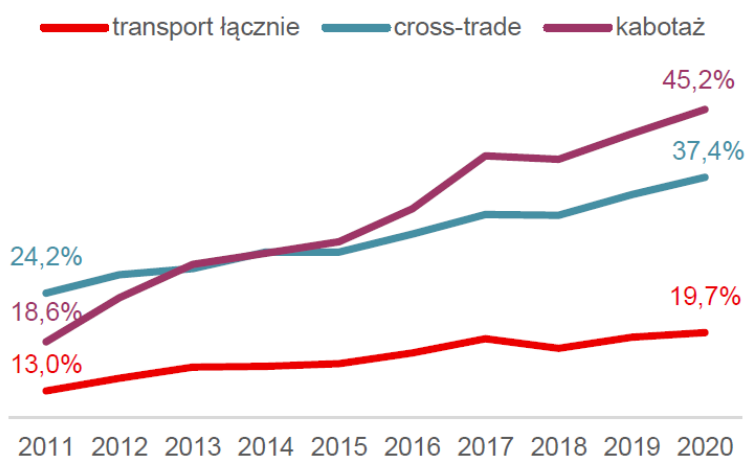


Wyk. 3. Procentowa zmiana liczby przedsiębiorstw działających w branży transportu drogowego w 2021

Źródło: [190].

Z przedstawionych wykresów (wyk. 2, wyk. 3) można wywnioskować, iż trendem na rynku jest postępująca stopniowo konsolidacja, czyli wzrost znaczenia firm średnich i dużych, kosztem działalności najczęściej jednoosobowych tzw. Mikroprzedsiębiorstw, które wciąż stanowią większość.

Liczba posiadanych ciągników siodłowych i tak duża liczba przedsiębiorstw działających w branży transportu drogowego powoduje, iż Polska jest jedną z „dźwigni” transportu drogowego w UE. Udział polskich przewoźników drogowych w pracy przewozowej (t-km) w UE przedstawia wyk. 4.

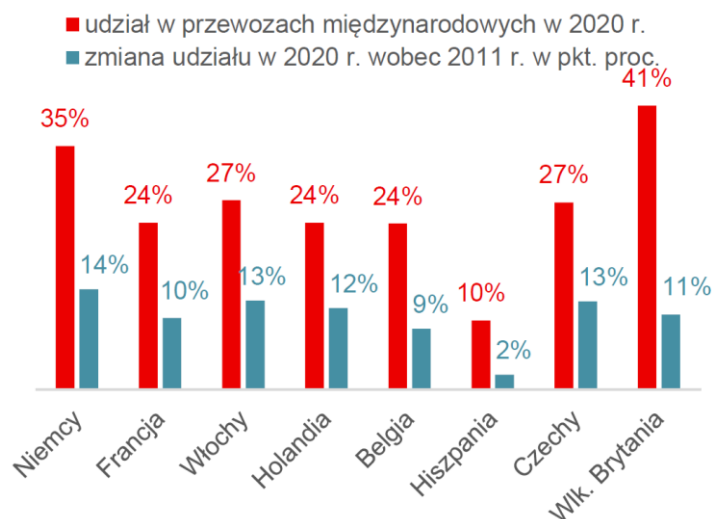


Wyk. 4. Udział polskich przewoźników drogowych w pracy przewozowej (t-km) w UE

Źródło: [190].

Z przedstawionego wyk. 4 wynika, iż od 2011 r. udział polskich przewoźników drogowych systematycznie rośnie. Warto podkreślić, iż pandemia wywołana wirusem SARS-COV-2 nie miała negatywnego wpływu na systematyczny wzrost liczby polskich

przewoźników drogowych w EU. Potwierdzeniem tej tendencji jest również udział Polski w przewozach międzynarodowych przewoźników UE w wybranych krajach (t-km) przedstawionych na wyk. 5. Można wnioskować zatem, że branża transportowa jest na tyle ważna (skorelowana z innymi segmentami rynku), iż jeśli nawet pojawiają się kryzysy gospodarcze jakie stanowiły np. kryzys finansowy w latach 2008-2009 lub pandemia wywołana wirusem SARS-COV-2, nie wpływa to mocno negatywnie na sam rozwój segmentu transportu.



Wyk. 5. Udział Polski w przewozach międzynarodowych przewoźników UE w wybranych krajach (t-km)

Źródło: [190].

Przedstawiony wyk. 5 również potwierdza rosnący udział Polski w przewozach międzynarodowych przewoźników UE w wybranych krajach. Warto zaznaczyć, iż pomimo wystąpienia Wielkiej Brytanii z UE w lutym 2020 r. udział Polski w przewozach międzynarodowych w Wielkiej Brytanii wzrósł do poziomu 41%, a roczny procentowy wzrost udziału roku 2021 do roku 2020 wyniósł 11%.

Na podstawie przedstawionych informacji można wnioskować, iż polskie przedsiębiorstwa transportu drogowego funkcjonują na wielu rynkach w Europie i stanowią lwią część tych rynków oraz nastąpi dalsze umacnianie pozycji rynkowej Polski w Europie w branży transportu drogowego. Sytuacja ta wspomaga generowanie dużej ilości danych do przetwarzania i analizowania dla efektywnego planowania. W tym celu użyteczne są nowoczesne technologie, które poradzą sobie z dużą ilością danych na wejściu, tak aby na wyjściu uzyskać efektywne wykorzystanie posiadanego potencjału przewozowego.

J. Łacny wskazuje konkretne obszary, w jakich nowoczesne technologie w połączeniu z dużą liczbą danych znajdują swoje zastosowanie w szeroko pojętym transporcie. Należą do nich m.in. [109]:

- planowanie optymalnych tras realizacji przewozów przy wykorzystaniu dokładnych map cyfrowych i regularnie aktualizowanych danych systemowych;
- analiza i kontrola tras przemieszczania się pojazdów lub ładunków, w tym minimalizacja ich długości i kosztów realizacji przewozu, eliminacja nadużyć, a zatem dynamiczna obsługa zleceń transportowych;
- rejestracja podstawowych parametrów eksploatacyjnych pojazdu (prędkości, przebytej drogi i trasy przejazdu, obrotów silnika, zużycia paliwa, nacisków osi, a także monitorowanie stanu przestrzeni ładunkowej, kontrolę pracy systemów pokładowych, temperatury przewozu itp.);
- kontrola pracy kierowcy w świetle przepisów o maksymalnych okresach prowadzenia pojazdu, minimalnych przerwach i okresach odpoczynku, a także w zakresie stosowania optymalnej techniki jazdy zapewniającej ekonomiczną eksploatację pojazdu, a w razie potrzeby prawidłowy wybór dróg objazdu, miejsc parkowania, tankowania;
- zwiększenie bezpieczeństwa w transporcie, a więc zarówno bezpieczeństwa ruchu drogowego, jak i bezpieczeństwa kierowców, pojazdów i ładunków;
- obniżenie zagrożenia terroryzmem poprzez stworzenie możliwości permanentnej kontroli przestrzeni ładunkowej, nienaruszalności zamknięć celnych, monitorowania ingerencji w tę przestrzeń, przeciwdziałanie nielegalnej migracji ludności;
- precyzyjne określanie terminu dostaw oraz optymalną realizację dystrybucji towarów.

Szeroki zakres świadczonych usług logistycznych obejmuje m.in. transport, magazynowanie, zarządzanie i kontrolę zapasów, obsługę klientów i zamówień, gospodarkę opakowaniami itp.

Usługa logistyczna, to działalność zarobkowa, związana ze świadczeniem usług takich jak: spedycja, transport, magazynowanie, usługami pokrewnymi i wspomagającymi proces przewozów dóbr między poszczególnymi ogniwami łańcucha dostaw [157]. W literaturze przedmiotu można odnaleźć wiele klasyfikacji usług logistycznych [36], [156]. Częścią wspólną tych klasyfikacji są elementy związane ze spedycją, transportem, magazynowaniem. Elementami różniącymi te klasyfikacje są przede wszystkim:

- zasięg i forma operacji logistycznych, które obejmują realizację funkcji logistycznych np. obsługa zapasów, pakowanie, cross-docking;

- zakres usług rozszerzonych, które wykraczają poza tradycyjne usługi logistyczne;
- przedsiębiorstwa kurierskie świadczące coraz szerszy zakres usług;
- przedsiębiorstwa oparte na środkach trwałych lub korzystające z outsourcingu.

Na przestrzeni ostatnich lat zauważalna jest integracja procesów zachodzących na rynkach i wewnątrz organizacji, a także między organizacjami. Integracja ta dotyczy wielu aspektów, np. optymalizacji zasobów bądź wymiany informacji. Zmieniające się procesy są determinantem kształtowania się nowych form funkcjonowania tych organizacji na zmieniających się rynkach. Mają na celu głównie obniżenie kosztów funkcjonowania firmy i świadczenia usług, skrócenie czasu poszczególnych operacji, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego poziomu jakości. Zmiany te szczególnie dotyczą przedsiębiorstw transportowo – logistycznych, co można było zauważyć w 2019 r., kiedy pandemia wywołana wirusem SARS-COV-2 ograniczyła w znacznym stopniu funkcjonowanie przedsiębiorstw w tradycyjny sposób.

Konsekwencją takich uwarunkowań są bardzo wysokie wymagania w stosunku do firm w odniesieniu do ich efektywności, szeroko pojętej optymalizacji zasobów (ludzkich i materiałowych), a także sprawności i efektywności pracy.

Usługi logistyczne są mocno powiązane z usługami transportowymi. Usługi transportowe i zapotrzebowanie na nie, mają swoją mocno ugruntowaną pozycję w historii rozwoju społeczeństw, co ma związek z naturalną potrzebą ludzi do przemieszczania się. Potrzeby w zakresie transportu przejawiały się popytem definiowanym poprzez: wielkość, czas czy miejsce docelowe.

W skład tworzącego się rynku usług transportowych wszedł zarówno ogół podmiotów sprzedających oraz nabywających usługi wraz z relacjami i związkami zachodzącymi między nimi, ale także zbiór procesów determinowanych przez funkcjonowanie tego rynku. W literaturze można znaleźć wiele cech transportu, takich jak [153]:

- jedność produkcji i konsumpcji w aspekcie czasu, miejsca i rozmiaru;
- brak możliwości produkcji „na zapas”, co wymusza utrzymywanie rezerw zdolności przewozowej;
- charakter jednostkowy, jak i masowy;
- możliwość oferowania usług transportowych różnym odbiorcom;
- duża podatność na wahania koniunkturalne i sezonowe;
- występowanie nadwyżek i niedoboru zdolności przewozowej w zależności od wielkości popytu rynkowego i jego miejsca;

- trudność w określeniu faktycznego sumarycznego zapotrzebowania, co związane jest z faktem nierównomiernego popytu w ramach wielu sektorów gospodarki;
- konieczność posiadania dostępności do infrastruktury liniowej, jak i dodatkowych elementów tj.: miejsc załadunku i rozładunku, portów, dworców i przystanków;
- konieczność realizacji przejazdów dwukierunkowych i występowanie problemu pustego przebiegu;
- konieczność zapewnienia regularności w przypadku przewozów zgodnie z rozkładem jazdy (m.in.: pasażerów).

Głównie z tych powodów nowoczesna usługa transportowa powinna cechować się [180]:

- zdolnością do optymalnego wykorzystania wszystkich swoich zasobów, w tym informacji;
- elastycznością, tzn. umiejętnością dostosowania się do zmieniających się potrzeb klientów;
- zdolnością szybkiego reagowania i umiejętnością zaspakajania zmieniającego się popytu.

Wg M. Jacyny i in. [84] usługi transportowe są czynnikiem intensyfikującym postęp i kooperację w obszarze społecznym, przemysłowym i gospodarczym. Przykładem tego są usługi kurierskie, które są jednym z najszybciej rozwijających się sektorów transportu towarowego na świecie [145].

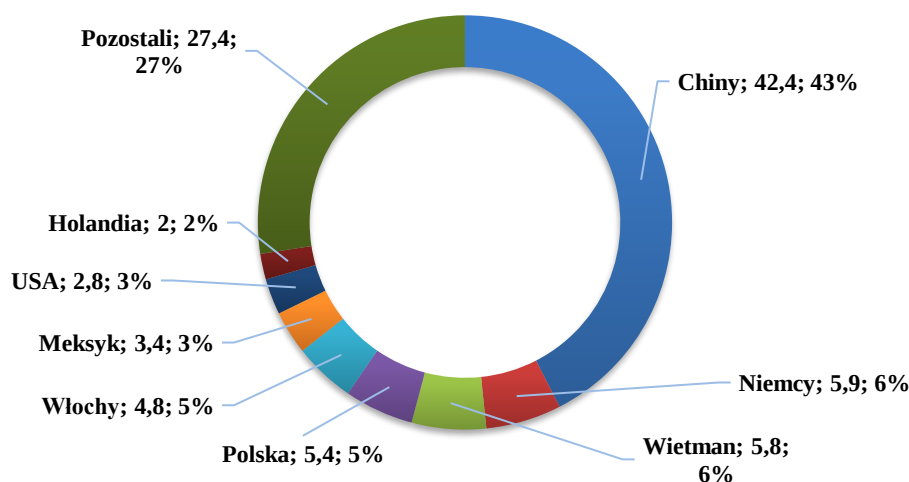
Podsumowując, na podstawie przytoczonych informacji można stwierdzić, że:

- popyt na usługi transportowe ciągle rośnie;
- liczba przedsiębiorstw transportowo-logistycznych w ostatnich latach rosła i będzie rosła;
- rosną nakłady inwestycyjne w infrastrukturę drogową;
- rośnie liczba pojazdów ciężarowych świadczących usługi transportowe;
- nowoczesne technologie/programy informatyczne mają coraz większy wpływ na efektywność funkcjonowania przedsiębiorstw, w których przetwarza się duże ilości danych.

Ze względu na te zmienne tj.: rosnące zapotrzebowanie na usługi transportowe, rosnącą liczbę pojazdów i firm z obszaru transportu i magazynowania, jak również aspekty związane z ekologią i ochroną środowiska (wspomniany pakiet mobilności UE), ale również ze względu na szeroką pojętą efektywność i optymalizację zasobów problematyka doboru pojazdów do zadań transportowych jest stale aktualna. Dodatkowo rozwiązania te wpisują się w ideę

zrównoważonego rozwoju i trendy w ochronie środowiska [208]. Bazując na doświadczeniu zawodowym Autorki, problematykę doboru pojazdów do zadań przedstawiono na przykładzie branży meblarskiej. Polska od lat zajmuje czołowe miejsce w Europie, jak również na świecie pod względem produkcji, importu i eksportu mebli.

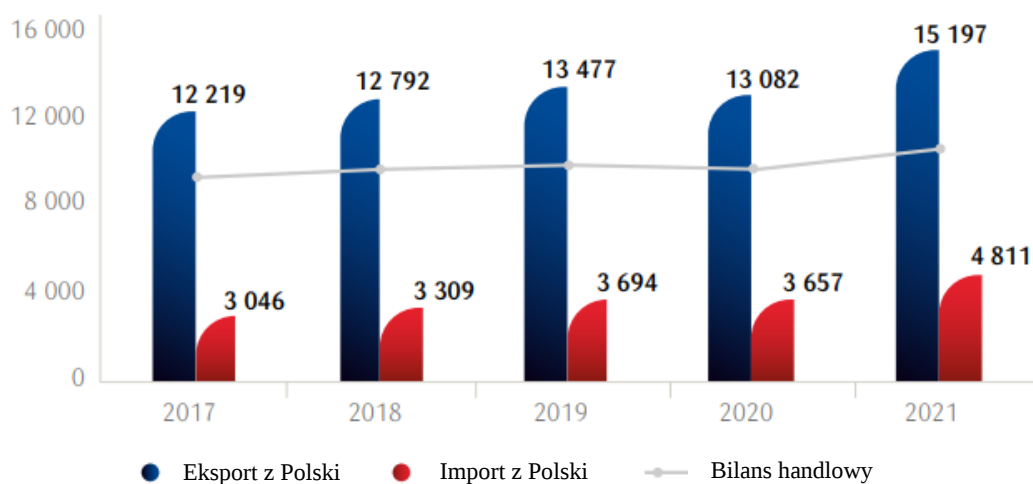
Polska zajmuje 4 pozycję na świecie pod względem eksportu mebli (wyk. 6).



Wyk. 6. Struktura światowego eksportu mebli w 2021 r.

Źródło: [20].

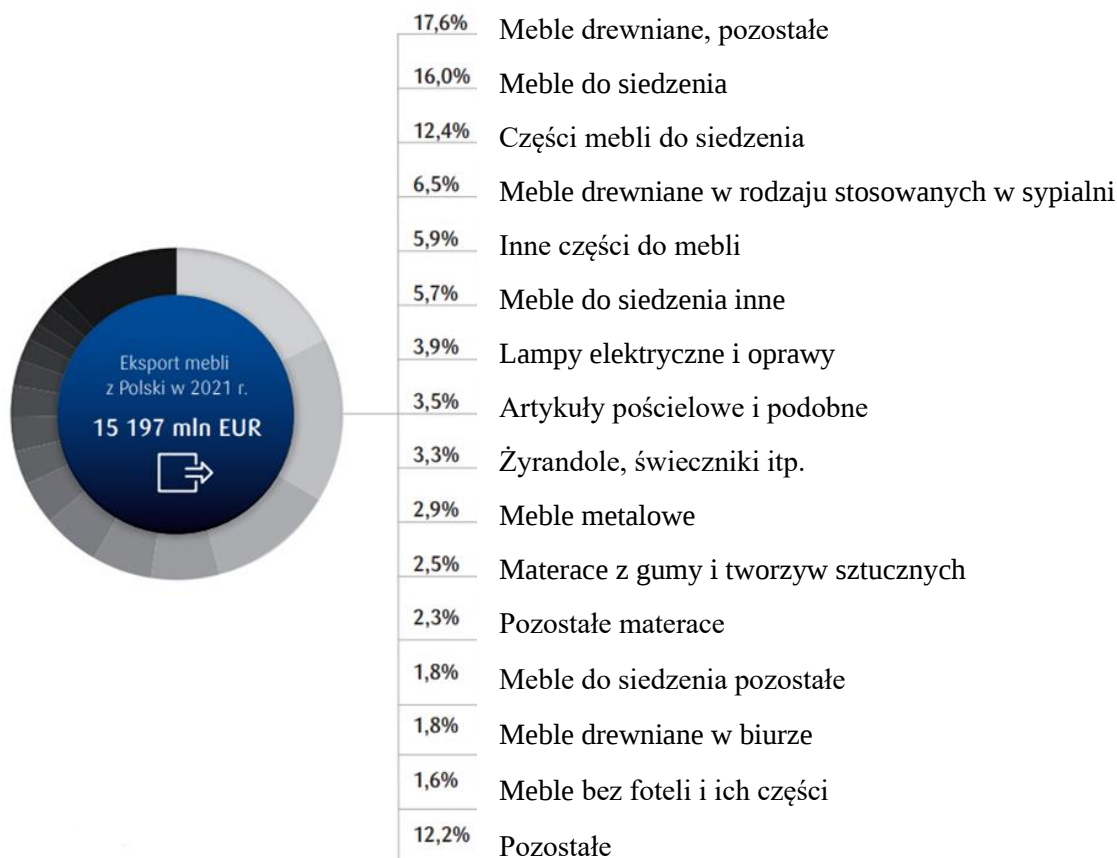
Dodatkowo eksport mebli z Polski w latach 2018–2021 wzrósł znacząco o 24,4% z poziomu ponad 12,2 mld EUR w 2017 do blisko 15,2 mld EUR w 2021, co przedstawiono na wyk. 7.



Wyk. 7. Handel zagraniczny produktami meblarskimi w Polsce (mln EUR)

Źródło: [20].

Ok. 70% eksportu stanowią meble z kategorii do siedzenie i ich pochodne. Strukturę polskiego eksportu mebli w 2021 r. przedstawiono na wyk. 8.



Wyk. 8. Struktura polskiego eksportu mebli

Źródło: [20].

1.2. Organizacja przewozów – założenia ogólne

1.2.1 Pojęcia podstawowe

Organizacja przewozów obejmuje problem przydziału pojazdów do zadań, w których zdefiniowana jest określona liczba środków transportowych m.in. pojazdów, urządzeń, pracowników, które realizują zlecone zadanie. Problem przydziału środków do zadań jest zagadnieniem wykorzystywanym w różnych segmentach rynku i dyscyplinach naukowych np. logistyce, transporcie, budownictwie, produkcji, dystrybucji, ale również w usługach. Praca dotyczy wieloaspektowych zagadnień doboru pojazdów do zadań transportowych. Analizę powyższej problematyki należy rozpocząć od zdefiniowania podstawowych pojęć wynikających z treści przyjętego tematu, tj.: system, system transportowy i jego struktura, system logistyczny, proces transportowy, proces modelowania, proces przewozowy, proces logistyczny, zadanie transportowe.

W literaturze polskiej i zagranicznej można znaleźć wiele różnych definicji pojęcia systemu. Ich różnorodność wynika z zakresu i podmiotu badań. System jest pojęciem wieloznaczeniowym, najczęściej definiowanym jako celowo określony zbiór elementów i relacji między tymi elementami, które jako całość określają cechy obiektu. Definicja ta jest adoptowana i modyfikowana do różnych dziedzin nauki m.in. nauk społecznych, filozofii, matematyki czy informatyki [16], [23], [88], [129]. Dlatego też bardzo trudno podać jednoznaczną definicję systemu obowiązującą dla wszystkich obszarów nauki. Zasadniczo pojęcie systemu definiowane jest z uwzględnieniem podstawowych jego właściwości, które składa się z [14], [76], [152], [200]:

- konieczności wyodrębniania systemu z otoczenia – system postrzegany jest jako pewna całość, która znajduje się w określonych wzajemnych relacjach z otoczeniem, przy czym nakładając ograniczenia na system oraz precyzując relacje z otoczeniem, system zachowuje pewną autonomię, stąd mówi się o systemach otwartych, zamkniętych lub częściowo odosobnionych;
- konieczności budowy systemu z elementów (podsystemów) – wyróżnione elementy systemu oddziałują na siebie wzajemnie, przy czym te oddziaływania mają istotny wpływ na właściwości całego systemu, przy czym ważna jest funkcja każdego z elementów, a nie jego położenie;
- konieczności funkcji spełnianej przez system – funkcja, która jest spełniana przez system stanowi podstawę do traktowania systemu jako całości, przy czym system jako całość zdolny jest do realizowania założonego zadania oraz spełniania celu jego działania; nie ma systemów bezcelowych;
- konieczności ograniczonej zmienności systemu w czasie – system podlega większym lub mniejszym zmianom w czasie, jednak system zachowuje pewne właściwości podstawowe, mianowicie swoją istotę.

Pojęcie systemu w literaturze [87], [150] określane jest jako pewna funkcjonalna całość, składająca się z takiej liczby elementów pozostających ze sobą w ściśle ustalonych powiązaniach, która jest niezbędna do tego, by całość ta pełniła przypisane jej funkcje. Jest on zatem odwzorowaniem, właściwości elementów obiektu i powiązań między tymi właściwościami, przy czym obiekt rozumie się zdefiniowany ze względu na cel badań fragment rzeczywistości, scharakteryzowany za pomocą wybranego zestawu cech. System składa się z różnego rodzaju elementów i powiązań (relacji) występujących między nimi, oraz między elementami a otoczeniem. Charakter powiązań między elementami systemu definiuje jego

strukturę [14], [76], [166]. Dlatego, ze względu na przyjęty temat pracy należy zdefiniować pojęcie systemu transportowego.

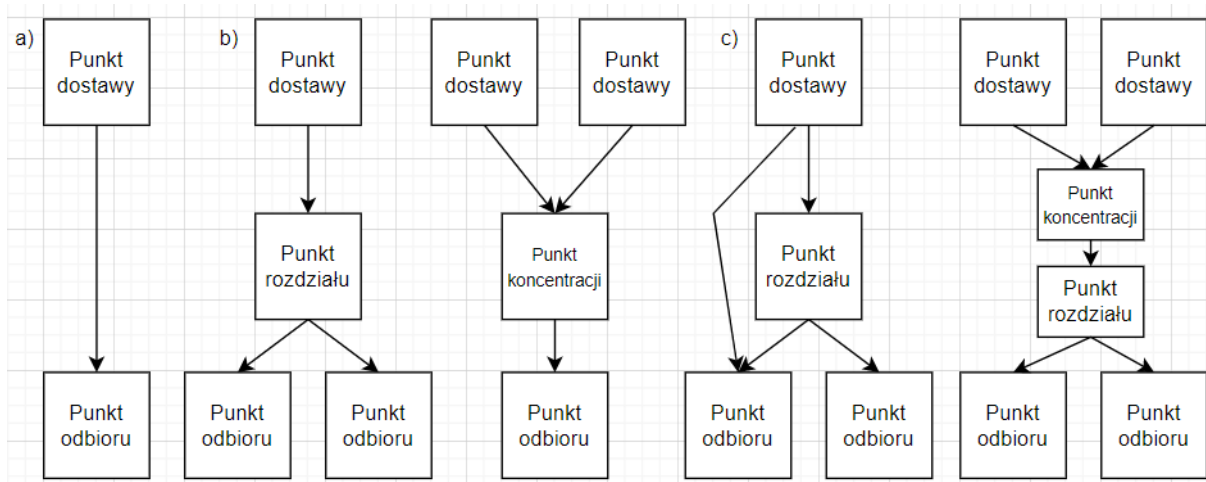
System transportowy, czy system logistyczny zazwyczaj rozpatruje się z punktu widzenia ogólnej teorii systemów zdefiniowaną przez Ludwiga von Bertalanffy [55]. System transportowy można traktować jako złożony obiekt, układ, którego celem działania jest przemieszczanie osób i (lub) ładunków z punktu nadania do punktu odbioru [87]. Aby osiągnąć założony cel, również należy wziąć pod uwagę potencjał systemu, w którym to zadanie ma zostać zrealizowane. Potencjał systemu transportowego to jego zasoby techniczne, ludzkie oraz finansowe i zasady organizacji pracy powiązane w taki sposób, aby zapewnić właściwą realizację ustalonych zadań przewozowych na wymaganym poziomie obsługi w sposób efektywny [83]. Na ogół, problem przydziału skupia się na wyznaczeniu zestawu zadań realizowanych przez poszczególne pojazdy, natomiast miernikiem jego oceny jest koszt i czas realizacji wszystkich zadań. Zatem decydujące znaczenie w problemie przydziału w systemach transportowych ma wskazanie minimalnych tras realizujących zlecone zadania transportowe [83].

System transportowy czy logistyczny często składa się z innych podsystemów. Do głównych elementów infrastruktury punktowej systemów transportowych czy logistycznych zalicza się: magazyny, centra dystrybucji, centra logistyczne, terminale przeładunkowe, które można traktować jako specyficzne systemy. W każdym z nich występują pewne obiekty jako elementy składowe, a wraz z relacjami je łączącymi tworzą system będący podsystemem dużego systemu transportowego lub logistycznego w zależności od zdefiniowanego celu badań [87].

Podejście systemowe wymaga umiejętności zapisu struktur systemów transportowo-logistycznych, charakterystyk potoku ruchów obciążających poszczególne elementy składowe oraz związanych z nimi informacji w postaci formuł matematyczno-logicznych. W rezultacie możliwe jest opracowanie odpowiedniego modelu matematycznego, algorytmu jego rozwiązania oraz zastosowanie technik komputerowych do przeprowadzenia symulacji [88]. Poprawne zdefiniowanie wszystkich ww. elementów systemów ma na celu pełne wykorzystanie potencjału/zasobów m.in. osobowych, transportowych, infrastruktury.

Wyróżnia się podstawowe struktury systemów transportowych [83] (wyk. 9):

- systemy jednostopniowe (przewozy bezpośrednie);
- systemy wielostopniowe, hierarchiczne (przewozy pośrednie);
- systemy kombinowane (przewozy bezpośrednie i pośrednie, hierarchiczne).



Wyk. 9. Struktury systemów transportowych: a) jednostopniowy, b) systemy wielostopniowe, c) systemy kombinowane

Źródło: opracowanie własne na podstawie [87].

Strukturę systemu transportowego tworzą również modele organizacji przewozów w tych systemach. Przewozy te funkcjonują w pojedynczych łańcuchach dostaw, lub też w całych sieciach logistycznych. W trakcie rozważań nad przydziałem pojazdów do zadań uwzględnić należy podstawowe cechy zarówno łańcuchów dostaw jak, i sieci logistycznych, tak aby możliwe było spełnienie przyjętych kryteriów.

Każdy system transportowy jest mocno skorelowany z systemem logistycznym. Jeden bez drugiego nie mógłby funkcjonować.

W literaturze problemu można spotkać wiele definicji systemu logistycznego [23], [31], [57], [87], [92], [139] na ogół jednak definiowany jest jako zbiór środków technicznych i organizacyjnych oraz ludzi zdolnych planować i realizować przepływy, buforowanie i rozdział materiałów między producentami i hurtownikami a punktami sprzedaży detalicznej czy bezpośrednio konsumentami w sposób zapewniający efektywną realizację podstawowych funkcji przedsiębiorstwa [23]. Inne definicja określa, iż system logistyczny to system (w skali makro) celowo zorganizowanych i połączonych ze sobą przepływami materiałowymi, informacyjnymi i finansowymi przedsiębiorstw oraz rynków zaopatrzenia i zbytu, w tym także rynków zagranicznych, obejmujących układ środków technicznych, organizacyjnych i ludzi wraz z relacjami między nimi, warunkującymi efektywną realizację przepływów strumieni dóbr materialnych w całej gospodarce kraju [199].

System logistyczny ma charakter usługowy względem pozostałych sfer gospodarki i jego zadaniem jest celowe organizowanie i zintegrowanie – w obrębie danego układu gospodarczego – przepływu materiałów i produktów oraz odpowiadających im informacji, umożliwiających

zarządzanie i optymalizację procesów w łańcuchu dostaw (m.in. przez automatyczną identyfikację towarów, symulację komputerową, kontroling, elektroniczną wymianę informacji oraz kompleksowy rachunek kosztów) [84]. System logistyczny integruje ze sobą takie podsystemy jak: produkcja, transport, magazynowanie, dystrybucja oraz łączy ze sobą elementy tych podsystemów, które nawzajem się uzupełniają, często przenikają.

W kontekście powyższego transport jest jednym z ważniejszych elementów systemu logistycznego, ponieważ spełnia istotne zadania mające na celu ustalenie fizycznego kontaktu dostawców surowców i producentów, producentów i centrów dystrybucji, centrów dystrybucji i odbiorców.

Z przytoczonych definicji zarówno systemu logistycznego, jak i transportowego wynika, że systemy te w pewnym zakresie można traktować jako równoważne. Dla obu tych systemów można wymienić elementy wspólne [88]:

- liniową infrastrukturę transportową niezbędną do realizacji przewozów rzeczy z wykorzystaniem różnych gałęzi transportu;
- punktową infrastrukturę transportową służącą do obsługi środków transportu różnych gałęzi transportu oraz do obsługi przemieszczanych ładunków;
- środki transportu zewnętrznego różnych gałęzi transportu służące do przewozu rzeczy;
- pracowników o odpowiednich kwalifikacjach odpowiedzialnych za organizację, realizację i kontrolę przemieszczania rzeczy;
- wspólny przedmiot działań w transporcie i logistyce, tj., przewozy rzeczy.

W systemach transportowych i logistycznych realizowane są różne procesy. Proces w organizacji i zarządzaniu najczęściej definiowany jest jako zbiór czynności, wzajemnie ze sobą powiązanych, których realizacja jest niezbędna dla uzyskania określonego rezultatu [79].

Z kolei transport, to zespół czynności związanych z przemieszczaniem osób i dóbr materialnych za pomocą odpowiednich środków. Obejmuje zarówno samo przemieszczanie z miejsca na miejsce, jak i wszelkie czynności konieczne do osiągnięcia tego celu, tj. [78]:

- czynności ładunkowe (załadunek, wyładunek, przeładunek);
- czynności manipulacyjne (np. opłaty).

Mając na uwadze definicję pojęcia procesu i transportu, można przyjąć iż proces transportowy to zbiór wyspecjalizowanych czynności, występujący w określonej kolejności czasowej i wzajemnie ze sobą powiązanych, których wykonanie jest niezbędne do

przemieszczenia ładunków – z miejsc produkcji do miejsc konsumpcji – lub (oraz) osób – z początkowych do końcowych punktów przewozu [199].

Istotnym elementem procesu przemieszczania ładunków jest proces przewozowy. Autorzy pracy [199] proces przewozowy zdefiniowali jako układ czynności organizacyjnych, (m.in. przygotowanie ładunku do przewozu, ustalenie planu przewozu) oraz wykonawczych (m.in. czynności ładunkowe, przewóz) mających na celu przemieszczenie ładunków lub ludzi z jednego lub kilku punktów początkowych, nazywanych punktami nadania do jednego lub kilku punktów końcowych, zwanych punktami odbioru, z wykorzystaniem odpowiedniego potencjału systemu przewozowego.

Proces przewozowy mocno powiązany jest z procesem logistycznym, który definiuje się jako zespół zadań związanych z przemieszczaniem i/lub zmianą postaci fizycznej oraz składowaniem jednostek (logistycznych) materiału za pomocą odpowiedniego sprzętu i pracowników, zorganizowany i sterowany przez specjalistyczne narzędzia informacyjne [87].

Do głównych zadań, których wymaga zarządzanie procesami, a które powinny być wspomagane przez systemy informatyczne należą [199]:

- modelowanie i optymalizacja procesów;
- zarządzanie procesami z punktu widzenia ich planowania, sterowania czasem i kosztami realizacji;
- sterowanie przepływem pracy w procesach;
- opracowywanie poszczególnych funkcji w procesach.

W systemach informatycznych dedykowanych obsłudze procesu transportowego tzw. Systemach klasy TMS (*ang. Transport Management Software*) istnieje wiele zmiennych, które mają kluczowe znaczenie ze względu na ich wpływ na proces realizacji łańcucha dostaw. Wśród nich istotną rolę odgrywa wizualizacja, automatyzacja i planowanie przy pomocy algorytmów (wykorzystanie głęboko zaawansowanej matematyki) [98].

W aspekcie powyższego, niezależnie od struktury systemu transportowego, systemu logistycznego, czy modelu organizacji przewozu jako podstawowe elementy systemu transportowego należy wymienić [85]:

- punkty nadania (miejsca załadunku);
- punkty przejścia tzw. Punkty pośrednie, w których dokonywane są czynności związane z obsługą ładunków, np. zmiana rodzaju środka transportowego, konsolidacja, dekonsolidacja;
- punkty odbioru (rozładunku);

- powiązania transportowego między ww. punktami, występujące jako istniejąca infrastruktura liniowa transportu;
- organizację i sieć przekazywania informacji oraz załogę systemu;
- liczbę i typ dostępnych pojazdów (kluczowe w aspekcie doboru pojazdów do zadań).

Klasycznie formułowane zadanie transportowe w ujęciu technicznym polega na rozwiązaniu problemu planowania rozłożenia potoku ruchu w systemie transportowym [87]. Z kolei zadania przewozowe, określone potrzebami klientów charakteryzowane są trzema wielkościami [203]:

- rodzajem i ilością ładunków, które należy przewieźć;
- relacją wymaganego przemieszczania ładunków;
- terminem przemieszczania.

Analizując przytoczoną literaturę można stwierdzić, iż pojęcia: zadanie transportowe, zadanie przewozowe czy proces transportowy są w pewnych aspektach (ujęciach) tożsame i sprowadzają się do realizacji przewozu ładunków/osób w jak najbardziej efektywny sposób przy określonych możliwościach i potencjale. Kolejnym zagadnieniem jest dobór wykonawców do zadań.

1.2.2 Uwarunkowania przydziału wykonawców do zadań

Zagadnienie doboru jest jednym z elementów zagadnienia przydziału pojazdów do zadań. Na zagadnienie przydziału wpływają m. in. Dostępne trasy i organizacja przewozów.

Klasyczny dobór wykonawców do zadań polega na wykorzystaniu dostępnych zasobów np. pojazdów, maszyn, ludzi do przydzielonych zadań. Główne założenie jest takie, aby każdy pojazd, człowiek wykonał dokładnie jedno zadanie, a zadanie było w pełni wykonane przez jeden pojazd/jednego wykonawcę. Miernikiem oceny doboru jest suma czasu realizacji wszystkich zadań lub minimalizacja kosztów realizacji wszystkich zadań. Współczesne modyfikacje tego zagadnienia skupiają się głównie na osiągnięciu możliwie dużej efektywności posiadanego potencjału.

Potencjał jest definiowany w zależności od celu i zakresu prowadzonych badań [147]. Ogólnie można przyjąć, że potencjał, to wielkość zdolności jednostki zasobu, jednostki produkcyjnej, środka transportu czy instalacji do realizacji określonych zadań przy normalnym poziomie obciążenia, odniesiona na jednostkę czasu [169]. Pojęcie to stosowane jest w różnych dziedzinach nauki m.in. fizyki, chemii jak również w transporcie i logistyce, gdzie mówi się o potencjale systemu transportowego, potencjale technicznych czy ludzkim. W kontekście

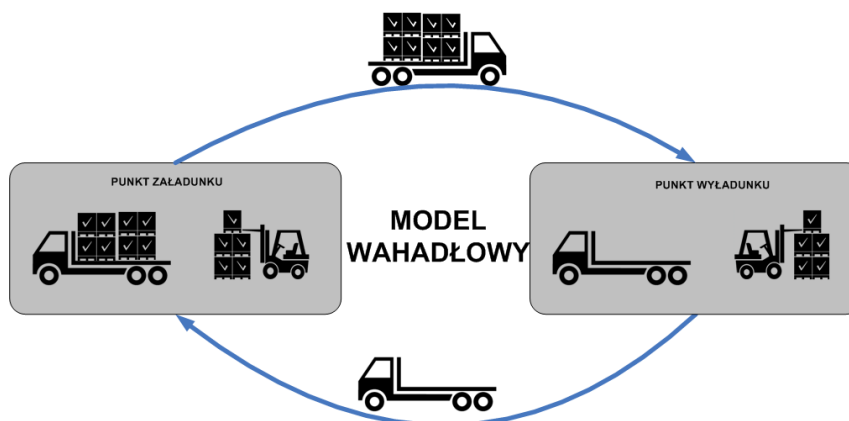
przemieszczania ładunków poprzez potencjał systemu przewozowego rozumie się zasoby: techniczne, ludzkie, informacyjne, finansowe.

Lonc [118] w celu zobrazowania zagadnienia przydziału posłużył się definicją: „Załóżmy, że pewna firma zatrudnia n pracowników oraz ma do wykonania m różnych prac. Każda z prac może być wykonana tylko przez tych pracowników, którzy mają odpowiednie kwalifikacje. Pytanie brzmi: czy można, a jeśli tak, to w jaki sposób, przydzielić pracowników do każdej z prac w ten sposób, aby każda praca była przydzielona tylko jednemu pracownikowi (który ma odpowiednie kwalifikacje) i każdy pracownik miał przydzieloną co najwyżej jedną pracę.”

Złożoność problematyki przydziału zależy w głównej mierze od złożoności struktury systemu transportowego. W przypadku systemów jednostopniowych problem ten sprowadza się do wyznaczenia trasy jazdy pojazdu między punktami nadania i punktami odbioru i przydzielenia do tej trasy pojazdu zgodnie z przyjętymi kryteriami. W przypadku systemów hierarchicznych głównym problemem jest wskazanie punktów pośrednich, tak aby spełniać jak najlepiej przyjęte kryteria doboru pojazdów do zadań.

Podczas przeglądu literatury dot. metod doboru pojazdów do zadań bardzo ważne okazały się modele organizacji przewozów w systemach transportowych [146]:

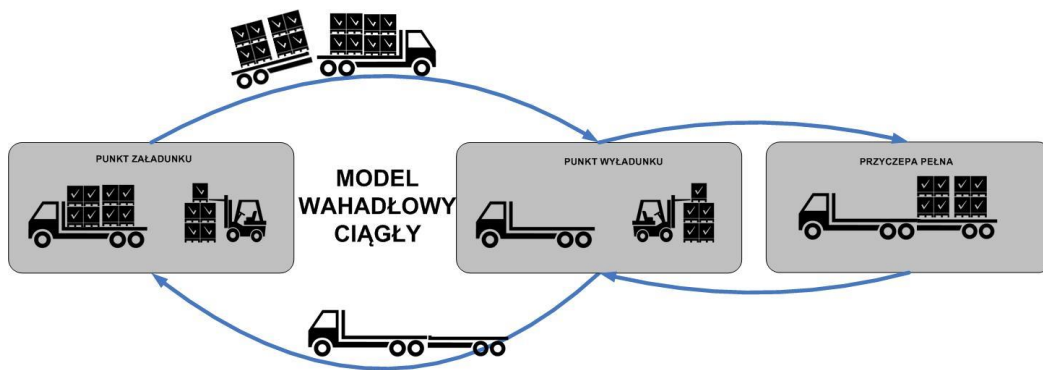
1. Model wahadłowy – najczęściej stosowany model organizacji przewozów. Środek transportu regularnie kursuje pomiędzy punktem załadunku, a punktem wyładunku. Ładunek jest bezpośrednio dostarczany do punktu odbioru, a środek transportu wraca do punktu załadunku w celu odebrania kolejnej partii ładunku. Model wahadłowy wykorzystywany jest do przewozu ładunków masowych. Wykorzystywane środki transportu charakteryzują się dużą ładownością. Schemat graficzny modelu wahadłowego organizacji przewozu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat graficzny modelu wahadłowego organizacji przewozu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [146].

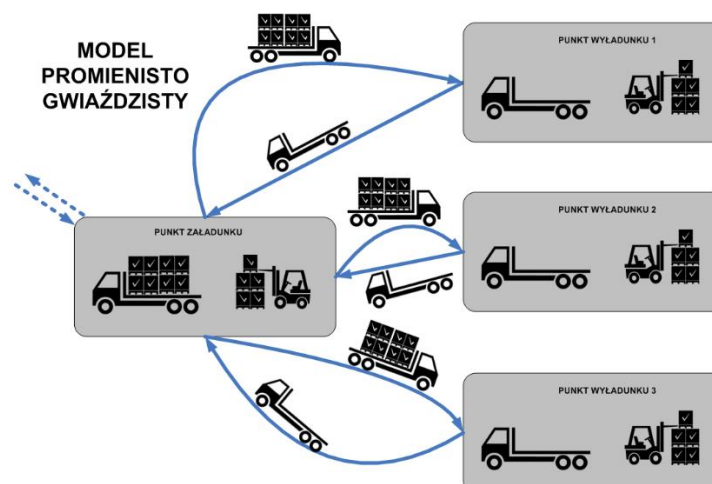
2. Model wahadłowo-ciągły – również często stosowany model transportu. Różni się od modelu wahadłowego relacją przewozu. Środek transportu dostarcza pełną lub pustą przyczepę bądź inne nadwozie wymienne nie czekając na załadunek czy rozładunek. Charakteryzuje się regularnością kursów i bezpośrednim przewozem. Głównym atutem jest ciągłość kursowania oraz większa liczba dostarczonych towarów. Schemat graficzny modelu wahadłowo-ciągłego organizacji przewozu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat graficzny modelu wahadłowo-ciągłego organizacji przewozu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [146].

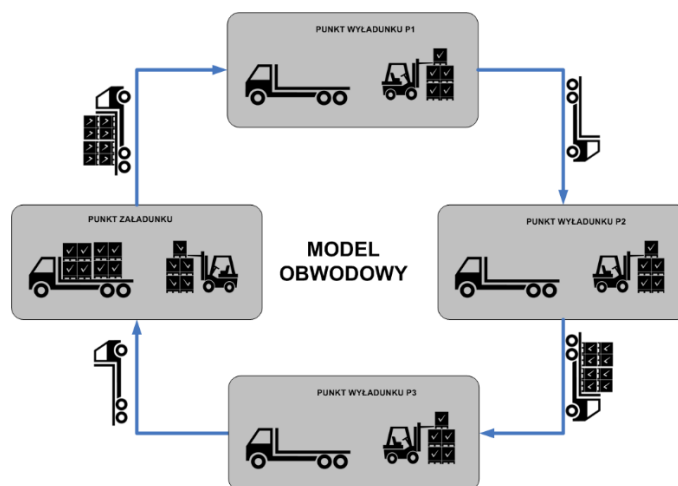
3. Model promienisto-gwiazdzysty – ładunek dostarczany jest z jednego miejsca załadunku do wielu miejsc wyładunku. Po dostarczeniu ładunku, środek transportowy wraca do bazy, a następnie kieruje się do kolejnego punktu odbioru, aż do momentu dostarczenia ładunków do wszystkich przypisanych w danym kursie klientów. Ładowność pojazdu zależy od masy przewożonego ładunku. Schemat graficzny modelu promienisto-gwiazdzystego organizacji przewozu przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat graficzny modelu promienisto-gwiazdzystego organizacji przewozu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [146].

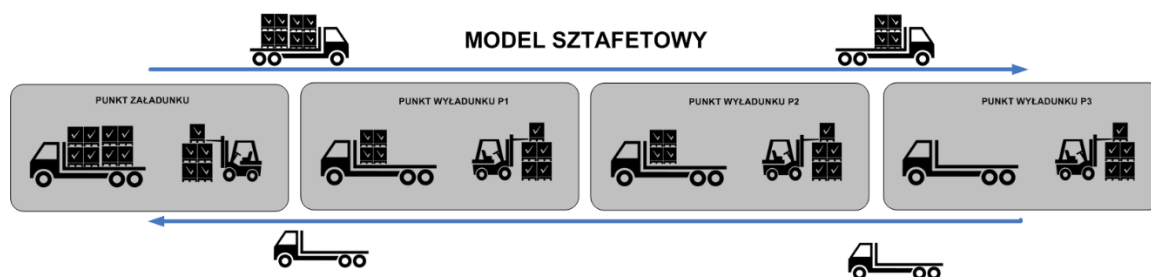
4. Model obwodowy – ładunek dostarczany jest do wielu klientów przy założeniu, że środek transportowy nie wraca do punktu załadunku, zabiera z niego ładunek i dostarcza go do kolejnych punktów wyładunku. Pusty środek wraca do punktu załadunku. Model obwodowy, używany najczęściej do ładunków drobnicowych, służy głównie minimalizacji kosztów transportu. Wykorzystywany jest najczęściej przez firmy kurierskie i dystrybucyjne. Schemat graficzny modelu obwodowego organizacji przewozu przedstawiono na rys. 5. Model obwodowy zastosowany został w dysertacji.



Rys. 5. Schemat graficzny modelu obwodowego organizacji przewozu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [146].

5. Model sztafetowy – model sztafetowy charakteryzuje się wieloma punktami przeładunkowymi. Ładunek dostarczany jest dużym transportem, następnie zostaje on przeładowany na mniejsze środki transportu. Wybór tego modelu pozytywnie wpływa na czas realizacji zamówienia, jak również koszty transportu. Schemat graficzny modelu sztafetowego organizacji przewozu przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Schemat graficzny modelu sztafetowego organizacji przewozu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [146].

Liczba odmian tego zagadnienia potwierdza, iż przedstawiana w pracy problematyka ma charakter wielopłaszczyznowy i można poszukiwać optymalnych rozwiązań z punktu widzenia różnych kryteriów np. minimalizacji czasu, minimalizacji drogi, lub liczby użytych pojazdów.

Kolejnym aspektem w zagadnieniu przydziału jest uwzględnienie elementów struktury systemu przewozowego, do których zalicza się [147]:

- strukturę przedstawiającą powiązania między punktami nadania i punktami odbioru zadań przewozowych (miejsca inicjujące powstawanie strumieni ładunków oraz miejsca, w których ten strumień zanika);
- charakterystyki elementów struktury przedstawiającej rzeczywiste właściwości elementów struktury (charakterystyki określone na węzłach i połączeniach sieci transportowej);
- zadania przewozowe wynikające z wielkości zapotrzebowania na usługi przewozowe zgłaszane przez nabywców usług przewozowych (stanowiące stronę popytu rynku – realizowanego lub przewidzianego do realizacji);
- organizację, rozumianą jako sposób dostosowania potencjału przewozowego danego systemu do realizacji zapotrzebowania na usługi przewozowe;
- potencjał, rozumiany jako wyposażenie systemu przewozowego wraz z ich charakterystykami przedstawiającymi odwzorowanie rzeczywistych właściwości potencjału.

Inną problematyką dotyczącą przydziału pojazdów do zadań jest obszar planowania dostaw m.in. w systemach dystrybucji, w których przydział odbiorców do baz magazynowych jest mocno powiązany z problemem wyznaczania tras pojazdów. W literaturze dostępnych jest wiele metod przydziału odbiorców do baz magazynowych, przy czym do tych najczęściej stosowanych przy okazji problemu wyznaczania tras pojazdów zalicza się:

- przydział odbiorców najpilniejszych [18];
- przydział cykliczny [66];
- przydział do klastrów (zbiorów odbiorców) [66];
- przydział z wykorzystaniem zadania transportowego [22] – algorytm przydziału wykorzystujący idee zadania transportowego jest wykorzystywany w sytuacji, gdy pojedynczy odbiorca zaopatrywany jest przez jedną z baz magazynowych scharakteryzowanych wielkością podaży towaru; dodatkowo znane są koszty transportu jednostki towaru między danym odbiorcą, a którąkolwiek bazą.

W najprostszej formie problem trasowania pojazdów jest rozwinięciem problemu komiwojagera o wielokrotną liczbę pojazdów oraz ich ładowność. Wynika to z rzeczywistych problemów jakie pojawiają się podczas wyznaczania tras przejazdu dla pojazdów. Poza liczbą i ładownością pojazdów pojawiającymi się przy okazji wyznaczania tras pojazdów pod uwagę należy wziąć m.in.:

- parametry techniczne pojazdów, które mogą wpłynąć na przydział zadania np. mogą dotyczyć pojemności pojazdów;
- niesymetryczność kosztów transportu, tzn. koszt transportu z punktu A do punktu B nie musi się równać kosztowi transportu z punktu B do punktu A;
- czas realizacji zadania może być ograniczony innym czasem np. czasem pracy kierowcy czy okna czasowe odbiorców;
- różną liczbę punktów nadania z różną liczbą pojazdów i ich różnym typem.

Dodatkowo przy wyznaczaniu tras pojazdów można wziąć pod uwagę utrudnienia w ruchu drogowym, które GDDKiA klasyfikuje w następujący sposób [63]:

- występowanie objazdu;
- ograniczenie nośności;
- ograniczenie nacisków na pojedynczą oś;
- ograniczenie skrajni pionowej;
- ograniczenie szerokości;
- ograniczenie prędkości;
- występowanie ruchu wahadłowego;
- występowanie sygnalizacji świetlnej;
- awaria mostu;
- występowanie ruchu dwukierunkowego.

Przedstawione zagadnienia stanowią wg Autorki najważniejsze aspekty problematyki doboru pojazdów do zadań. W dalszej części pracy szczegółowo przedstawione zostaną wybrane modele problemu przydziału (*ang. Assignment problem*).

1.3. Problematyka wyznaczania tras pojazdów

Następnym elementem doboru pojazdów do zadań jest problematyka wyznaczania optymalnych tras przejazdu w sieci transportowej. Analiza struktury sieci transportowej jest zagadnieniem bardzo złożonym. Istnieje wiele miar charakteryzujących konfigurację sieci w różny sposób, w zależności od celu badań [172]. Zagadnienie to było analizowane jeszcze

przed wynalezieniem pojazdu o napędzie spalinowym. Według N. Biggsa [17], praca L. Eulera mówiąca o zagadnieniu mostów królewieckich, rozważająca możliwość jednokrotnego przejścia przez każdy most w Królewcu, dała początek nowemu działowi matematyki – teorii grafów. W planowaniu tras przejazdów stosuje się jednakże szereg różnych algorytmów, których różnorodność zależy od rodzaju określonego zadania. Na wybór metody wpływ ma m.in. [10]:

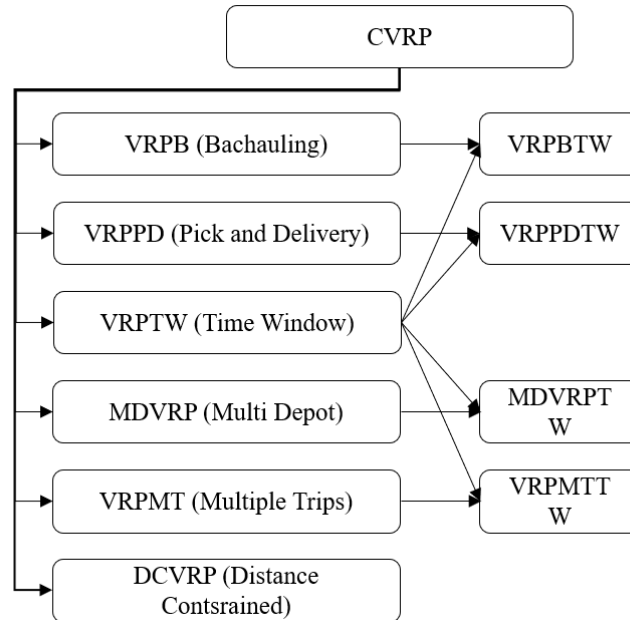
- złożoność obliczeniowa problemu – czasowa i pamięciowa, na którą składa się m.in. liczba ograniczeń, rodzaj relacji między elementami, wielkość zbioru danych;
- poprawność uzyskiwanego rozwiązania – wynik jest zawsze poprawny, niezależnie od konfiguracji danych wejściowych;
- optymalność – złożoność obliczeniowa jest najprostsza z możliwych;
- efektywność – metoda jest praktyczna w użyciu.

Wyznaczanie trasy przejazdu jest problemem stricte logistycznym i jako problem ma postać zadania optymalizacyjnego. Przez optymalizację rozumie się tutaj poszukiwanie najlepszego ze wszystkich możliwych, rozwiązania zwanego optimum globalnym. Zdarza się, że zagadnienia są na tyle skomplikowane, iż ujęcie ich w formie tradycyjnego modelu matematycznego jest niemożliwe. W takich sytuacjach poszukuje się rozwiązania quasi-optymalnego, możliwym do uzyskania w rozsądnym przedziale czasu. W przypadku nieznajomości analitycznej postaci funkcji celu, określenie bliskości uzyskanego rozwiązania i rozwiązania optymalnego jest niemożliwe. Dla wielu zadań optymalizacyjnych nie istnieją dostatecznie dokładne algorytmy optymalizujące, co generuje potrzebę rozwiązywania zadania metodami heurystycznymi.

Problem wyznaczania tras pojazdów przy kryterium minimalizacji kosztów jest przedmiotem szeregu opracowań zarówno w literaturze polskiej jak zagranicznej (*ang. Vehicle Routing Problem VRP*) [6], [7], [31], [32], [207]. Jest on rozwinięciem jednego z najstarszych problemów optymalizacyjnych na sieciach – problemu komiwojażera (*ang. Traveling Salesman Problem TSP*). Problem z trasowaniem pojazdów jest problemem programowania całkowitoliczbowego [1], który należy do kategorii problemów NP-trudnych [115].

Pierwszy model CVRP (*ang. Capacitated Vehicle Routing Problem*) został zaproponowany przez Dantzig i inni w 1954 r. [40]. Standardowy VRP zakłada, że pojazdy opuszczają wspólny magazyn i wracają do tego magazynu. W 1969 roku Tillman [185] przedstawił problem z trasowaniem pojazdów w wielu zajezdniach (*ang. Multi-depot Vehicle Routing Problem – MDVRP*). Kolejnym ważnym rozszerzeniem problemu VRP była praca

Russella w 1977 [154] wprowadzającą problem wyznaczania tras przejazdu z oknami czasowymi (*ang. Vehicle Routing Problem with Time Windows – VRPTW*). W takim przypadku klienci muszą być odwiedzani w określonych odstępach czasu. Inne warianty CVRP przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Warianty CVRP

Źródło: opracowanie własne na podstawie [27].

Takie problemy mogą być dodatkowo wzbogacone rzeczywistymi ograniczeniami, takimi jak maksymalna liczba punktów, które można dodawać/usuwać na jednej trasie i maksymalna odległość między zajezdnią, a najdalszym punktem trasy. Zagadnienia te nazywane są *ang. Rich VRP*.

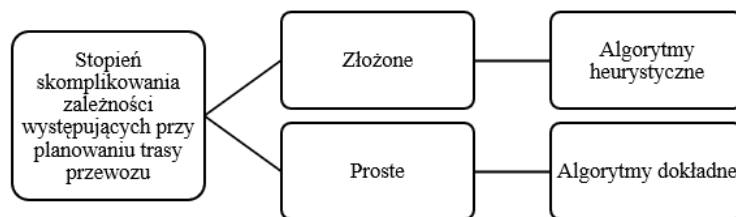
Przez ostatnie 50 lat w wielu publikacjach naukowych rozważano główne warianty VRP. Zaproponowano zarówno podejście dokładne, jak i heurystyczne, m.in.:

- pojemnościowego CVRP [112],[188];
- VRP z oknami czasowymi VRPTW [174], [175], [176], [177], [154];
- multi-depot VRP MDVRP [131],[183];
- VRP z backhauls VRPB [45];
- otwarty VRP OVRP [21], [158];
- problem odbioru i dostawy VRPPDP [15];
- wielokrotne przejazdy VRP VRPMT [9], [71], [202];
- VRP zależny od miejsca SDVR [34].

Pełny przegląd stanu wiedzy na temat VRP znajduje się w publikacji Totha i Vigo [188]. Obszerny przegląd zarówno metod konstrukcji, jak i podejść heurystycznych można znaleźć w np. W Golden 2008 [71], Yihan LIU 2017 [205]. Zagadnienie VRP wpisuje się w problematykę przedstawioną w pracy, gdyż zaproponowana metoda zawiera elementy doboru pojazdów do zadań i wyznacza trasy przejazdu tych pojazdów.

Kluczowym etapem w procesie przygotowania przejazdu jest jednak wyznaczenie prawidłowej trasy przejazdu. Rozwiązania takie, jak AutoMapa czy Google Maps, których działanie opiera się o algorytmy oparte o Algorytm A* z uzupełnieniem o różnego rodzaju heurystyki i optymalizacje [44].

Do wyznaczania optymalnej trasy przejazdu wyróżnia się dwa rodzaje metod: dokładne i przybliżone [125]. W przypadku metod dokładnych bazują one w oparciu o teorię grafów i zwracają rozwiązanie optymalne, jednakże nie są skuteczne przy wielowariantowych zależnościach. Wtedy stosuje się metody przybliżone, których rezultatem jest rozwiązanie bliskie optymalnemu [89], [186]. Podział algorytmów wyznaczających trasy przejazdu ze względu na stopień skomplikowania występujących zależności przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Podział użyteczności algorytmów ze względu na stopień skomplikowania zależności występujących przy planowaniu tras

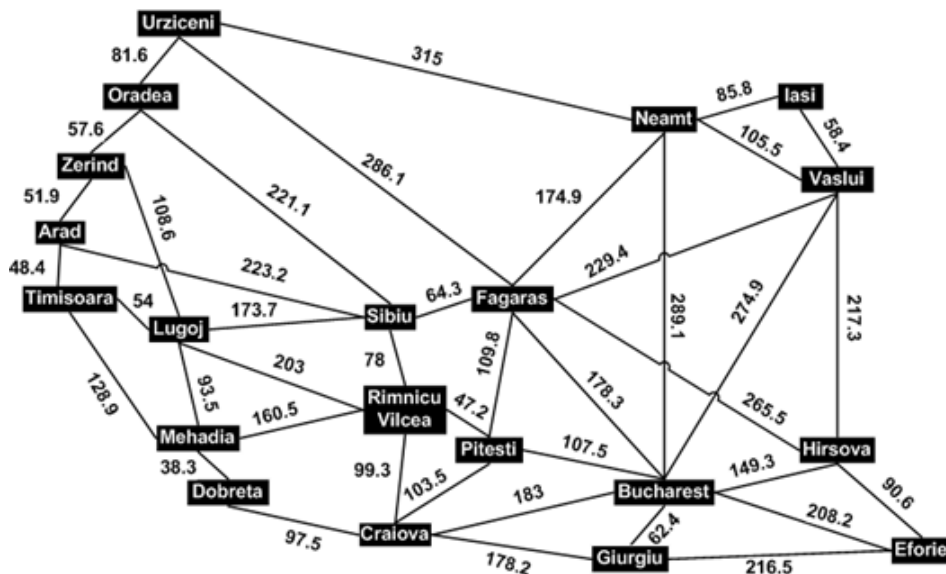
Źródło: opracowanie własne na podstawie [193].

W pracy [192] dokonano analizy SWOT narzędzi do wyznaczania tras dla ładunku wrażliwego na przykładzie transportu chłodniczego, z której wynika iż algorytmy heurystyczne i algorytmy dokładne mają swoje zastosowanie w zależności od obranych kryteriów. Algorytmy heurystyczne uzyskują rozwiązanie dalekie od optymalnego, jednakże wraz ze wzrostem skomplikowania problemu są bardziej użyteczne. Przydatność algorytmów dokładnych maleje wraz ze skomplikowaniem problemu. Nie każdy problem transportowy NP-trudny wymaga zastosowania tego rodzaju heurystyki.

Graf jest zbiorem łuków i węzłów odwzorowującym drogi i skrzyżowania (punkty w sieci) między nimi. Na teorii grafów bazują m.in. zagadnienia optymalizacyjne, odzwierciedlające rzeczywiste transportowe problemy decyzyjne. Graf będący strukturą

matematyczną przedstawiającą relacje pomiędzy obiektami, doskonale sprawdza się jako odwzorowanie liniowej infrastruktury transportowej wraz z jej mierzalnymi właściwościami [107].

Każdy z węzłów jest unikalny i połączony jest fizycznie z co najmniej jednym innym węzłem poprzez jeden lub dwa łuki posiadające cechy fizyczne [168]. Do takich cech zalicza się m.in.: czas przejazdu, odległość fizyczną, stan techniczny czy koszt podróży, itp. Odwzorowanie za pomocą grafu sieci transportowej na przykładzie sieci drogowej Rumunii przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Odwzorowanie za pomocą grafu sieci transportowej na przykładzie sieci drogowej Rumunii

Źródło: opracowanie własne na podstawie [119].

Różnorodność problemów transportowych wymusiła na badaczach dalszą analizę zagadnień, tj. problemu komiwojażera i wynikających z niego problemów marszrutyzacji czy problemu najkrótszej ścieżki.

W zależności od rodzaju sieci oraz założeń teoretycznych swoje rozwiązania zaproponowali m.in. E. W. Dijkstra [47], L. R. Ford [60], Bellman R. [12], G. B. Dantzig [39], M. L. Fredman, R. & E. Tarjan [62], M. Thorup [184].

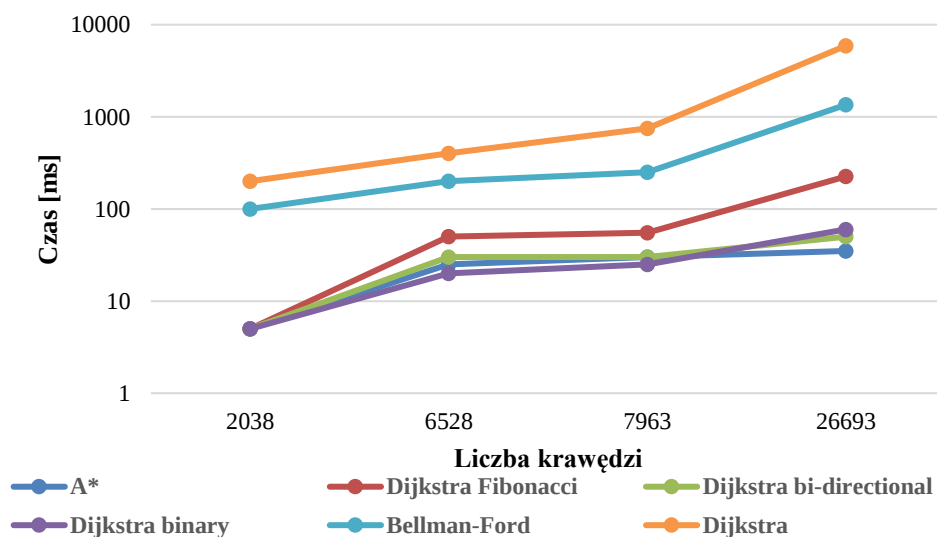
Każdą odwzorowaną za pomocą grafu sieć drogową można przeszukać w taki sposób, aby dokonać wyznaczenia optymalnej trasy przejazdu pomiędzy dowolnymi punktami. Przeszukiwanie grafu (sieci) jest zagadnieniem szeroko analizowanym w literaturze polskiej i zagranicznej.

W przypadku złożonych problemów decyzyjnych, często posiadających rozbudowane bazy danych zastosowanie znajdują heurystyki. Heurystyką nazywa się taką metodę znajdowania rozwiązań, która nie daje rozwiązania optymalnego, a w wielu przypadkach prawidłowego [127]. Takie podejście znajduje zastosowanie w przypadku, gdy algorytm jest nieznany, lub nie ma możliwości uzyskania rozwiązania optymalnego przy zastosowaniu algorytmu dokładnego [68]. Celem wykorzystania metod heurystycznych jest znalezienie rozwiązania zbliżonego do najlepszego. Zagadnienie wyboru trasy z zastosowaniem algorytmów złożonych analizowane było w pracach m.in. M. Dorigo & L.M. Gambardelli [48], A. K. M. Masumy [122].

W celu znalezienia najlepszego rozwiązania dla zadania optymalizacyjnego stosuje się metody heurystyczne. Złożoność problemu odnajdywania najkrótszej drogi w grafie oceniana jest na $\Theta(n^2)$, w przypadku problemu komiwojażera algorytm reprezentuje złożoność na poziomie $\Theta(n!)$

Czas znalezienia rozwiązania optymalnego dla algorytmów dokładnych jest interesujący z punktu widzenia wyboru algorytmu przeszukiwania. W pracy badawczej D. Ostrowskiego, I. Pozniak-Koszalki, L. Koszalki i A. Kasprzaka porównano algorytmy najczęściej wykorzystywane w systemach nawigacji satelitarnej GPS, tj. [136]: algorytm A* (A-star), algorytm Bellmana – Forda; algorytm Dijkstry (wraz z odmianami).

Na wyk. 10 przedstawiono warianty algorytmów dla przedziału od 0 do 26 693 krawędzi w sieci odwzorowującej topologię ulic Wrocławia.



Wyk. 10. Porównanie szybkości działania algorytmów dokładnych w zależności od liczby krawędzi w sieci

Źródło: [136].

Z przedstawionego rysunku wynika, iż w zależności od liczby krawędzi w sieci te same algorytmy uzyskują inne czasy odnajdywania najkrótszej drogi. Istnieje również zasadnicza różnica w czasie między poszczególnymi algorytmami.

Algorytm Dijkstry zaliczany jest do dokładnych algorytmów przeszukiwania sieci. Algorytm Dijkstry dokonuje przeszukania grafu, w taki sposób aby wyznaczyć najkrótsze możliwe ścieżki pomiędzy punktem początkowym, a punktem końcowym, wyznaczając przy tym koszt przejścia każdą z tych ścieżek. Algorytm Dijkstry może występować w kilku wersjach, które różnią się przede wszystkim implementacją tzw. Kolejki priorytetowej [171], na którą istotny wpływ ma specyfika przeszukiwanej sieci np. gęstość sieci (stosunek liczby krawędzi do największej możliwej liczby krawędzi w sieci). W literaturze najczęściej wyróżnia się odmiany algorytmu Dijkstry:

- z nieposortowaną tablicą kluczy (tzw. Naiwny) [91];
- z kopcem binarnym [204];
- z kopcem Fibonacciego [171], [135];
- symetryczny (dwukierunkowy) [41].

Symetryczne algorytmy planowania trasy zakładają jednoczesne przeszukiwanie grafu od wierzchołka początkowego s do wierzchołka końcowego t i odwrotnie tzn. iż kluczowe dla tych algorytmów jest założenie symetrycznego wzrostu obu obszarów przeszukiwań, a w konsekwencji „spotkanie” w połowie najkrótszej drogi z s do t (dwukierunkowy algorytm Dijkstry w kolejnych iteracjach dodaje do zbioru $S1$ wierzchołki, których najkrótsza droga do wierzchołka startowego jest znana oraz do zbioru $S2$ z wyznaczoną najkrótszą odległością do wierzchołka końcowego; ustawianie etykiety wierzchołkom najbliższym źródłu lub celu gwarantuje, że w momencie wyboru takiego wierzchołka w , że $w = \min\{Q1\}$ i $w \in S2$ lub takiego, że $w = \min\{Q2\}$ i $w \in S1$ droga powstała z połączenia drogi z s do w z drogą z w do k będzie najkrótszą drogą z s do k [134].

W publikacjach [41], [134], [49] przedstawiono, iż algorytm Dijkstra symetryczny uzyskuje najlepsze czasy przeszukania sieci, a tym samym znalezienia najlepszej rozwiązania. Z tego względu na potrzeby realizacji rozprawy doktorskiej wykorzystano algorytm Dijkstry symetryczny (dwukierunkowy).

Optymalizacja systemów złożonych była przez wiele lat ograniczona do problemów, które można było sformułować jako liniowe, nieliniowe i całkowite programy matematyczne. Heurystyki specyficzne dla danego problemu, które nie wymagają heurystyki, które nie wymagają matematycznego sformułowania problemu, były również wykorzystywane do optymalizacji systemów złożonych, jednak na ogół muszą być one opracowywane

indywidualnie dla każdego przypadku. Postępy w dziedzinie metaheurystycznej optymalizacji w połączeniu z ulepszonymi środowiskami obliczeniowymi postawiły ambitny cel zbudowania uniwersalnych optymalizatorów tzw. „czarnych skrzynek” stał się osiągalny [110]. Np. silnik optymalizacyjny OptQuest firmy OptTek łączy algorytmy wyszukiwania tabu (*ang. Tabu search*), wyszukiwania rozproszonego (*ang. Scatter search*), programowania całkowitoliczbowego (*ang. Integer programming*) i sieci neuronowych (*ang. Neural network*).

Optymalizatory typu black box mają długą tradycję w dziedzinie badań operacyjnych. Procedury te traktują ocenę funkcji celu jak czarną skrzynkę i nie wykorzystują specyficznej struktury problemu. Optymalizatory czarnej skrzynki są również określane jako procedury niezależne od kontekstu, jednak pojęcie niezależności od kontekstu jest trudniejsze do zdefiniowania, ponieważ żaden solver nie jest całkowicie niezależny od kontekstu [72]. Na przykład, niektóre solvery mogą nie mieć informacji o strukturze funkcji celu, ale mają informacje dotyczące obszaru wykonalności określonego przez zbiór ograniczeń. W przypadku podejść programowania matematycznego, takich jak programowanie liniowe, solvery mają bardzo specyficzną strukturę, którą wykorzystują (nawet jeśli „nie wiedzą” czy rozwiązują problem transportu, czy problem planowania produkcji) [72].

Wyszukiwanie rozproszone (*ang. Scatter search*), jest metaheurystyką populacyjną stosowaną w optymalizacji. Została ona zastosowana do problemów z ciągłymi i dyskretnymi zmiennymi oraz z jednym lub wieloma celami. Wyszukiwanie rozproszone składa się z pięciu metod [111]:

- generowania dywersyfikacji służy do generowania zbioru zróżnicowanych rozwiązań, które są podstawą do inicjalizacji poszukiwań;
- ulepszania – przekształca rozwiązanie w celu poprawy jakości (zwykle mierzonej wartością funkcji celu) lub wykonalności (zwykle mierzonej pewnym stopniem naruszenia ograniczeń);
- aktualizacji zbioru referencyjnego – odnosi się do procesu budowania i utrzymywania zbioru rozwiązań, które są łączone w głównej pętli iteracyjnej każdej implementacji wyszukiwania rozproszonego;
- generowania podzbiorów – tworzy podzbiory rozwiązań referencyjnych, które stają się danymi wejściowymi do metody kombinacji;
- łączenia rozwiązań – wykorzystuje dane wyjściowe z metody generowania podzbiorów do tworzenia nowych rozwiązań próbnych.

Technologie optymalizacyjne w OptQuest obejmują zarówno katalog procedur wyszukiwania, jak i odrębny katalog metod generowania rozwiązań. Główna procedura

optymalizacyjna oparta jest na poszukiwaniu rozproszonym. W celu uzupełnienia domyślnych mechanizmów wyszukiwawczych dołączone są również następujące technologie:

- projektowanie eksperymentów (*ang. Design of Experiments*);
- entropia krzyżowa (*ang. Cross entropy*);
- algorytmy genetyczne (*ang. Genetic algorithms*);
- optymalizacja rojem cząstek (*ang. Particle swarm optimization*);
- symultaniczna aproksymacja stochastyczna z perturbacją (*ang. Simultaneous perturbation stochastic approximation*);
- programowanie liniowe i mieszane programowanie całkowite (*ang. Linear and mixed integer programming*);
- wyliczanie zupełne (*ang. Complete enumeration*).

Z uwagi na rosnącą kompleksowość problemów nie ma gwarancji, że optymalne trasy zostaną znalezione we właściwym czasie obliczeniowym. Rzeczywiste problemy są znacznie większe, ponieważ wiele firm musi zaopatrywać tysiące klientów z dziesiątek magazynów w liczne pojazdy i podlega różnym dodatkowym ograniczeniom. W przypadku takich problemów zwykle nie jest możliwe znalezienie żadnego realnego rozwiązania, podczas gdy w praktyce rozwiązanie tego problemu powinno być znalezione stosunkowo szybko i powinno być stosunkowo bliskie rozwiązaniu optymalnemu. Stąd w literaturze można znaleźć wiele różnych rozwiązań wykorzystujących metody heurystyczne i meta heurystyczne w połączeniu z metodami inteligencji obliczeniowej.

1.4. Sieci neuronowe w logistyce

Dynamiczny rozwój technologii powoduje, iż sztuczna inteligencja (*ang. Artificial Intelligence – AI*) wkracza w każde obszary i dyscypliny naukowe. To stwierdzenie dotyczy również segmentu logistyki i szeroko rozumianego transportu. Wszędzie tam, gdzie nie ma podstaw do aproksymacji liniowej występujących zjawisk i procesów, modele linowe nie sprawdzały się, prowadząc niekiedy do formułowania niesłusznych opinii o całkowitym braku możliwości matematycznego opisywania systemów. W takich przypadkach, przy rozwiązywaniu trudnych i kłopotliwych zagadnień, najszybszym i najwygodniejszym sposobem rozwiązania problemu może być odwołanie się do sieci neuronowych (a więc modeli, które odwzorowują zależności nieliniowe) [182]. W literaturze można odnaleźć wiele przykładów zastosowania sieci neuronowych w transporcie, np. do oceny jakości

usług transportowych [179], do oceny ryzyka w transporcie [181], do predykcji natężenia ruchu [138] itp.

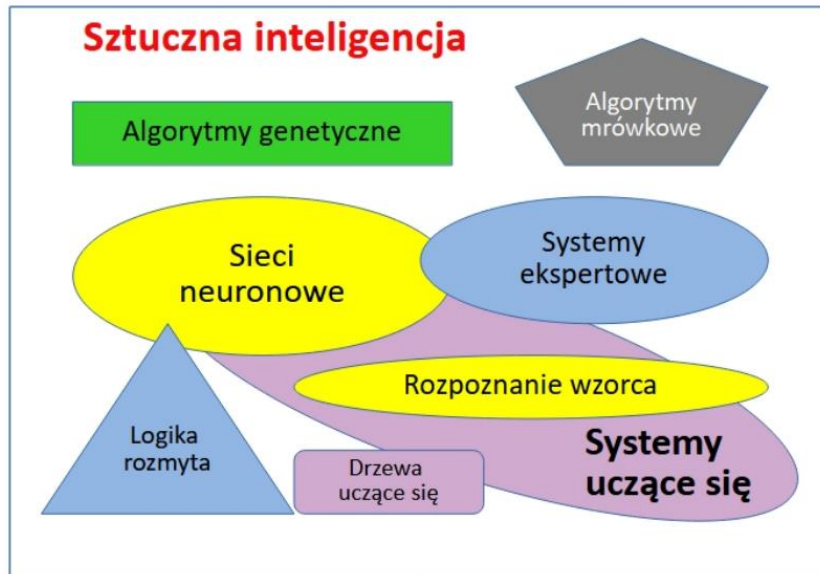
Jednym z przykładów sztucznej inteligencji w transporcie jest wykorzystanie pojazdów autonomicznych lub samochodów samojezdnych. Pojazdy te są wyposażone w zaawansowane systemy sztucznej inteligencji, które umożliwiają im postrzeganie otoczenia, podejmowanie decyzji i nawigację bez interwencji człowieka.

Algorytmy sztucznej inteligencji przetwarzają dane zebrane z czujników. Modele uczenia maszynowego są szkolone na ogromnych ilościach danych w celu rozpoznawania wzorców, przewidywania działań innych użytkowników dróg i podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym. Algorytmy decyzyjne biorą pod uwagę takie czynniki, jak pogoda, warunki drogowe, znaki drogowe i zachowanie innych kierowców, aby określić odpowiednie działania dla pojazdu.

Sztuczna inteligencja jest wykorzystywana do planowania trasy i optymalizacji ścieżki dla pojazdu. Bierze pod uwagę warunki drogowe w czasie rzeczywistym, zamknięcia dróg i inne dynamiczne czynniki, aby zapewnić wydajną i bezpieczną podróż.

Systemy nawigacji GPS w połączeniu ze sztuczną inteligencją zapewniają dokładne i aktualne informacje o lokalizacji pojazdu i celu podróży.

Integracja sztucznej inteligencji w transporcie ma na celu poprawę bezpieczeństwa, zmniejszenie liczby wypadków drogowych, zwiększenie wydajności i poprawę ogólnej mobilności. W miarę postępu technologicznego możemy spodziewać się dalszych innowacji w systemach transportowych opartych na sztucznej inteligencji. Rys. 10 przedstawia różne rodzaje systemów sztucznej inteligencji.

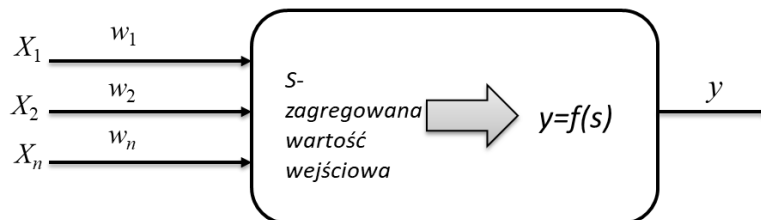


Rys. 10. Mapa sztucznej inteligencji

Źródło:[81].

W pracy zastosowano sieci neuronowe do prognozy popytu, dlatego w dalszej części pracy skupiono się na ich szczegółach.

Istota modelowania neuronowego polega na poszukiwaniu modelu matematycznego, wykorzystując sygnały wejściowe $x_1, x_2, \dots, x_n$ każdego neuronu i przypisane im wagi $w_1, w_2, \dots, w_n$, celem poszukiwania sygnału wyjściowego y (rys. 11).



Rys. 11. Model neuronu

Źródło: [132].

Twórcy sztucznych sieci neuronowych zdefiniowali sztuczny neuron wg założeń [178]:

- do neuronu dociera pewna liczba sygnałów (wartości) wejściowych $u_1, u_2, \dots, u_n$;
- każda wartość wprowadzana jest do neuronu przez połączenie o pewnej sile (wadze) $w_1, w_2, \dots, w_n$; wagi te odpowiadają efektywności synapsy w neuronie biologicznym;
- każdy neuron posiada również pojedynczą wartość progową, określającą jak silne musi być jego pobudzenie, by doszło do zapłonu;
- w neuronie obliczana jest ważona suma wejść (tzn. suma wartości sygnałowych wejściowych przemnożonych przez odpowiednie współczynniki wagowe);

- sygnał reprezentujący łączne pobudzenie neuronu przekształcany jest z kolei przez ustaloną funkcję aktywacji neuronu (która określana jest również niekiedy jako funkcja przejścia neuronu); wartość obliczona przez funkcję aktywacji jest ostatecznie wartością wyjściową (sygnałem wyjściowym) neuronu.

Struktura sieci neuronowej zależy od sposobu łączenia ze sobą poszczególnych neuronów sieci. Elementem wspólnym wszystkich sieci są:

- sygnały wejściowe – zawierają informację, która jest przetwarzana przez sieć;
- sygnały wyjściowe – zawierają wynik obliczeń.

Liczba sygnałów wejściowych i wyjściowych jest zależna od zbioru posiadanych danych i liczby pożądanых informacji. Wpływ na strukturę sieci ma zarówno liczba warstw sieci, jak również liczba neuronów w poszczególnych warstwach sieci. Od struktury sieci zależy również tryb jej uczenia. Często wyróżnia się cztery tryby uczenia [13]:

- uczenie nadzorowane (*ang. Supervised learning*) – bazuje na cechach obiektów zidentyfikowanych i oznaczonych przez człowieka; algorytmy uczenia nadzorowanego są niezwykle wydajne, ale ręczne etykietowanie danych bywa czasochłonne i kosztowne;
- uczenie nienadzorowane (*ang. Unsupervised learning*) – pozwala na pracę z danymi bez etykietowania (istotne cechy są określane automatycznie w ramach pracy algorytmów), zazwyczaj jest jednak mniej precyzyjne i wydajne niż uczenie nadzorowane;
- uczenie częściowo nadzorowane (*ang. Semi-supervised learning*) – korzysta zarówno z danych etykietowanych, jak i nieetykietowanych, łącząc w sobie zalety i wady dwóch pierwszych podejść;
- uczenie ze wzmocnieniem (*ang. Reinforcement learning*) – używa danych nieetykietowanych, bazując na informacji zwrotnej otrzymywanej ze środowiska podczas kolejnych podejść do rozwiązywania problemu metodą prób i błędów; mechanizm wzmocnienia (nagrody) jest tu analogiczny do występującego w świecie zwierzęcym, dzięki czemu algorytm może odnotować, że wykonał krok w kierunku suboptymalnego rozwiązania.

W pracy zastosowano tryb uczenia nadzorowanego, dla którego wyodrębniono zbiór danych (10 % zgromadzonych danych historycznych), które były bezpośrednio wykorzystywane w trakcie uczenia się sieci neuronowej.

W literaturze zdefiniowanych jest wiele algorytmów uczenia sieci. Do najbardziej powszechnych m.in. zaliczono [155]:

- algorytm wstecznej propagacji błędu;
- algorytm zmiennej metryki;
- algorytm Levenberga – Marquardta;
- rekurencyjna metoda najmniejszych kwadratów;
- algorytm WTA (*ang. Winner take all*);
- algorytmy WTM (*ang. Winner take more*);

z których najczęściej wykorzystywanym jest algorytm wstecznej propagacji błędu opracowany przez Rumelharta 1986 r., który uczy sieci jednokierunkowe wielowarstwowe.

Sztuczne sieci neuronowe można podzielić na [116]:

- nierekurencyjne, gdzie neurony są zazwyczaj zorganizowane w tzw. warstwy;
- rekurencyjne, gdzie wyjścia pewnych neuronów są zwrotnie wprowadzane na wejścia innych neuronów;
- samoorganizujące, gdzie struktura neuronów „układa się” tak, aby odzwierciedlać cechy otoczenia;
- pamięci asocjacyjne (skojarzeniowe), gdzie struktury rekurencyjne są stosowane do zapamiętywania informacji w stanie ustalonym sieci.

Sieci neuronowe mają wiele istotnych właściwości, w tym m.in. [116]:

- adaptacyjność, to znaczy zdolność do uczenia się przez dostosowanie parametrów i struktury sieci do zmian otoczenia;
- uogólnienie, czyli zdolność wypracowania rozsądnych decyzji w sytuacjach, z którymi sieć nie miała dotychczas styczności;
- równoległość obliczeń, czyli w przeciwieństwie do komputera z architekturą von Neumanna, gdzie instrukcje są wykonywane jednocześnie przez dużą liczbę połączonych wzajemnie jednostek – neuronów;
- nieliniowość, rozumiana jako zdolność modelowania nieliniowych zależności wyjściowo-wejściowych przez sieć;
- odporność na błędy, czyli zdolność działania mimo pewnych uszkodzeń sieci oraz także zdolność uczenia się na podstawie danych błędnych, niepełnych, rozmytych i nieprecyzyjnych;
- nie wymagają programowania, tzn. wystarczy stworzyć sieć, która uczy się sama i umiejętnie sterować procesem uczenia.

Z drugiej strony zalety sieci neuronowych generują wady, do których zaliczono:

- brak możliwości wygenerowania jasnych i precyzyjnych wyników, gdyż sieć neuronowa posługuje się pojęciami rozmytymi, tzn. duży, mały, średni itd.;
- sieci neuronowe nie sprawdzają się w problemach wieloetapowych, gdy w kolejnym kroku należy wykorzystać wynik z poprzedniego etapu.

W dysertacji wykorzystano sieci neuronowe do prognozy popytu. Na podstawie zgromadzonych danych historycznych z okresu 24 miesięcy pochodzących od operatora logistycznego (badanego dla potrzeb pracy przedsiębiorstwa) przeprowadzono proces uczenia sieci. Szczegóły tego procesu oraz wyniki przedstawiono w dalszej części pracy.

2. OGÓLNE SFORMUŁOWANIE PROBLEMU DOBORU POJAZDÓW DO ZADAŃ TRANSPORTOWYCH

2.1. Wprowadzenie do modelowania

Jedną z głównych części pracy jest modelowanie matematyczne, tj. opracowanie modelu matematycznego uwzględniającego prognozowanie doboru pojazdów do zadań transportowych na podstawie zgromadzonych danych historycznych, a następnie opracowanie modelu symulacyjnego do przeprowadzenia symulacji komputerowej. Fakt ten stanowi zatem przesłankę do omówienia podstawowych zagadnień związanych z ww. pojęciami.

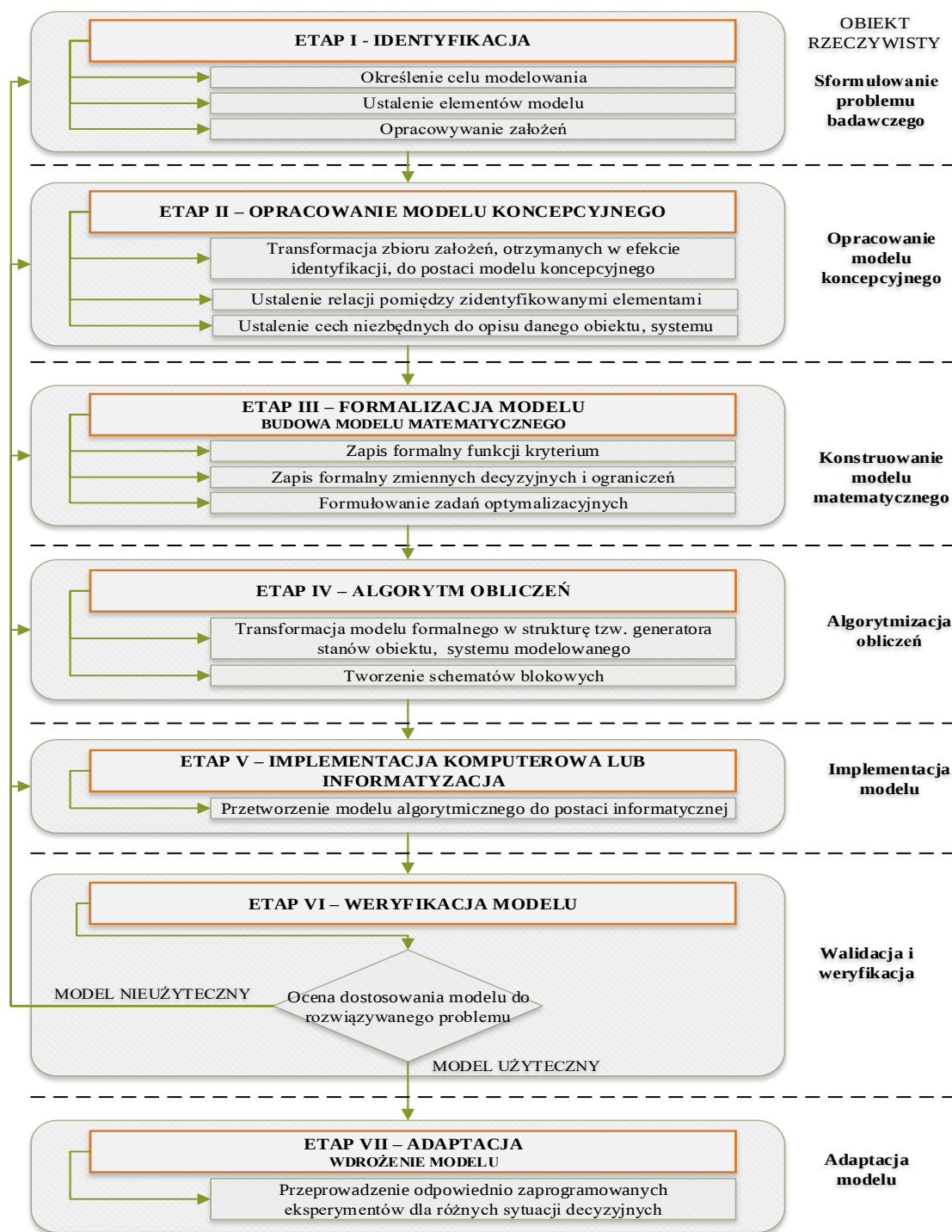
W literaturze przedmiotu badań istnieje wiele definicji modelu i modelowania. Model jest pojęciem bardzo ogólnym, stosowanym często w różnych dziedzinach w sposób daleko niejednoznaczny [76], [87]. W naukach ścisłych model stanowi narzędzie umożliwiające analizę, ocenę i projektowanie dowolnego systemu, w tym także systemu transportowego [87], [187], [200], [207].

W nauce model jest rozumiany jako uproszczona, celowo, reprezentacja rzeczywistości. Model, jest to reprezentacja badanego zjawiska w postaci innej niż postać, w jakiej występuje ono w rzeczywistości [64]. Model jest ilościową i jakościową reprezentacją zawierającą podstawowe cechy badanego obiektu, istotne z punktu prowadzonych na nim badań [26], [76], [143].

Według autorów [8], [143] model, to układ, który odzwierciedlając lub odtwarzając przedmiot badania, zdolny jest zastępować go tak, że jego badanie dostarcza nowej informacji o tym przedmiocie. Natomiast autorzy [17] definiują model jako złożony obiekt, również abstrakcyjny, będący odwzorowaniem szerszego, istniejącego lub projektowanego fragmentu rzeczywistości, umożliwiający poznanie go, zbadanie lub ustalenie zakresu jego zastosowania, przydatności. Modelowanie matematyczne to proces, którego rezultatem, w wyniku przeprowadzenia pewnych badań poznawczych, jest model matematyczny ustalonego obiektu rzeczywistego, uwzględniający problem z nim związany i cele modelowania [87].

Proces modelowania w świetle definicji przedstawionej w pracy [84] to proces polegający na dobraniu do oryginału zamiennika, zwanego modelem, odwzorowującego badaną rzeczywistość, a następnie eksperymentowanie z nim. Wg definicji [168] modelowanie definiuje się jako doświadczalną lub matematyczną metodę badań złożonych układów, zjawisk, procesów na podstawie skonstruowanych modeli.

Przykładową procedurę konstruowania modelu przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Procedura konstruowania modelu

Źródło: [87].

Cele, dla których buduje się modele systemów transportowych i logistycznych, mogą być dwojakiego rodzaju, tj. poznawcze, jak np. [84]:

- identyfikacja systemu;
- określenie związków między wielkościami występujących w badanym systemie;

- określenie przebiegu zmienności tych wielkości, które mogą być przedmiotem (celem) badań, itp.;

lub też użyteczne, sprowadzające się do:

- poszukiwania rozwiązań optymalnych, np. lokalizacji obiektów magazynowych;
- analizy i oceny wariantów wyposażenia techniczno-organizacyjnego systemu transportowego, magazynu, centrum logistycznego itp.;
- planowania zmian wyposażenia techniczno-organizacyjnego obiektu magazynowego centrum logistycznego oraz systemu transportowego;
- harmonogramowania przebiegu procesu transportowego, logistycznego przy realizacji określonych potrzeb przewozowych oraz przy ustalonym wyposażeniu techniczno-organizacyjnym systemu;
- sterowania przebiegiem procesu magazynowego, procesu transportowego, przy zadanym jego stanie początkowym, określonych wejściach i przyjętych kryteriach oceny jakości przebiegu procesu.

Do podstawowych klasyfikacji modeli można zaliczyć podział [99]:

- ze względu na zmienność cech i wpływ czasu:
 - modele statyczne;
 - modele dynamiczne;
- ze względu na charakter cech i sposobu opisu:
 - modele deterministyczne;
 - modele stochastyczne;
- ze względu na ciągłość zmiennych i parametrów modelu:
 - modele ciągłe;
 - modele dyskretne;
 - modele hybrydowe.

Modele matematyczne w systemach logistycznych czy systemach transportowych mogą zostać usprawnione przez konstruowanie modeli i eksperymentowanie z nimi oraz prowadzenie badań symulacyjnych pozwalających na zadanie pytanie „*what if?*” i uzyskanie na nie odpowiedzi [86]. Symulacja komputerowa jest definiowana jako technika numeryczna, która służy do naśladowania rzeczywistego systemu w postaci modelu eksperymentalnego z uwzględnieniem procesów dynamicznych zachodzących w obrębie systemu, w celu rozpoznania jego zachowań i oceny wpływu tych zachowań na pracę systemu [99].

Przyjmując, że systemy transportowe są układami fizycznymi realizującymi przepływ materiałów i informacji (przez nie), to trzy podstawowe poziomy pracy tych narzędzi to [86]:

1. Wizualizacja – graficzne metody tworzenia i analiza obiektów fizycznych i nie fizycznych, takie jak systemy i procesy logistyczne. Wizualizacja procesów przepływu materiałów charakterystycznych dla systemów logistycznych, zależnie od ich formy, wymaga istnienia elementów statycznych odwzorowujących obiekty techniczne, architektoniczne i układy funkcjonalne systemu (środowisko) oraz elementów dynamicznych odwzorowujących urządzenia, jednostki materiału i inne formy wyrażenia zmienności stanu (przepływy). Elementy statyczne wizualizacji wymagają istnienia dokumentacji projektowej. Elementy dynamiczne wymagają dokładnie sprecyzowanego, uprzednio zapisanego przebiegu procesu, ze wskazaniem rodzaju zdarzeń oraz miejsca i czasu ich zajścia. Wizualizacja umożliwia lepszą percepcję proponowanych rozwiązań i dzięki temu ułatwia procesy decyzyjne i projektowe.
2. Symulacja – to przybliżone odtwarzanie zjawisk czy zachowań jakiegoś obiektu za pomocą jego modelu. Symulacja systemu logistycznego wymaga odwzorowania tego systemu w postaci modelu ujmującego wszystkie jego niezbędne cechy, które należy uwzględnić, aby osiągnąć cel badania. Symulacja wymaga więc istnienia rozwiązania projektowego, odpowiednio zapisanego w postaci modelu, jednakże praca tego systemu (np. przepływ materiałów przez niego) jest wynikiem zalgorytmizowanych decyzji podejmowanych w trakcie trwania symulacji. Symulacja przepływu materiałów wymaga istnienia generatora i źródła przepływów, modelu systemu fizycznego oraz algorytmów decyzyjnych. Wynikiem symulacji jest zapis przebiegu procesu, który jest następnie wizualizowany. Symulacja jest zatem badaniem przebiegu procesu logistycznego w określonym systemie logistycznym.
3. Optymalizacja – (systemu transportowego) jest to metoda wyznaczająca najlepsze możliwe (optymalne) rozwiązanie techniczne lub organizacyjne z punktu widzenia określonego kryterium jakości lub zestawu kryteriów (optymalizacja wielokryterialna). W przypadku systemu logistycznego narzędzia optymalizacji, zależnie od obszaru badań, służą do ustalenia najlepszej możliwej struktury, wyposażenia, konfiguracji i organizacji systemu logistycznego. Zoptymalizowana struktura systemu jest podstawą budowy modelu symulacyjnego, który generuje wyniki do wizualizacji.

W dysertacji uwzględnione elementy symulacji i optymalizacji opisano w dalszej części. Przystępując do zapisu problemu decyzyjnego w postaci matematycznej, należy określić [84]:

- parametry – wielkości znane lub zdefiniowane a`priori oraz niezmiennie podczas rozwiązywania danego problemu;
- zmienne decyzyjne – wielkości poszukiwane, które wymagają ustalenia podczas rozwiązywania problemu;
- ograniczenia – wyrażone algebraicznie przez układ równań i/lub nierówności względem zmiennych decyzyjnych;
- funkcję kryterium – wskaźnik jakości rozwiązania wyrażony algebraicznie względem zmiennych decyzyjnych.

W kolejnym rozdziale przedstawiono sformułowanie problemu doboru pojazdów do zadań transportowych.

2.2. Ogólne sformułowanie problemu doboru pojazdów do zadań transportowych

2.2.1 Klasyfikacja problemu doboru pojazdów do zadań transportowych

Jak wspomniano w rozdziale 1.2 w ciągu ostatnich 50 lat powstało wiele wariantów problemów przydziału (z *ang.* *Assignment problem*, w dalszej części pracy oznaczony AP). Podrozdział ten po krótko przedstawia poszczególne modyfikacje problemu przydziału z podziałem na 3 główne grupy. Tabela 2 przedstawia klasyfikację problemu przydziału ze względu na kryterium liczby zadań.

Tabela 2. Klasyfikacja problemu przydziału ze względu na kryterium liczby zadań

Modele z przydziałem jednego zadania do jednego wykonawcy	Modele z przydziałem jednego zadania do wielu wykonawców	Modele z przydziałem wielowymiarowym (ang. <i>Multi-dimensional Aps</i>)
Klasyczne zagadnienie przydziału (ang. <i>Classic AP</i>) [140]	Uogólniony problem przydziału (ang. <i>The generalized AP – GAP</i>) [30]	Planarny problem trójwymiarowego przydziału (ang. <i>The planar three-dimensional AP</i>) [97]
Klasyczne zagadnienie przydziału ze zdefiniowanymi umiejętnościami wykonawców (ang. <i>Classic AP recognizing agent qualification</i>) [29]	Uogólniony problem przydziału dla wielu zasobów (ang. <i>The multiple resource GAP</i>) [113]	Osiowy, trójwymiarowy problem z przydzielaniem zadań (ang. <i>The axial three-dimensional AP</i>) [96]
Przydział z określoną liczbą zadań i wykonawców (ang. <i>K-cardinality AP</i>) [42]	Przydział typu wąskie gardło (ang. <i>The bottleneck GAP</i>) [123]	Trójwymiarowy problem przydziału wąskiego gardła (ang. <i>The three-dimensional bottleneck AP</i>) [120]
Przydział typu wąskie gardło (ang. <i>Bottleneck AP</i>) [59], [151]	Problem nierównomiernego przydziału minimalizującego czas (ang. <i>The imbalanced time minimizing AP</i>) [3]	Problem przydziału zadań w wielu okresach (ang. <i>Multi-period Aps</i>) [61]
Przydział zrównoważony (ang. <i>Balanced AP</i>) [121]	Problem β -AP klasycznego zagadnienia [33]	
Przydział minimalnego odchylenia (ang. <i>Minimum deviation AP</i>) [51], [74]		
Przydział leksykograficzny (ang. <i>Lexicographic bottleneck problem</i>) [25], [173]		
Przydział z sumą określonej liczby zadań i wykonawców (ang. <i>The Σk-assignment problem</i>) [73]		
Pół-przydział (ang. <i>The semi-AP</i>) [100]		
Przydział skategoryzowany (ang. <i>The categorized AP</i>) [144]		
Wielokryterialny problem przydziału (ang. <i>Multi-criteria AP</i>): [114], [126], [206] a) połączenie wielu kryteriów w jedno kryterium (ang. <i>Combining multiple criteria into one</i>) b) rozpatrywanie każdego kryterium oddzielnie i ich sekwencjonowanie (ang. <i>Considering multiple criteria sequentially</i>)		
Przydział ułamkowy (ang. <i>The fractional AP</i>) [165]		
Problem przydziału z ograniczeniami pobocznymi (ang. <i>AP with side constraints</i>) [29], [124], [196]		
Kwadratowy problem przydziału (ang. <i>The quadratic AP</i>) [50], [54]		
Silny problem przydziału (ang. <i>The robust AP</i>) [106]		

Źródło: opracowanie własne na podstawie [140].

Kompleksowa analiza modeli przydziałów jest szczegółowo opisana w [24], [43], [140]. Wszystkie wyżej wymienione rodzaje przydziałów (poza skategoryzowanym problemem przydziału) charakteryzują się tym, iż wszystkie zadania realizowane są jednocześnie. Kolejną wspólną cechą przedstawionych typów przydziałów (poza przydziałem leksykograficznym) jest jednokryterialna funkcja kryterium [114], [126], [161], [198]. W praktyce problem doboru pojazdów do zadań jest problemem wielokryterialnym.

Wielokryterialne wspomaganie decyzji (ang. *Multiple Criteria Decision Aiding* - MCDA) to dziedzina badań, której celem jest wyposażenie osoby zwanej decydentem w pewne narzędzia i metody, aby umożliwić jej rozwiązanie złożonego problemu decyzyjnego [19]. Np. Geerha i Nair [64] opracowali wielokryterialną funkcję uwzględniającą funkcję z klasycznego problemu przydziału oraz z przydziału typu „wąskie gardło”. Następną cechą wszystkich modeli przydziału jest znana liczba zadań przydzielona do znanej liczby wykonawców. Zmienną decyzyjną jest zmienna binarna określająca przypisanie konkretnego zadania do wykonawcy. W pracy wielkość ta jest określona na podstawie zgromadzonych danych historycznych pochodzących z firmy transportowej. W kolejnych akapitach pracy krótko scharakteryzowano poszczególne odmiany zagadnienia przydziału pojazdów do zadań.

2.2.2 Modele z przydziałem jednego zadania do jednego wykonawcy

Klasyczne zagadnienie przydziału (ang. *Classic AP*) jest omawiane w prawie każdym podręczniku do kursu wprowadzającego do nauk badań operacyjnych. Problem ten polega na znalezieniu dopasowania jeden do jednego pomiędzy i zadaniami i j wykonawcami, a celem jest zminimalizowanie całkowitego kosztu przydziału. Klasyczne przykłady obejmują takie sytuacje, jak przypisywanie zadań do maszyn, zadań do pracowników lub pracowników do maszyn.

Model matematyczny dla klasycznego problemu przydziału może być podany jako:

$$P(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x(i, j) \cdot k(i, j) \longrightarrow \min / \max \quad (1)$$

gdzie:

$x(i, j)$ - zmienna decyzyjna określająca połączenie między i -tym zadaniem a j -tym wykonawcą, zmienna zdefiniowana jako zmienna binarna, w przypadku $x(i, j) = 1$ i -te zadanie może być zrealizowane przez j -te wykonawcę, w innym przypadku $x(i, j) = 0$,

$k(i, j)$ - koszt przydziału i -tego zadania do j -tego wykonawcy.

Ograniczenia problemu przydziału wynikają z narzucenia wykonawcy wymogu realizacji tylko jednego zadania:

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

Ponadto, na zadanie narzucony jest wymóg przydzielenia go do jednego wykonawcy:

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

Należy podkreślić, że klasyczny problem przydziału z matematycznego punktu widzenia pokrywa się z problemem ważonego dopasowania (*ang. Weighted bipartite matching*) z teorii grafów, dlatego wyniki z tego zagadnienia zostały zaadaptowane do rozwiązania klasycznego problemu przydziału.

Klasyczne zagadnienie przydziału ze zdefiniowanymi umiejętnościami wykonawców opisał w swojej pracy Caron i inni [29]. W swojej pracy Caron zwrócił uwagę na kwalifikacje wykonawców, zakładając, iż nie każdy wykonawca ma umiejętności do realizacji każdego zadania, a celem modelu jest maksymalizacja użyteczności wykonawców.

Funkcja celu przyjmuje postać:

$$P(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x(i, j) \cdot k(i, j) \longrightarrow \min / \max \quad (4)$$

gdzie zmienne decyzyjne $x(i, j)$ oraz $k(i, j)$ są interpretowane tak jak w klasycznym zagadnieniu przydziału.

Główne ograniczenie wynika z realizacji każdego zadania przez wykonawcę, nie więcej niż jedno zadanie może być realizowane przez jednego wykonawcę, tj.:

$$i = 1, \dots, m, \quad \sum_{j=1}^n q(i, j) \cdot x(i, j) \leq 1 \quad (5)$$

gdzie:

$q(i, j)$ - jest zmienną określającą kwalifikację danego wykonawcy do realizacji zadania, $q(i, j) = 1$ to i -ty wykonawca potrafi zrealizować j -te zadanie, w innym przypadku $q(i, j) = 0$.

Dodatkowo zdefiniowano ograniczenie, które zapewnia iż do żadnego zadania nie zostanie przydzielony więcej niż jeden wykwalifikowany wykonawca:

$$j = 1, \dots, n, \quad \sum_{i=1}^m q(i, j) \cdot x(i, j) \leq 1 \quad (6)$$

Dell'Amico i Martello [42] zaprezentowali odmianę klasycznego problemu przydziału z uwzględnieniem określonej liczby zadań i wykonawców, które mogą być przydzielone do

siebie (*ang. The k-cardinality AP*). W modelu parametr k określa liczbę przydzielanych zadań do wykonawców. Dodatkowo wprowadzono warunek dotyczący tego parametru k , w którym jego wartość jest mniejsza niż liczba wykonawców m i zadań n . Funkcja celu przyjmuje taką samą postać jak w klasycznym modelu przydziału:

$$P(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x(i, j) \cdot k(i, j) \longrightarrow \min / \max \quad (7)$$

Ograniczenia w tym modelu spełniają zależności:

$$i = 1, \dots, m, \quad \sum_{j=1}^n x(i, j) \leq 1 \quad (8)$$

$$j = 1, \dots, n, \quad \sum_{i=1}^m x(i, j) \leq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x(i, j) = k, \quad x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

Przykładowy obszar zastosowania modelu przedstawił Prins [142], poddając analizie przydział przedziałów czasowych, podczas których przesyłano informacje do określonej liczby stacji naziemnych.

Kolejnym modelem jest przydział typu wąskie gardło (*ang. The bottleneck AP*) [151]. W pracy Forda i Fulkersona [59] odnaleźć można wersję maksymalizacji przydziału, polegającą na przydzielaniu pracowników do zadań w taki sposób, aby minimalna efektywność takiego przydziału była maksymalna. Ta minimalna efektywność właśnie jest wąskim gardłem. Podczas gdy celem klasycznego AP jest minimalizacja lub maksymalizacja sumy kosztów przydziału zadań do wykonawców, celem przydziału typu wąskie gardło jest minimalizacja czasu realizacji wszystkich liczby zadań n przez liczbę wykonawców m . Cechą charakterystyczną tego przydziału jest praca wykonawców zadań w trybie równoległym.

Funkcja kryterium przyjmuje wówczas formę:

$$\min \max_{1 \leq i, j \leq n} x(i, j) \cdot k(i, j) \quad (11)$$

lub

$$\max \min_{1 \leq i, j \leq n} x(i, j) \cdot k(i, j) \quad (12)$$

Ograniczenia modelu przydziału:

$$i = 1, \dots, m, \quad \sum_{j=1}^n x(i, j) = 1 \quad (13)$$

$$j = 1, \dots, n, \quad \sum_{i=1}^m x(i, j) = 1 \quad (14)$$

Przedstawione do tej pory przydziały zadań, które są odmianą klasycznego przydziału, nie rozważały wartości pośrednich. Zawsze jest maksymalizacja lub minimalizacja funkcji celu w zależności od przyjętego kryterium. Dlatego opracowano kolejny model przydziału, tzw. Przydział zrównoważony (*ang. The balanced AP*) [121]. Założeniem przydziału zrównoważonego jest minimalizacja różnicy pomiędzy wartością maksymalną, a wartością minimalną przydziału.

Następnym modelem przydziału analizowanym w pracy jest model minimalnego odchylenia (*ang. The minimum deviation AP*), który wywodzi się z wcześniej przedstawionego przydziału zrównoważonego. Przydział ten został zdefiniowany przez badaczy [51], [74] jako minimalizacja różnicy pomiędzy maksymalnymi i średnimi kosztami przydziału. Przykładem zastosowania przydziału minimalnego odchylenia jest konstrukcja sieci poprzez przycięcie standardowego rozmiaru elementu brzegowego do rozmiarów, które mają być zastosowane dla poszczególnych krawędzi. Celem jest zminimalizowanie odpadów z cięcia standardowego rozmiaru elementu brzegowego [51].

Modelem przydziału wywodzącym się z przydziału typu wąskie gardło jest model przydziału leksykograficznego (*ang. The lexicographic bottleneck problem*) [25], [173]. Celem leksykograficznego problemu wąskiego gardła jest znalezienie takiego zbioru spełniającego ograniczenia klasycznego AP, który nie tylko zminimalizuje największy współczynnik kosztu w rozwiązaniu, ale również zminimalizuje drugi największy, trzeci największy itd. Co w efekcie powinno dać skutek, aby różnica między największym, a średnim kosztem była jak najmniejsza.

Następnym modelem przydziału jest przydział sumy określonej liczby zadań i wykonawców (*ang. The Σk -assignment problem*). W modelu tym również wykorzystano parametr k , który mówi o liczbie zadań przypisanych do konkretnego wykonawcy, jednak w modelu tym nie ma ograniczeń co do wielkości parametru k względem liczby zadań i wykonawców. Szczegółowy algorytm rozwiązania podany jest w pracy [73]. Model ten ma na celu odnalezienie takiego zbioru, dla których największa suma k będzie minimalizowany. W związku z brakiem ograniczeń parametru k , wszystkie przydziały są realizowane (przypadek, gdy k równa się liczbie zadań lub wykonawców), ale tylko przydział k maksymalny jest sumowany.

Kolejny model przydziału to pół-przydział (*ang. Semi-assignment problem*). Jednym z kluczowych założeń klasycznego AP jest, iż zadania i wykonawcy mają przypisane różne,

unikatowe, można powiedzieć indywidualne cechy, co prowadzi do powstania macierzy opisu problemu przydziału. W modelu typu pół-przydział głównym założeniem jest, iż zadania i wykonawcy mogą mieć te same cechy/charakterystyki [100]. Zakładając, iż n to liczba zadań, a m to liczba wykonawców, $n < m$, a d_j – liczba zadań w grupie j -tej, to funkcja kryterium przybiera formę:

$$P(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x(i, j) \cdot k(i, j) \longrightarrow \min \quad (15)$$

W pracy [197] zauważono, że w macierzy danych w przypadku wystąpienia identycznych kolumn lub wierszy, sytuacja ta umożliwia zmianę problemu i procedury rozwiązania, dzięki czemu bardzo duże problemy tego typu można rozwiązać w bardzo szybko sposób. Jeśli macierz danych dla problemu ma zarówno identyczne wiersze jak i identyczne kolumny, to struktura modelu jest taka sama jak w przypadku problemu transportowego.

Przedstawione do tej pory rodzaje przydziałów cechują się tym, iż wszystkie zadania mogą być wykonywane w jednym czasie. W pracy [144] autorzy przedstawili kolejny model – przydział skategoryzowany (*ang. Categorized assignment problem*), który uwzględnia kolejność realizacji zadań lub ich pierwszeństwo. Przydział skategoryzowany dopuszcza podział zadań na kategorie lub grupy, z wymogami dotyczącymi kolejności w ramach każdej grupy lub pomiędzy grupami. Dla obu wersji problemu założono, iż n zadań ma być przydzielone do m wykonawców na zasadzie jeden do jednego. Jednakże zadania podzielone są na zestawy r , gdzie $r < n$ lub zbiory: $S_1, S_2, \dots, S_r$.

Celem tego przydziału jest zminimalizowanie sumy maksymalnych czasów dla r różnych zestawów. Ponieważ zestawy muszą być wykonywane po kolei, a zadania w każdym zestawie mogą być wykonywane jednocześnie, celem jest znalezienie takich przydziałów, które zminimalizują sumę czasów ukończenia wszystkich zestawów, gdy czas ukończenia pojedynczego zestawu jest największym z czasów jego zadań. Tak więc, w obrębie każdego zestawu występuje podstawowa idea wąskiego gardła AP (minimalizuj maksimum), podczas gdy w obrębie wszystkich zestawów występuje idea klasycznego AP (minimalizuj sumę).

Rozważane do tej pory modele przydziałów, choć miały różne cele/kryteria (koszt, czas) podczas przydziału brały pod uwagę tylko to jedno kryterium. W rzeczywistości, w wielu przypadkach występuje wiele kryteriów decyzyjnych, mający wpływ na ostateczny, najlepszy wynik. Problem przydziału tego typu określa się jako wielokryterialny problem przydziału (*ang. Multi-criteria assignment problems*). W literaturze wyróżnia się dwie podstawowe metody rozwiązania tego problemu: poprzez połączenie wielu kryteriów w jedno kryterium

(ang. *Combining multiple criteria into one*) lub poprzez rozpatrywanie każdego kryterium oddzielnie i ich sekwencjonowanie (ang. *Considering multiple criteria sequentially*).

W pracy [64] autorzy rozważają dwa cele jednocześnie: funkcję celu klasycznego AP i funkcję celu przydziału wąskiego gardła. Założono, iż poza kosztami wykonania zadania przez wykonawców istnieje koszt nadzoru F , który odpowiada maksymalnemu czasowi wykonania najdłuższego zadania (którego wartość ma być zminimalizowana – przydział typu wąskiego gardła). W takim przypadku funkcja celu przyjmuje postać:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}x_{ij} + F \cdot \max \{t_{ij} | x_{ij} = 1\} \quad (16)$$

gdzie:

c_{ij} – koszty wykonania zadań i przez wykonawców j ;

t_{ij} – czas potrzebny wykonawcom j do wykonania zadań i ;

F – koszt nadzoru, który odpowiada maksymalnemu czasowi wykonania najdłuższego zadania.

W pracach [126], [206] autorzy rozważają problem dopasowania przydziału (ang. *Matching assignment problem*) na przykładzie dopasowania kandydatów do miejsc pracy biorąc pod uwagę preferencje samych kandydatów, jak i pracodawców.

Model wielokryterialnego problemu przydziału rozważa każde kryterium oddzielnie, a następnie ich sekwencjonowanie (ang. *Considering multiple criteria sequentially*). Programowanie z wyprzedzeniem (ang. *Preemptive goal programming*) jest rozszerzeniem programowania liniowego, które rozważa wiele celów oddzielnie i sekwencyjnie. W pracy [114] zastosowano programowanie z wyprzedzeniem do określenia, w jaki sposób przenieść nauczycieli ze szkół, w których uczyli rano, do szkół, w których mieli uczyć po południu. Rozważane cele obejmowały m.in.

- koszty podróży między szkołami (obiektywne);
- preferencje (subiektywne) nauczycieli za i przeciw określonym szkołom;
- administratorów szkół za i przeciw określonym nauczycielom;
- rekomendacje (subiektywne) przełożonych nauczycieli dotyczące tego, kto powinien być przydzielony gdzie.

Model leksykograficzny wąskiego gardła AP przedstawiony wcześniej został rozszerzony w pracy [198] o problem znajdowania rozwiązań problemów w teorii grafów, w tym AP, które optymalizują pierwszy cel, a następnie, spośród tych rozwiązań, optymalizują drugi cel, trzeci cel itd. Mając do rozważenia r celów, określono to jako r -leksykograficzny problem wieloobiektowy (r -LMOP). Cele mogą być dowolną kombinacją wybraną ze zbioru {min suma, maks. suma, min wąskie gardło, maks. wąskie gardło}.

Następnym modelem przydziału jest model przydziału ułamkowego (*ang. Fractional assignment problem*). Jest to model nieliniowy, w którym funkcja celu jest stosunkiem dwóch innych wyrażeń funkcji celu [165]. Funkcja celu przyjmuje postać, przy zastosowaniu podstawowych ograniczeń z klasycznego AP:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}} \rightarrow \min \quad (17)$$

gdzie:

c_{ij} – koszty wykonania zadań i przez wykonawców j ;

d_{ij} – czas realizacji zadania i przez wykonawcę j .

Model ten dopuszcza możliwość, iż nie każdy wykonawca ma kwalifikacje do przydzielania mu każdego zadania, natomiast potencjalnym zastosowaniem jest maksymalizacja we wszystkich zadaniach wartości otrzymanej (jednostka czasu poświęconego na realizację zadania).

Podsumowując dotychczasowe rozważania dotyczące AP, przedstawione do tej pory modele optymalizowały pewne funkcje celu lub pewne funkcje z uwzględnieniem dwóch zbiorów: każde zadanie jest przydzielone do wykonawcy i każdy wykonawca jest przydzielony do co najwyżej jednego zadania. O ograniczeniach dotyczących kompetencji wykonawców wspomniano wcześniej. Natomiast mogą wystąpić inne ograniczenie tj. ograniczenia czasowe, budżetowe czy stopień wyszkolenia personelu, które wpływają w realny sposób na dobór zadań do wykonawców. Taki model przydziału nazwano problemem przydziału z ograniczeniami pobocznymi (*ang. AP with side constraints*). W pracy [124] poza podstawowymi ograniczeniami klasycznego AP przydział z ograniczeniami pobocznymi zdefiniowano poprzez:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ijk} x_{ijk} \leq b_k \quad (18)$$

gdzie:

r_{ijk} – ilość zasobu k wykorzystanego, jeżeli wykonawca i został przydzielony do zadania j ;

x_{ijk} – zmienna decyzyjna określająca połączenie między i -tym zadaniem a j -tym wykonawcą przy dostępnym zasobie k ;

b_k – ilość dostępnego zasobu k ;

k – określa liczbę przydzielanych zadań do wykonawców.

Tak zdefiniowanych ograniczeń może być tyle, ile jest to konieczne.

Bazując na klasycznym zagadnieniu z uwzględnieniem kwalifikacji wykonawców, w pracach [29], [196] rozważono przydział z ograniczeniami pobocznymi, w którym ograniczenia dotyczą:

- przydzielenia wykonawców tylko do zadań, do których mają kwalifikacje;
- przypisanie różnych poziomów wykonawcom;
- przypisanie priorytetów realizacji zadań.

Celem jest przydzielanie bardziej wykwalifikowanych wykonawców do priorytetowych zadań, co przekłada się na maksymalizację użyteczności posiadanych wykonawców.

Kwadratowy problem przydziału QAP (*ang. the quadratic AP*) to następny model przydziału bazujący na klasycznym AP. Rodzaj tej jest używany w odniesieniu do problemu określenia miejsca lokalizacji obiektów m spośród n dostępnych. Sformułowanie Dreznera [50] zakłada, iż $m=n$, a problem polega na identyfikacji takiej permutacji P z $1, 2, \dots, n$ która minimalizuje:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} d_{P(i)P(j)} \quad (19)$$

gdzie:

f_{ij} – koszt przemieszczenia się pojazdu i do przydzielonego zadania j ;

$d_{P(i)P(j)}$ – dystans pojazdu i od przydzielonego zadania j w permutacji P .

Przykładem podanym w pracy [54] jest określenie przydziału oddziałów do miejsc w szpitalu w celu zminimalizowania maksymalnej odległości, jaką musi pokonać lekarz, aby dotrzeć do pacjenta, prowadzi do powstania QAP wąskiego gardła.

Kolejnym modelem problemu przydziału jest tzw. silny problem przydziału (*ang. Robust assignment problem*), sformułowany przez Kouvelis i Yu, którego głównym założeniem, jest iż „dla każdego potencjalnie możliwego do zrealizowania scenariusza musi on/ona żyć z konsekwencjami podjętej decyzji dla działania systemu”, co oznacza że wybrane rozwiązanie pozostaje bliskie optymalnemu dla każdego scenariusza [106]. Model silnego problemu przydziału zakłada 3 główne kryteria przydziału, tj. [106]:

- bardzo silna decyzja tj. zbiór wartości x_{ij} , który minimalizuje maksymalny koszt całkowity we wszystkich możliwych scenariuszach wartości parametrów (równoważne decyzji o koszcie minimalnym), podejście to opiera się na założeniu, że może zdarzyć się najgorszy scenariusz;
- silnie odchylona decyzja tj. zbiór wartości x_{ij} , który daje najlepsze odchylenie od optymalności w najgorszym przypadku dla wszystkich możliwych scenariuszy wartości parametrów; podejście to uznaje, zgodnie ze słowami Kouvelisa i Yu, że „decyzje

podejmowane na podstawie niepewnych informacji są często oceniane tak jakby rzeczywista realizacja scenariusza była znana przed podjęciem decyzji, więc decydent jest słusznie zainteresowany nie tylko tym, jak wydajność decyzji zmienia się w zależności od różnych realizacji scenariusza danych, ale także tym, jak rzeczywista wydajność systemu na podstawie decyzji porównuje się z optymalną wydajnością, która mogłaby zostać osiągnięta, gdyby dokładne informacje na temat realizacji scenariusza były dostępne przed podjęciem decyzji”;

- bazuje na tej samej koncepcji co silnie odchylona decyzja, z tą różnicą, że zamiast skupiać się na wielkości odchylenia od optymalności, znajduje się rozwiązanie, które daje najlepsze procentowe odchylenie od optymalności w najgorszym przypadku dla wszystkich możliwych scenariuszy wartości parametrów.

2.2.3 Modele z przydziałem jednego zadania do wielu wykonawców

Kolejna grupą modeli przydziału zadań do wykonawców charakteryzuje się wieloma zadaniami przypisanymi do jednego wykonawcy. Ta grupa modeli stanowi odmianę wcześniej przedstawionych modeli przydziału, dlatego w dalszej części pracy będą zaznaczone tylko różnice między modelami.

Najbardziej podstawową wersją klasycznego problemu przydziału jest uogólniony problem przydziału (*ang. the generalized assignment problem – GAP*), w którym pojazd (wykonawca) może być przydzielony do wielu zadań. Model ten zakłada, że każde zadanie zostanie przydzielone jednemu pojazdowi, ale dopuszcza możliwość, że pojazd zostanie przydzielony więcej niż do jednego zadania, przy czym należy określić, jaką część zdolności pojazdu do wykonania tych zadań wykorzysta każdy z nich. Przydział ten jest zatem przykładem problemu przydziału jednego pojazdu do wielu zadań, w którym uwzględniono ograniczenia pojemności. Uznanie, że jedno zadanie może wykorzystywać tylko część możliwości pojazdu, a nie całość (jak w klasycznym AP), prowadzi do następującego modelu:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (20)$$

przy warunkach ograniczających:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \leq b_i \quad i = 1, \dots, m \quad (22)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ lub } 1$$

gdzie

$x_{ij} = 1$, jeśli pojazd i został przydzielony do zadania j ; 0 jeśli nie został przydzielony;

c_{ij} – koszt przydzielenia pojazdu i do zadania j ;

a_{ij} – zdolność pojazdu i wykorzystana, jeśli pojazd ten został przydzielony do zadania j ;

b_i – dostępna zdolność pojazdu i .

Może być zastosowany w takich obszarach jak: wyznaczanie tras pojazdów, problemy lokalizacji stałych ładunków, grupowanie i ładowanie w elastycznych systemach produkcyjnych, planowanie projektów, przydzielanie przestrzeni magazynowej, projektowanie sieci komunikacyjnych, planowanie płatności na rachunkach, przydzielanie programistom zadań związanych z tworzeniem oprogramowania, przydzielanie zadań komputerom w sieciach, planowanie reklam telewizyjnych o zmiennej długości oraz przydzielanie statków do zakładów remontowych [30].

Uogólniony problem przydziału dla wielu zasobów (*ang. the multiple resource GAP – MRGAP*) to rozwinięcie modelu przydziału GAP w celu rozpoznania wielu zasobów, który polega na dodaniu dodatkowych ograniczeń drugiego typu, po jednym dla każdego z zasobu np. w pracy [113] autorzy przedstawiają rozszerzenie MRGAP, które uwzględnia rozpoznanie czasów i kosztów przebrojenia, umożliwiając podział partii produkcyjnych pomiędzy różne maszyny przy opracowywaniu planów produkcji.

Przydział typu wąskie gardło GAP (*ang. the bottleneck GAP – BGAP*) jest kolejną odmianą modelu przydziału. Autorzy [123] wyróżniają dwie wersje BGAP:

- zadaniowy BGAP, w którym celem jest minimalizacja maksymalnych kosztów dokonanych przydziałów;
- wykonawczy BGAP, w której celem jest minimalizacja maksymalnej sumy kosztów dla wykonawcy.

Zastosowania tych dwóch modeli może obejmować lokalizację obiektów i harmonogramowanie pracy maszyn [140].

Następnym modelem jest problem nierównomiernego przydziału minimalizującego czas (*ang. the imbalanced time minimizing assignment problem*). Autorzy [3] rozważają wariant modelu, w którym liczba wykonawców m jest mniejsza niż liczba zadań n , a ponieważ każde zadanie musi zostać wykonane, jakiegoś agenta lub agentów trzeba będzie przydzielić do więcej niż jednego zadania. Celem jest zminimalizowanie czasu, w którym wszystkie zadania zostaną ukończone.

Kolejnym modelem jest tzw. Problem β -AP klasycznego zagadnienia, który według autorów [33] oprócz zwykłego założenia, że zadanie musi być przydzielone tylko jednemu

agentowi, rozważają oni ograniczenie, że nie każdy wykonawca ma kwalifikacje do wykonania każdego zadania, a zatem, ponieważ zadania mogą być przydzielane tylko wykwalifikowanym wykonawcom, wykonawcy można przydzielić więcej niż jedno zadanie. Wyróżniają 3 odmiany β -AP:

- problem minimalizacji maksymalnej liczby zadań przypisanych do dowolnego wykonawcy, który nazywają problemem kardynalności β -AP, podając odniesienia do prac, które stosują ten model do problemów harmonogramowania;
- każde zadanie wykonawcy ma przypisaną wartość, taką jak zysk, który można uzyskać z tego zadania, autorzy [33] rozważają problem wąskiego gardła β -AP, w którym celem jest zidentyfikowanie spośród wszystkich optymalnych rozwiązań problemu kardynalności β -AP takiego, które zmaksymalizuje minimalną wagę każdego zadania (zestaw ograniczeń zapewnia, że maksymalna liczba zadań, do których przypisany jest dowolny wykonawca, nie wzrasta, choć dopuszcza możliwość, że liczba zadań, do których przypisany zostanie konkretny wykonawca, może wzrosnąć);
- ważony β -AP, w którym celem jest zidentyfikowanie, spośród wszystkich rozwiązań kardynalności β -AP, tego, które zmaksymalizuje sumę wartości przydziałów.

2.2.4 Modele z przydziałem wielowymiarowym

Przedstawione do tej pory modele problemu przydziału charakteryzowały się dopasowaniem dwóch zbiorów o takiej samej lub różnej liczbie elementów: n zadań do m wykonawców. W zależności od modelu elementy te charakteryzowały się różną cechą/kompetencjami lub innymi warunkami ograniczającymi. Na tej kanwie klasyczny problem przydziału doczekał się wielu różnych innych modeli. Modele z przydziałem wielowymiarowym (*ang. multi-dimensional Aps*) polegają na przydziale 3 zbiorów lub więcej. Klasyczne przykłady z tego obszaru to układanie planów lekcji w szkołach (uczniowie, nauczyciele, klasy i przedział czasowy), z obszaru produkcji to np. dopasowanie stanowisk pracy do pracowników i maszyn.

Pierwszym modelem tego typu jest planarny problem trójwymiarowego przydziału (*ang. the planar three-dimensional AP*). Autorzy [97] podali przykład planarnego trójwymiarowego problemu przydziału, który polega na zaplanowaniu spotkań pomiędzy r sprzedawcami i s klientami w ciągu t okresów czasu ($r \geq s \geq t$), gdzie w każdym okresie czasu każdy klient ma spotkać się z jednym sprzedawcą, a każdy sprzedawca ma spotkać się z co

najwyżej jednym klientem. Model matematyczny dla planarnego, trójwymiarowego AP jest następujący:

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \sum_{k=1}^t c_{ijk} x_{ijk} \rightarrow \min \quad (23)$$

przy warunkach ograniczających:

$$\sum_{i=1}^r x_{ijk} = 1 \text{ dla każdej kombinacji } j, k \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^s x_{ijk} \leq 1 \text{ dla każdej kombinacji } i, k \quad (25)$$

$$\sum_{k=1}^t x_{ijk} \leq 1 \text{ dla każdej kombinacji } i, j \quad (26)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ lub } 1 \text{ dla wszystkich } i, j, k$$

gdzie

$x_{ijk} = 1$, jeśli sprzedawca i spotyka się z klientem j w okresie k , 0, jeśli nie;

c_{ijk} – koszt takiego spotkania.

Kolejnym modelem jest osiowy, trójwymiarowy problem z przydzielaniem zadań (*ang. the axial three-dimensional AP*). Autorzy [96] podają jako przykład osiowego trójwymiarowego problemu AP przydzielenie i zadań, j pracownikom i r maszynom ($i \leq j \leq r$). Rozszerzając podstawowe idee klasycznego AP, każde zadanie musi być przydzielone jakiemuś pracownikowi i maszynie, a każdy pracownik i maszyna mogą być użyte do co najwyżej jednego zadania.

Następnym modelem jest trójwymiarowy problem przydziału wąskiego gardła (*ang. the three-dimensional bottleneck AP*). Przydzielenie n pracowników do wykonania n zadań na n maszynach (dopasowanie jeden do jednego) w celu zminimalizowania czasu, w którym ostatnie zadanie zostanie wykonane, jeśli wszystkie zadania zostaną rozpoczęte jednocześnie, jest to przykładem podstawowego trójwymiarowego problemu przydziału zadań, który jest w zasadzie prostym uogólnieniem standardowego dwuwymiarowego BAP. Inne przykłady tego modelu to kombinacja różnej liczby m pracowników, n stanowisk i p maszyn [120].

Inną grupą modeli z obszaru trójwymiarowego przydziału zadań są modele problemu przydziału zadań w wielu okresach (*ang. multi-period Aps*), które pojawiają się w momencie gdy trzeba przydzielić n pracowników do zmieniającej się liczby zadań w pewnym okresie czasowym.

Problematyka doboru pojazdów do zadań ma charakter wieloaspektowy, tj. techniczny, technologiczny, ekonomiczny i jakościowy. W związku z tym, w ramach tego problemu analizować można m.in. następujące czynniki [93]:

- uwarunkowania techniczno – technologiczne efektywności systemów transportowych w aspekcie doboru pojazdów do zadań realizowanych w tych systemach;
- dobór metod, technik i narzędzi do efektywnej lokalizacji przedsiębiorstw logistycznych w systemach transportowych o hierarchicznej strukturze mających na celu wyznaczania zadań przewozowych w tych systemach transportowych;
- analiza czynników wpływających na efektywność doboru pojazdów do zadań w tych systemach transportowych.

Problem doboru pojazdów do zadań należy do grupy problemów optymalizacyjnych, które w teorii obliczeń polegają na znalezieniu najmniejszej bądź największej wartości funkcji kryterium. Wartość funkcji kryterium zależy od wartości zmiennych decyzyjnych, a rozwiązaniem problemu optymalizacyjnego jest układ wartości zmiennych decyzyjnych spełniających ograniczenia zdefiniowane dla tego problemu, przy których funkcja kryterium osiąga wartość ekstremalną. Standardowa procedura optymalizacyjna składa się z etapów:

- zdefiniowanie danych wejściowych do zadania;
- określenia zmiennych decyzyjnych i ich wpływu na wartość funkcji kryterium;
- zdefiniowanie funkcji kryterium;
- zdefiniowanie w postaci równań i nierówności ograniczeń nakładanych na wartości zmiennych decyzyjnych;
- wybór odpowiedniej dla danego problemu optymalizacyjnego metody jego rozwiązania;
- znalezienie wartości ekstremalnej funkcji kryterium.

Metoda przedstawiona w pracy zawiera elementy metod wyznaczania tras i elementy metod przydziału zadań oraz prognozowania popytu. Mając na uwadze, iż przyjęto zadanie transportowe jako przewóz ładunków z miejsca pobrania do miejsca wyładunku opracowana metoda wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych sprowadza się do wyznaczenia zadania w postaci trasy jazdy pomiędzy punktami nadania i punktami odbioru, a następnie przydzielenie do tej trasy pojazdu zgodnie z przyjętymi kryteriami.

Podsumowując, przeprowadzona analiza literatury zarówno polsko- jak i obcojęzycznej wskazuje na brak podejścia systemowego do rozwiązania problemu doboru pojazdów do zadań transportowych z uwzględnieniem m.in. ograniczenia typu i liczby pojazdów oraz różnej liczby punktów nadania przy jednoczesnym wyznaczaniu trasy jazdy pojazdu. Omówione do tej pory pozycje literaturowe skupiają się głównie na opracowaniu lepszych, bardziej wydajnych (szybszych) algorytmów wyznaczania tras przewozu dla pojazdów zaopatrujących.

2.3. Cel i zakres pracy oraz teza

Rozprawa poświęcona jest problematyce wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych na przykładzie branży meblarskiej przy ograniczeniach wymagań konkretnego ładunku, z uwzględnieniem zmiany wolumenów w obsługiwanych magazynach i punktach odbioru. Przedstawiony w dysertacji problem doboru pojazdów do zadań ukazany został w aspekcie prognozy popytu wykorzystując sieci neuronowe oraz wyznaczania tras jazdy pojazdów realizujących zadania transportowe. **Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, że nie istnieje metoda doboru pojazdów do zadań transportowych pozwalającej jednocześnie optymalizować:**

- liczbę potrzebnych pojazdów;
- liczbę pojazdów danego typu;
- wykorzystanie przestrzeni ładunkowej pojazdów;
- długość pokonanej drogi;
- czas realizacji zadań transportowych;
- trasy jazdy pojazdu;

z uwzględnieniem prognozy popytu wykorzystującej sieci neuronowe.

Ze względu m.in. na uwarunkowania techniczne, technologiczne, jakościowe czy ekonomiczno-organizacyjne, dobór pojazdów do zadań, czy też modelowanie tego doboru jest zagadnieniem złożonym, wielopłaszczyznowym, wielokryterialnym, a przede wszystkim problemem decyzyjnym. Bez posiadania odpowiednich narzędzi czy metod wspomagających podejmowanie decyzji trudne jest przeprowadzenie w sposób efektywny doboru pojazdów do zadań transportowych.

Mając na uwadze powyższe, sformułowano następującą tezę:

metoda modelowania matematycznego wykorzystująca sieci neuronowe do wyznaczenia prognoz popytu umożliwi racjonalny dobór pojazdów do przyszłych zadań transportowych, w którym jednocześnie wyznaczane są trasy jazdy pojazdów.

W związku z powyższym przyjęto, iż celem pracy jest:

opracowanie metody wielokryterialnego wspomagania decyzji w zakresie racjonalnego doboru pojazdów do zadań transportowych.

Biorąc pod uwagę przyjętą tezę i cel pracy, przyjęto następujące cele cząstkowe pracy:

- identyfikacja obszaru badawczego w zakresie transportu drogowego towarów, w tym branży meblarskiej i problematyki wyznaczania tras przejazdów;

- systematyzacja wiedzy na temat procesu doboru pojazdów do zadań transportowych oraz zastosowania sieci neuronowych w logistyce;
- opracowanie modelu matematycznego doboru pojazdów do zadań uwzględniającego prognozę popytu oraz wszystkie jego istotne elementy ze względu na przedmiot badań tj.: formalizację języka opisu, formalizację kryteriów oceny, zapisu układu ograniczeń uwzględniających aspekty techniczne, ekonomiczno-technologiczne;
- opracowanie projektów sieci neuronowej poprzez wykorzystanie danych rzeczywistych do prognozy popytu;
- opracowanie modelu symulacyjnego do weryfikacji opracowanego rozwiązania oraz ocenę poprawności wyników.

Opracowana metoda umożliwia wyznaczenie racjonalnego rozwiązania dla zagadnienia doboru pojazdów do zadań transportowych przy założonych kryteriach oceny. Przedstawiona metoda wykorzystuje metody programowania matematycznego. Dokonano implementacji komputerowej metody celem sprawdzenia poprawności działania.

Proponowana w rozprawie metoda wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych umożliwi racjonalne ze względu na przyjęte warunki określenie liczby i typu danego pojazdu, wyznaczenie tras pojazdów (minimalizacja sumy dystansu wszystkich pojazdów – minimalizacja funkcji celu), a także maksymalne wykorzystanie przestrzeni ładunkowej pojazdów, przy jak najkrótszym czasie realizacji zadania.

Podmiotem badań są firmy transportowo-logistyczne działające na rynku krajowym. Firmy te swoim zakresem działalności tworzą część rynku logistycznego. Problemy badawcze z obszaru logistyki chętnie korzystają z warsztatu badawczego i dorobku teoretycznego innych dyscyplin naukowych. Funkcjonowanie transportu, w tym dobór pojazdów do zadań transportowych wymaga wieloaspektowego podejścia do badań jako problemów złożonych. Stosowane metody badań i formułowane twierdzenia bywają wspólne dla różnych dyscyplin naukowych, czego dobrym przykładem jest logistyka, a w niej m.in. procesy transportu, magazynowania, produkcji, składające się na multi-dyscyplinarny charakter tej dziedziny.

Układ treści rozprawy wynika z celów oraz ze sformułowanego problemu badawczego. W rozprawie wyróżnia się dwie podstawowe części: teoretyczną i empiryczną.

W **części teoretycznej** pracy umieszczono analizę stanu obecnego segmentu przedsiębiorstw transportowo – logistycznych, zdefiniowano podstawowe pojęcia wykorzystywane w rozprawie, poddano analizie problem przydziału pojazdów do zadań w systemach transportowo – logistycznych, problem wyznaczania tras pojazdów, zastosowanie

sieci neuronowych w logistyce, po krótko scharakteryzowano branżę meblarską w Polsce, a także analizę metod stosowanych w doborze pojazdów. Na tej podstawie określono obszar badawczy w dysertacji.

Część empiryczna rozprawy obejmuje modelowanie matematyczne doboru pojazdów do zadań transportowych oraz modelowanie neuronowe prognozy popytu. Następnie opis opracowanej metody i charakterystykę poszczególnych jej etapów. Założenia modelu matematycznego zostały zaimplementowane do modelu symulacyjnego, a następnie za pomocą programu FlexSim nastąpiła symulacja komputerowa. Ostatni rozdział pracy poświęcono implementacji i weryfikacji komputerowej opracowanej metody. W podsumowaniu i wnioskach zawarto ocenę przydatności opracowanej metody.

Przeprowadzenie badań uwzględniających określone wcześniej tezę, cel i problemy badawcze wymagają zastosowania różnych metod i technik badawczych. Zastosowane metody badawcze powinny charakteryzować się następującymi cechami [4]:

- są adekwatne do problemu, którego rozwiązanie jest zadaniem badawczym;
- zmierzają najkrótszą drogą do realizacji przyjętego zadania badawczego;
- określają ogólny, kierunkowy sposób postępowania badawczego adekwatnego do przyjętej koncepcji badań;
- precyzują ramy czasowe, zakresowe i obszarowe zawarte w tezie i założeniach do prowadzenia badań;
- ułatwiają opracowanie wyników prowadzonych badań.

W rozwiązywaniu problemów badawczych rozprawy oraz dla potrzeb osiągnięcia jej celu i potwierdzenia tezy, za niezbędne uznano wykorzystanie następujących metod:

- teoretycznych:
 - dedukcji i indukcji;
 - analizy i syntezy systemowej;
 - modelowania;
 - analizy i oceny literatury;
 - syntezy;
 - porównań i analogii;
- empirycznych:
 - obserwacji i zbierania danych;
 - badania sądów i opinii.

Metody teoretyczne stosowane były we wszystkich etapach dysertacji. Pozwoliły one na uporządkowanie, analityczne zbadanie i opis materiału badawczego uzyskanego w wyniku badań empirycznych. W konsekwencji metody teoretyczne umożliwiły zastosowanie metod systemowych i matematycznych do weryfikacji obowiązujących teorii w zakresie modelowania systemów i procesów w przedsiębiorstwach transportowo-logistycznych w aspekcie doboru pojazdów do zadań i problematyce wyznaczania tras pojazdów.

Metodę dedukcji wykorzystano do osądu spostrzeżeń i faktów w doborze pojazdów do zadań transportowych w przedsiębiorstwach transportowo-logistycznych. **Metodę indukcji** wykorzystano do formułowania wniosków na podstawie zebranych faktów.

Metody analizy i syntezy systemowej pozwoliły na określenie elementów niezbędnych do opracowania metody wspomagania doboru pojazdów do transportowych. Metoda analizy systemowej była przydatna w poznawaniu systemu transportowego, procesu doboru pojazdów do zadań i problemu wyznaczania tras poprzez rozłożenie tych elementów na odpowiednie fragmenty problemowe i ich badanie. W analizie systemowej poszukiwano odpowiedzi na pytania typu: jak jest? jakie są zależności?, jakie elementy są najistotniejsze? Metoda syntezy systemowej została ukierunkowana na formułowanie pytań typu: jak powinno być? Była ona szczególnie przydatna we wnioskowaniu. Spośród wielu **metod modelowania** wykorzystano **modelowanie matematyczne, oraz opisowe**.

Z metod teoretycznych wykorzystano analizę i ocenę literatury, polskiej i zagranicznej wybranych pozycji z baz naukowych, oraz dokumentów źródłowych przedmiotu badań, porównanie, analogię, syntezę i wnioskowanie.

Analiza literatury przedmiotu badań, opracowań naukowych i dokumentów źródłowych, stanowiła podbudowę teoretyczną badań empirycznych.

Syntezą posługiwano się w celu określenia związków i zależności wyników badań teoretycznych i empirycznych. Metoda syntezy znalazła zastosowanie w procesie formułowania problemów i wyciągania wniosków z każdego etapu pracy.

Metoda porównań i analogii pozwoliły na określenie podobieństw i różnic w stosowanych metodach analizy systemów i procesów transportowych w przedsiębiorstwach transportowo-logistycznych, szczególnie w analizowanych modelach doboru pojazdów do zadań i w modelach wyznaczania tras pojazdów.

Podczas realizacji głównego etapu dysertacji zastosowano metody empiryczne w postaci obserwacji naukowej. **Obserwację naukową** zastosowano w celu uzyskania informacji o badanych faktach, zjawiskach i elementach składowych: systemu transportowego, przedsiębiorstw transportowo-logistycznych, modelach przydziału pojazdów do zadań

i problemach wyznaczania tras. Obserwacja wykorzystana była do badania wybranych problemów w zakresie analizy systemów i procesów transportowych w przedsiębiorstwach transportowo-logistycznych. Umożliwiło to identyfikację zjawiska i związków występujących w ich praktycznej realizacji.

Modelowanie matematyczne zastosowano do opracowania założeń i ograniczeń metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych, a także elementów samego modelu matematycznego, tj.: identyfikację danych wejściowych i parametryzację elementów, opis struktury sieci transportowej, opis zapotrzebowania na przewozy, trybu realizacji i przydziału zadań transportowych, zmienne decyzyjne, ograniczenia i kryteria oceny.

Metoda badania sądów i opinii posłużyła do zgromadzenia danych eksperckich, które bezpośrednio wykorzystano do opracowania metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych.

Zastosowane w pracy metody badawcze determinowały dobór adekwatnych do potrzeb **technik badawczych** i właściwych sposobów ich wykorzystania, informacji, opinii i faktów związanych z analizą i modelowaniem doboru pojazdów do zadań. Do podstawowych technik, które autorka dysertacji wykorzystywała w procesie badawczym należy zaliczyć **techniki gromadzenia, przetwarzania i analizowania informacji**.

3. MODEL MATEMATYCZNY DOBORU POJAZDÓW DO ZADAŃ TRANSPORTOWYCH

3.1. Założenia do modelowania

Problematykę doboru pojazdów do zadań transportowych należy rozpatrywać w powiązaniu z procesem przewozu ładunków stanowiącego zadanie transportowe. A zatem należy rozpatrywać ją w kategoriach systemowych. Aby dokonać właściwej analizy systemu doboru pojazdów do zadań transportowych, konieczne jest opracowanie odpowiedniego modelu. Model procesu doboru pojazdów do zadań transportowych powinien odzwierciedlać złożoność i współzależność zjawisk jakie zachodzą w systemie oraz jego wpływ i związki z otoczeniem.

Realizacja procesu doboru pojazdów do zadań transportowych uwzględnia następujące elementy systemu transportowo-logistycznego:

- infrastruktura transportowa;
- zasoby:
 - techniczne;
 - ludzkie;
 - informacyjno- informatyczne;
 - finansowe;
- suprastruktura;
- system organizacyjny zapewniający prawidłowe wykorzystanie potencjału systemu doboru.

Do celów procesu doboru pojazdów do zadań transportowych należy zaliczyć zaspokojenie zapotrzebowania potrzeb przewozowych zgłaszanych przez podmioty gospodarcze. Aby zrealizować zadanie przewozowe ładunków konieczne jest określenie struktury przewozu, ustalenie charakterystyk jej elementów, wielkości zadania przewozowego, wielkości potencjału systemu przewozowego oraz organizacji.

Model procesu przewozu ładunków będzie wykorzystywał następujące elementy:

- strukturę;
- charakterystyki elementów struktury;
- zadania przewozowe;
- organizację;

- potencjał systemu przewozowego.

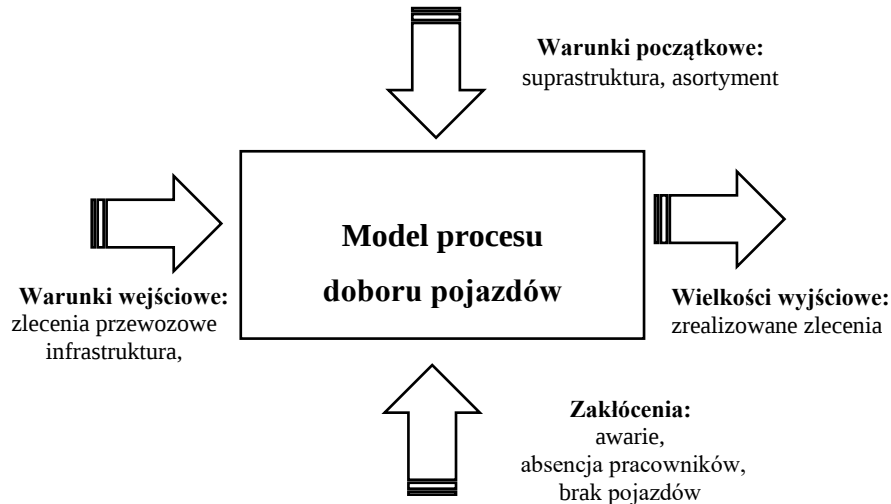
Struktura stanowi powiązania między punktami nadania a punktami odbioru. Stanowi informację o tym, gdzie powstaje strumień ładunku oraz gdzie ten strumień zanika. Do **charakterystyk elementów struktury** zalicza się rzeczywiste właściwości elementów struktury, które określone są na węzłach i połączeniach sieci transportowej. **Zadanie przewozowe**, analizowane w modelu, realizowane jest na podstawie wielkości prognozy (otrzymanej z wykorzystaniem sieci neuronowych na podstawie danych historycznych) na usługi przewozowe zgłaszane przez nadawcę – który jest nabywcą tych usług wynikającą z popytu na rynku. Aby dostosować potencjał przewozowy danego systemu do realizacji zapotrzebowań na usługi przewozowe należy stworzyć odpowiednią strukturę **organizacyjną**. **Potencjał** to wyposażenie systemu przewozowego wraz z charakterystykami przedstawiającymi odwzorowanie rzeczywistych właściwości potencjału.

Model doboru pojazdów do zadań transportowych, będący przedmiotem przeprowadzonych w rozprawie rozważań, dotyczy organizacji i doboru pojazdów do przewozu ładunków wynikających z zapotrzebowania odbiorców.

Założono, że w modelu odwzorowuje się proces doboru pojazdów do zadań transportowych transportem drogowym w różnych czasach przemieszczania w zależności od typu połączenia, liczby i rodzaju dostępnego typu pojazdu. Problem planowania przewozu ładunków polega na organizacji procesu przewozowego, aby koszty realizacji wszystkich zadań były jak najmniejsze, a czas przewozu możliwie krótki.

Przy konstruowaniu modelu należy uwzględnić nie tylko wiele warunków brzegowych i ograniczeń, ale również odchylenie od planowanych wartości w zakresie czasu przewozu ładunku i kosztów.

Budując model procesu doboru pojazdów do zadań transportowych uwzględniono warunki wejściowe, warunki początkowe, zakłócenia oraz wielkości wyjściowe. Stosując metody modelowania matematycznego, opracowano zatem autorski **Model Procesu Doboru Pojazdów (MPDP)**. W modelu uwzględniono te elementy procesu, które umożliwiają odwzorowanie procesu doboru dla różnych sytuacji decyzyjnych (rys. 14).



Rys. 13. Model procesu doboru pojazdów

Źródło: opracowanie własne.

Model **PDP** zawiera więc następujące elementy:

GP – graf struktury procesu (połączeń transportowych);

EP – zbiór pozostałych elementów procesu (środków transportu, dostawców, odbiorców i innych);

FP – zbiór charakterystyk elementów procesu przedstawiających rzeczywiste właściwości (szczególnie charakterystyki dostępności i ograniczeń);

ZP – wielkość strumienia zgłoszeń identyfikowanych na wejściu do procesu (prognozy zapotrzebowania na przewóz);

OP – organizacja realizacji przewozów.

3.2. Modelowanie matematyczne doboru pojazdów do zadań transportowych

3.2.1 Identyfikacja danych wejściowych i parametryzacja elementów

Uwzględniając powyższe, **Model Procesu Doboru Pojazdów (MPDP)** będzie zapisany, jako uporządkowana piętka, postaci:

$$\mathbf{MPDP} = \langle \mathbf{GP}, \mathbf{EP}, \mathbf{FP}, \mathbf{ZP}, \mathbf{OP} \rangle \quad (27)$$

Proces doboru pojazdów wyznaczony będzie w wyniku rozwiązania zadania optymalizacyjnego sformułowanego adekwatnie do rozważanej sytuacji decyzyjnej. Sformułowanie zadania wymaga zdefiniowania danych i ich charakterystyk zmiennych decyzyjnych, ograniczeń oraz funkcji kryterium, będącej miernikiem, jakości rozwiązania zadania.

Wśród podstawowych elementów procesu należy wymienić typy stosowanych do ich przewozu środków transportowych oraz rodzaje przewożonych ładunków. Zbiór S numerów rodzajów stosowanych do przewozu środków transportowych zapisano następująco:

$$S = \{s: s = 1, \dots, s', \dots, S\} \quad (28)$$

Natomiast symbolem M określono zbiór numerów rodzajów przewożonych ładunków:

$$M = \{m: m = 1, \dots, m', \dots, M\} \quad (29)$$

3.2.2 Opis struktury sieci drogowej

Biorąc pod uwagę wcześniejsze rozważania, w strukturze sieci drogowej uwzględniono następujące elementy:

- punkty nadania ładunku (fabryki, hurtownie, rampy przeładunkowe itp.) stanowiące wejścia do sieci;
- punkty odbioru ładunku (sklepy, przedsiębiorstwa produkcyjne, hurtownie, rampy przeładunkowe itp.) stanowiące wyjścia z sieci;
- węzły sieci drogowej.

Elementami struktury sieci drogowej, przedstawionymi w modelu są punkty nadania ładunków, punkty odbioru ładunków (stanowiące wejście do i wyjścia z sieci) oraz węzły sieci drogowej, zarówno występujące w rzeczywistości (np. skrzyżowania) jak i przyjęte na potrzeby modelowania. Aby opisać sieć drogową w języku matematycznego modelowania należy zidentyfikować poszczególne elementy struktury tej sieci, relacje występujące między nimi oraz istotne z punktu widzenia badań charakterystyki elementów struktury. Strukturę sieci drogowej przedstawiono w postaci grafu, tj.:

$$GP = \langle V, LP \rangle \quad (30)$$

gdzie:

V – jest zbiorem numerów: punktów nadania ładunku, punktów odbioru oraz węzłów sieci drogowej (wierzchołków grafu);

LP – jest zbiorem odcinków linii drogowej (łuków grafu).

Na potrzeby prowadzonych w rozprawie badań przyjęto, że zbiór V numerów wszystkich wierzchołków grafu jest zbiorem postaci:

$$V = \{v: v = 1, \dots, v', \dots, V\} \quad (31)$$

gdzie V jest liczbą wierzchołków grafu.

Ponieważ może zdarzyć się, że punkt przyjęcia ładunku jest zarazem punktem odbioru (rampy przeładunkowe, centra intermodalne, firmy przemysłowe itp.), dla przejrzystości

przyjęto, że te elementy modelu odwzorowano dwa razy. Raz jako punkt nadania i drugi raz jako punkt odbioru.

Ze względu na potrzebę rozróżnienia różnych typów wierzchołków grafu przyjęto, że na zbiorze V zadane jest odwzorowanie α , które przeprowadza elementy zbioru V w zbiór $\{1,2,3\}$, tj.:

$$\alpha : V \longrightarrow \{1,2,3\}$$

przy czym jeżeli:

$\alpha(v)=1$, wtedy element o numerze v , ($v \in V$) jest punktem nadania ładunku w rozważanej sieci drogowej;

$\alpha(v)=2$, wtedy element o numerze v , ($v \in V$) jest punktem odbioru ładunku w rozważanej sieci drogowej;

$\alpha(v)=3$, wtedy element o numerze v , ($v \in V$) jest węzłem pośrednim w rozważanej sieci drogowej.

Biorąc pod uwagę powyższe przyjęto, że zbiór NL będzie zbiorem numerów punktów nadania, tj.:

$$NL = \{v \equiv nl : \alpha(v) = 1, \quad \text{dla } v \in V\} \quad (32)$$

Zbiór punktów odbioru zapisany zostanie jako OL , który jest zbiorem postaci:

$$OL = \{v \equiv ol : \alpha(v) = 2, \quad \text{dla } v \in V\} \quad (33)$$

Zbiór węzłów pośrednich zapisany zostanie jako W , który jest zbiorem postaci:

$$W = \{v \equiv w : \alpha(v) = 3, \quad \text{dla } v \in V\} \quad (34)$$

Dla wyeliminowania sytuacji, gdy dana miejscowość jest jednocześnie nadawcą ładunku i odbiorcą lub węzłem pośrednim każda z miejscowości w zależności od potrzeb może zostać opisana jedną, dwoma lub trzema różnymi, symbolami v (dla nadawcy odbiorcy lub węzła pośredniego).

Zatem zbiór V jest sumą zbiorów NL , OL i W

$$V = NL \cup OL \cup W \quad (35)$$

Zbiory NL , OL i W z definicji są zbiorami rozłącznymi parami, tj.:

$$NL \cap OL = \emptyset, \quad NL \cap W = \emptyset, \quad W \cap OL = \emptyset, \quad (36)$$

Dla zdefiniowana struktury grafu niezbędne jest również odwzorowanie powiązań między poszczególnymi wierzchołkami. W tym celu przyjmuje się założenie, że na iloczynie kartezjańskim zbiorów $V \times V$ zadane jest odwzorowanie β , które elementy tego iloczynu przeprowadzają w zbiór $\{0,1\}$, tj.:

$$\beta: V \times V \longrightarrow \{0,1\}$$

przy czym jeżeli $\beta(v,v')=1$, wtedy między wierzchołkami v, v' , ($v, v' \in V$) oraz $v \neq v'$ istnieje bezpośrednie połączenie drogowe, w przeciwnym przypadku $\beta(v,v')=0$.

Zbiór **LP** bezpośrednich połączeń drogowych zapisano w postaci:

$$LP = \{(v, v'): \beta(v, v') = 1, \text{ dla } v, v' \in V \wedge v \neq v'\} \quad (37)$$

Założono, że dla każdej relacji przewozu nadawca – odbiorca, gdzie $nl \in NL$ jest punktem nadania, $ol \in OL$ punktem odbioru ładunku, natomiast symbolem **E** określono zbiór relacji przewozu $(nl, ol) \in E$. Ponadto przyjęto, że istnieje zbiór dróg przewozu oznaczony symbolem P^{nlol} wiążących początek relacji przewozu z jej końcem $nl \in NL$, $ol \in OL$. Pojedynczą drogę w danej relacji przewozu (nl, ol) numerować będziemy indeksem p , przy czym $p \in P^{nlol}$. Przy czym graf struktury jest spójny tj.:

$$\begin{aligned} \forall (nl, ol) \in E \quad \exists d^{p, (nl, ol)} \in P^{(nl, ol)} \\ d^{p, (nl, ol)} = \langle nl, \dots, v, \dots, v', \dots, ol \rangle \end{aligned} \quad (38)$$

gdzie:

$P^{(nl, ol)}$ – zbiór dróg w relacji (nl, ol) ;

$d^{p, (nl, ol)}$ – droga o numerze p w relacji (nl, ol) .

P – zbiór wszystkich dróg $P^{(nl, ol)} \subset P$;

3.2.3 Charakterystyki elementów struktury sieci drogowej oraz środków transportu

Rozpatrywany w dysertacji problem badawczy dotyczy doboru pojazdów dla realizacji zadania przewozowego. Z punktu widzenia prowadzonych rozważań niezbędne jest zidentyfikowanie charakterystyk wierzchołków i łuków sieci transportowej.

Zakłada się, każdy łuk/połączenie drogowe $((v, v') \in LP)$ będzie charakteryzowany następującymi parametrami:

- długością połączenia;
- rodzajami środków transportowych mogących przejeżdżać danym łukiem transportowym;
- przeciętną prędkość przejazdu przez połączenie transportowe (zadaną w postaci zmiennych losowych).

Na elementach zbioru **LP** zadane jest odwzorowanie l , które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór R^+ , tj.:

$$l : LP \longrightarrow R^+$$

przy czym wielkość $l(v, v') \in \mathbf{R}^+$ ma interpretację długości połączenia drogowego (v, v') .

Kolejnym parametrem koniecznym dla skonstruowania prawidłowego modelu jest przyporządkowanie środków transportowych do połączeń. Na elementach iloczynu kartezjańskiego zbiorów LP i S zadane jest odwzorowanie γ które elementy tego zbioru przeprowadzają w zbiór $\{0,1\}$, tj.:

$$\gamma: LP \times S \longrightarrow \{0,1\}$$

przy czym jeżeli $\gamma((v, v'), s) = 1$, wtedy gdy s -ty typ środka transportowego może przemieszczać się na połączeniu transportowym (v, v') , w przeciwnym przypadku $\gamma((v, v'), s) = 0$.

Uwzględniając powyższe zbiór środków transportowych mogących przemieszczać się na połączeniach transportowych (v, v') zapisano następująco:

$$\forall (v, v') \in LP \quad S(v, v') = \{s: \gamma((v, v'), s) = 1 \text{ dla } s \in S\} \quad (39)$$

Na potrzeby prowadzonych w rozprawie badań przyjęto, że dobę podzielono na okresy czasu ze względu na natężenie ruchu. Uwzględniając powyższe zbiór T numerów okresów zapisano w postaci:

$$T = \{t: t = 1, \dots, t', \dots, T\} \quad (40)$$

Parametrem modelu, zadany w postaci rozkładu zmiennej losowej, jest prędkość przejazdu środków transportowych typu s z ładunkiem typu m , w przedziale czasu t przez połączenie transportowe (v, v') . Na elementach iloczynu kartezjańskiego zbiorów T, LP, M i S dane jest odwzorowanie vp , które elementy tego iloczynu przeprowadzają w zbiór $\mathbf{R}^+$, tj.:

$$vp: T \times LP \times M \times S(v, v') \longrightarrow \mathbf{R}^+ \quad (41)$$

przy czym wielkość $vp(t, (v, v'), m, s) \in \mathbf{R}^+$ ma interpretację prędkości pojazdu poruszającego się z ładunkiem m na połączeniu drogowym (v, v') , w przedziale czasu t .

Niech $p(vp(t, (v, v'), m, s))$ będzie prawdopodobieństwem zdarzenia polegającego na tym, że prędkość przejazdu środków transportowych typu s z ładunkiem typu m , w przedziale czasu t przez połączenie transportowe (v, v') będzie wynosiła $vp(t, (v, v'), m, s)$.

Przyjmujemy zatem, że rozkład zmiennej losowej o interpretacji prędkości przejazdu środków transportowych typu s z ładunkiem typu m , w przedziale czasu t przez połączenie transportowe (v, v') przyjmuje postać:

$$\{vp(t, (v, v'), m, s), p(vp(t, (v, v'), m, s))\} \quad (42)$$

Kolejną cechą każdego połączenia transportowego jest prędkość maksymalna przejazdu środków transportowych typu s przez połączenie transportowe (v, v') . Na elementach iloczynu

kartezjańskiego zbiorów LP , i $S(v, v')$ zadane jest odwzorowanie v_{max} , które elementy tego iloczynu przeprowadzają w zbiór R^+ , tj.:

$$v_{max}: LP \times S(v, v') \longrightarrow R^+ \quad (43)$$

przy czym wielkość $v_{max}((v, v'), s) \in R^+$ ma interpretację prędkości maksymalnej pojazdu poruszającego się połączeniem drogowym (v, v') .

Oczywiście:

$$\begin{aligned} \forall (v, v') \in LP \quad \forall s \in S(v, v') \quad \forall m \in M, \forall t \in T \\ vp(t, (v, v'), m, s) \leq v_{max}((v, v'), s) \end{aligned} \quad (44)$$

Zatem dla każdego połączenia transportowego określony zostanie wektor danych, postaci:

$$\begin{aligned} \forall (v, v') \in LP, m \in M, t \in T, s \in S \\ wd(v, v') = < \\ l(v, v'), S(v, v'), \{vp(t, (v, v'), m, s), p(vp(t, (v, v'), m, s))\}, v_{max}((v, v'), s) > \end{aligned} \quad (45)$$

Każdego nadawcę charakteryzuje:

- liczba i rodzaje posiadanych pojazdów;
- liczba doków;
- rozkład czasu załadunku ładunku rodzaju m na pojazd typu s ;
- godzina rozpoczęcia pracy;
- godzina zakończenia pracy;

Każdego odbiorcę charakteryzuje:

- liczba doków;
- rozkład czasu rozładunku ładunku rodzaju m z pojazdu typu s ;

Przyjęto, że pojazdami dysponują tylko nadawcy.

Na iloczynie kartezjańskim zbiorów NL i S zadane jest odwzorowanie lv , które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór N tj.:

$$lv: NL \times S \longrightarrow N$$

przy czym wielkość $lv(nl, s) \in N$ ma interpretację liczby pojazdów typu s znajdujących się u nl -tego nadawcy. Symbolem $LV(nl, s)$ oznaczono zbiór pojazdów typu s znajdujących się miejscowości nl .

$$\begin{aligned} \forall nl \in NL, \forall s \in S \\ LV(nl, s) = \{(nl, s, k): k = 1, \dots, k', \dots, l(nl, s)\} \end{aligned} \quad (46)$$

gdzie:

(nl, s, k) – oznacza k -ty numer pojazdu typu s znajdującego się w miejscowości nl ;

$lv(nl, s)$ - oznacza liczbę pojazdów typu s znajdujących się nl .

$$L(nl) = \sum_{s \in S} lv(nl, s) \quad (47)$$

gdzie:

$L(nl)$ – oznacza liczbę pojazdów znajdujących się w miejscowości nl .

Na elementach zbioru NL zadane jest odwzorowanie dk , które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór $\mathbb{N}$ tj.:

$$dk1 : NL \longrightarrow \mathbb{N}$$

przy czym wielkość $dk1(nl)$, $dk1(nl) \in \mathbb{N}$ ma interpretację liczby doków znajdujących się w miejscowości nl .

Na elementach zbioru OL zadane jest odwzorowanie dk , które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór $\mathbb{N}$ tj.:

$$dk2 : OL \longrightarrow \mathbb{N}$$

przy czym wielkość $dk2(ol)$, $dk2(ol) \in \mathbb{N}$ ma interpretację liczby doków znajdujących się w miejscowości nl .

Kolejnym parametrem modelu, zadany w postaci rozkładu zmiennej losowej, jest czas załadunku jednostki typu u ładunku rodzaju m na pojazd typu s w miejscowości nl .

Jednostką ładunku w zależności od potrzeb może być, kilogram, paleta, pojemnik. Jeśli w analizowanym zagadnieniu zastosowana jest inna miara wielkości zadania przewozowego należy ją zmienić, $U = \{u: u=1,2,\dots,U\}$ U - zbiór jednostek ładunkowych.

Na iloczynie kartezjańskim zbiorów NL , S i M zadane jest odwzorowanie $t1$, które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór R^+ tj.:

$$t1 : NL \times S \times M \times U \longrightarrow R^+$$

przy czym wielkość $t1(nl, s, m, u) \in R^+$ ma interpretację czasu załadunku jednostki ładunku rodzaju m na pojazd typu s w miejscowości nl .

Niech $p(t1(nl, s, m, u))$ będzie prawdopodobieństwem zdarzenia polegającego na tym, że czas załadunku jednostki ładunku rodzaju m na pojazd typu s w miejscowości nl będzie wynosił $t1(nl, s, m, u)$

Przyjmujemy zatem, że rozkład zmiennej losowej o interpretacji czasu załadunku jednostki ładunku rodzaju m na pojazd typu s w miejscowości nl przyjmuje postać:

$$\{t1(nl, s, m, u), p(t1(nl, s, m, u))\} \quad (48)$$

Analogicznie, parametrem zadany w postaci rozkładu zmiennej losowej, jest czas rozładunku jednostki typu u ładunku rodzaju m z pojazdu typu s w miejscowości ol . Na zbiorach OL, S, U i M zadane jest odwzorowanie $t2$, które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór R^+ tj.:

$$t2 : OL \times S \times M \times U \longrightarrow R^+ \quad (49)$$

przy czym wielkość $t2(ol, s, m, u) \in R^+$ ma interpretację czasu rozładunku ładunku rodzaju m na pojazd typu s w miejscowości ol .

Niech $p(t2(ol, s, m, u))$ będzie prawdopodobieństwem zdarzenia polegającego na tym, że czas wyładunku jednostki ładunku rodzaju m z pojazdu typu s w miejscowości nl będzie wynosił $t2(ol, s, m, u)$

Przyjmujemy zatem, że rozkład zmiennej losowej o interpretacji czasu wyładunku jednostki ładunku rodzaju m na pojazd typu s w miejscowości ol przyjmuje postać:

$$\{t2(ol, s, m, u), p(t2(ol, s, m, u))\} \quad (50)$$

Na elementach zbioru NL zadane jest odwzorowanie $tp1$, które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór $\{0,1, \dots, 1440\}$ tj.:

$$tp1 : NL \longrightarrow \{1,2, \dots, 1440\}$$

przy czym wielkość $tp1(nl)$, ma interpretację czasu rozpoczęcia pracy w miejscowości nl .

Na elementach zbioru OL zadane jest odwzorowanie $tp2$, które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór $\{0,1, \dots, 1440\}$ tj.:

$$tp2 : OL \longrightarrow \{1,2, \dots, 1440\}$$

przy czym wielkość $tp2(ol)$, ma interpretację czasu rozpoczęcia pracy w miejscowości nl .

Na elementach zbioru NL zadane jest odwzorowanie $tk1$, które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór $\{0,1, \dots, 1440\}$ tj.:

$$tk1 : NL \longrightarrow \{1,2, \dots, 1440\}$$

przy czym wielkość $tk1(nl)$, ma interpretację czasu zakończenia pracy w miejscowości nl .

Na elementach zbioru OL zadane jest odwzorowanie $tk2$, które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór $\{0,1, \dots, 1440\}$ tj.:

$$tk2 : OL \longrightarrow \{1,2, \dots, 1440\}$$

przy czym wielkość $tk2(ol)$, ma interpretację czasu zakończenia pracy w miejscowości ol .

3.2.4 Opis zapotrzebowania na przewozy

W przypadku doboru środków transportowych do zadań niezbędnym jest uwzględnienie wielkości przewożonych ładunków. Na potrzeby badań zakłada się, że potoki pojawiają się na

wejściach procesu, u nadawcy nl ($nl \in \mathbf{NL}$) i przepływają przez tę sieć aż do wyjścia odbiorcy ol , ($ol \in \mathbf{OL}$), z tej sieci.

Wśród podstawowych parametrów procesu należy wymienić zadania transportowe. Zbiór numerów zadań transportowych $\mathbf{Z} = \{z: z=1,2,\dots,Z\}$.

Każde zadanie transportowe określone jest przez:

- nadawcę ładunku nl ;
- odbiorcę ładunku ol ;
- rodzaj przewożonego ładunku m ;
- wielkość przewozu dla zadań przewozowych $Q(z,(nl,ol),m,u)$.

Aby opisać powyższe wielkości na iloczynie kartezjańskim zbiorów $\mathbf{Z}$, i $\mathbf{E}$ zadano odwzorowanie β_1 przekształcające elementy iloczynu w zbiór binarny $\{0, 1\}$:

$$\beta_1: \mathbf{Z} \times \mathbf{E} \longrightarrow \{0,1\}$$

przy czym $\beta_1(z,(nl,ol))=1$ oznacza, że z -te zadanie dotyczy przewozu od nadawcy nl do odbiorcy ol , w przeciwnym przypadku $\beta_1(z,(nl,ol))=0$.

Ponadto na iloczynie kartezjańskim zbiorów $\mathbf{Z}$ i $\mathbf{M}$ zadano odwzorowanie β_2 przekształcające elementy iloczynu w zbiór binarny $\{0, 1\}$:

$$\beta_2: \mathbf{Z} \times \mathbf{M} \longrightarrow \{0,1\}$$

przy czym $\beta_2(z,m)=1$ oznacza, że z -te zadanie dotyczy przewozu ładunku typu m , w przeciwnym przypadku $\beta_2(z,m)=0$.

Istotnym parametrem w analizie doboru środków transportowych do zadań jest wielkość zadania przewozowego. Wielkość ta została wyznaczona jako prognoza z wykorzystaniem sieci neuronowych (rozdział 4.2) Aby ją sparametryzować na iloczynie kartezjańskim zbiorów $\mathbf{Z}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{M}$ i $\mathbf{U}$ zadano odwzorowanie Q przekształcające elementy iloczynu w zbiór liczb rzeczywistych nieujemnych:

$$Q: \mathbf{Z} \times \mathbf{E} \times \mathbf{M} \times \mathbf{U} \longrightarrow \mathbf{R}^+ \cup \{0\}$$

przy czym $Q(z,(nl,ol), m,u)$ oznacza, wielkość przewozu ładunku typu m w zadaniu o numerze z w jednostkach typu u .

W sytuacji gdy istotna jest waga ładunku wzór na wielkość przewozu ładunku typu m w zadaniu o numerze z przyjmuje postać: $Q(z,(nl,ol), m)$

Zatem każde zadanie opisane zostało wektorem parametrów:

$$\forall z \in \mathbf{Z} \quad \mathbf{z} = [m, (nl,ol), Q(z,(nl,ol),m,u): \beta_1(z,(nl,ol))=1, \beta_2(z,m)=1] \quad (51)$$

Ponieważ nie każdy rodzaj pojazdu nadaje się do przewozu każdego rodzaju ładunku na iloczynie kartezjańskim zbiorów S , i M zadano odwzorowanie β_3 przekształcające elementy iloczynu w zbiór binarny $\{0, 1\}$:

$$\beta_3: S \times M \longrightarrow \{0, 1\}$$

przy czym $\beta_3(s, m) = 1$ oznacza, że s -ty pojazd może przewozić ładunek u m -tego rodzaju.

Wielkość ładunku wyjeżdżających od nl -tego nadawcy równa:

$$\begin{aligned} & \forall nl \in NL \forall u \in U \\ Q(nl, u) &= \sum_{z \in Z} \sum_{\substack{ol \in OL \\ \beta_1(z(nl, ol))=1}} \sum_{m \in M} Q(z, (nl, ol), m, u) \end{aligned} \quad (52)$$

Wielkość ładunku przyjeżdżających do ol -tego nadawcy równa:

$$\begin{aligned} & \forall ol \in OL \forall u \in U \\ Q(ol, u) &= \sum_{z \in Z} \sum_{\substack{nl \in NL \\ \beta_1(z(nl, ol))=1}} \sum_{m \in M} Q(z, (nl, ol), m, u) \end{aligned} \quad (53)$$

Oczywiście:

$$\forall u \in U \sum_{nl \in NL} Q(nl) = \sum_{ol \in OL} Q(ol) \quad (54)$$

Na elementach iloczynu kartezjańskiego zbiorów M i S zadane jest odwzorowanie k , które elementy tego iloczynu przeprowadzają w zbiór R^+ , tj.:

$$k: M \times S \longrightarrow R^+,$$

przy czym wielkość $k(m, s) \in R^+$ ma interpretację kosztu jednostkowego (1 km) przejazdu środkiem transportowym (wynikający np. ze spalania) typu s z ładunkiem typu m .

Na elementach iloczynu kartezjańskiego zbiorów S i U π , które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór R^+ tj.:

$$\pi: S \times U \longrightarrow R^+$$

przy czym wielkość $\pi(s, u) \in R^+$ ma interpretację pojemności pojazdu typu s w jednostkach typu u .

Na elementach iloczynu kartezjańskiego zbiorów S i U zadane jest odwzorowanie q , które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór R^+ tj.:

$$q: S \times U \longrightarrow R^+$$

przy czym wielkość $q(s, u) \in R^+$ ma interpretację ładowności pojazdu typu s .

3.2.5 Opis trybu realizacji i przydziału zadań transportowych

W modelu przyjęto dwa tryby obsługi zadań: klienci obsługiwani są indywidualnie przeciwnym przypadku klienci obsługiwani są zbiorczo co oznacza, że zadania są łączone. W związku z powyższym na zdefiniowano 2-elementowy zbiór H , którego elementami są tryby obsługi zadań.

$$H = \{h: h = 1, 2\} \quad (55)$$

Jeśli $h=1$ wówczas mamy do czynienia obsługą indywidualną, gdy $h=2$ zadania są łączone. W sytuacji gdy $h=2$ mamy do czynienia z zagadnieniem komiwojażera.

Przyjęto ponadto cztery kryteria realizacji zadań transportowych, tj.: najdalsze, najbliższe, największy i najmniejszy. Aby uwzględnić te kryteria modelu zdefiniowano 4-elementowy zbiór B :

$$B = \{b: b = 1, 2, 3, 4\} \quad (56)$$

Jeśli $b=1$ oznacza to, że jako pierwsze wykonane zostanie zadanie, które jest najdalej położone od nadawcy. W przypadku $b=2$, pierwszym zadaniem do wykonania będzie zadanie, które jest położone najbliżej nadawcy. Gdyby $b=3$, pierwszym zadaniem do wykonania będzie zadanie największe pod względem przewożonego ładunku, natomiast w przypadku, gdy $b=4$, zadanie, które zostanie wykonane jako pierwsze będzie tym, w którym ładunek jest najmniejszy. We wzorach 57-60 przedstawiono wzory umożliwiające wyznaczenie zadań które zostaną wykonane jako pierwsze w zależności od przyjętego b .

$$b=1$$

$$\max_{\substack{dp, (nl, ol) \in P^{(nl, ol)} \\ z \in Z \\ \beta 1(z, (nl, ol)) = 1}} \sum_{(v, v') \in dp, (nl, ol)} l(v, v') \quad (57)$$

$$b=2$$

$$\min_{\substack{dp, (nl, ol) \in P^{(nl, ol)} \\ z \in Z \\ \beta 1(z, (nl, ol)) = 1}} \sum_{(v, v') \in dp, (nl, ol)} l(v, v') \quad (58)$$

$$b=3$$

$$\forall u \in U \quad \max_{z \in Z} Q(z, (nl, ol), m, u) \quad (59)$$

$$b=4$$

$$\forall u \in U \quad \min_{z \in Z} Q(z, (nl, ol), m, u) \quad (60)$$

W przypadku, gdy tryb wykonywania zadań jest zbiorczy (jednoczesny), wówczas jako pierwsze, w przypadku gdy $b=1$, zostanie wykonane zadanie najdalej położone od nadawcy. Jednak w przypadku, gdy pojemność pojazdu będzie większa niż wymagana do wykonania zadania pierwszego, jednocześnie wykonane zostanie kolejne zadanie, którego trasa znajdzie się najbliżej zadania pierwszego, a jednocześnie nie będzie przekraczała pojemności pojazdu.

3.2.6 Zmienne decyzyjne

Optimalny system doboru przewozów ładunków to taki, który umożliwia wykonanie wszystkich zleceń w minimalnym czasie i przy minimalnych kosztach. Zostanie on wyznaczony w wyniku rozwiązania zadania optymalizacyjnego sformułowanego adekwatnie do rozważanej sytuacji decyzyjnej. Wymaga to zdefiniowania dwóch typów zmiennych decyzyjnych: binarny i rzeczywisty.

Model zawiera 4 rodzaje zmiennych typu binarnego. Pierwsza z nich dotyczy przyporządkowania pojazdów do zadań transportowych. Założono, że na iloczynie kartezjańskim $NL \times S \times K(s) \times Z$ zadane zostało odwzorowanie x_1 , które elementom tego iloczynu przyporządkowuje liczby należące do zbioru dwuelementowego $\{0, 1\}$, tj.:

$$x_1: NL \times S \times K(s) \times Z \longrightarrow \{0,1\}$$

W przypadku, gdy $x_1(nl, s, k, z)=1$ oznacza to, że do wykonania zadania z zostanie wykorzystany k -ty pojazd typu s od nadawcy nl . W przeciwnym przypadku $x_1(nl, s, k, z)=0$.

Odwzorowanie x można przedstawić w postaci macierzy X :

$$X_1 = [x_1(nl, s, k, z): x_1(nl, s, k, z) \in \{0, 1\}] \quad (61)$$

Druga z nich dotyczy wyniku z uwzględnienia problemu n -komiwożażera w ustaleniu trasy dla pojazdów. Założono, że na iloczynie kartezjańskim $LP \times Z \times S \times K(s)$ zadane zostało odwzorowanie x_2 , które elementom tego iloczynu przyporządkowuje liczby należące do zbioru dwuelementowego $\{0, 1\}$, tj.:

$$x_2: LP \times Z \times S \times K(s) \longrightarrow \{0,1\}$$

W przypadku, gdy $x_2((v, v'), z, s, k)=1$ oznacza to, że łuk (v, v') należy do trasy k -tego pojazdu s -tego typu wykonującego zadanie z . W przeciwnym przypadku $x_2(v, v', z, s, k)=0$.

Odwzorowanie x można przedstawić w postaci macierzy X :

$$X_2 = [x_2(v, v', z, s, k): x_2((v, v'), z, s, k) \in \{0, 1\}] \quad (62)$$

Kolejna zmienna decyzyjna typu binarnego odpowiada za łączenie zadań w tym samym przejeździe. Założono, że na iloczynie kartezjańskim $H \times Z \times Z$ zadane zostało odwzorowanie

y_1 , które elementom tego iloczynu przyporządkowuje liczby należące do zbioru dwuelementowego $\{0, 1\}$, tj.:

$$y_1: \mathbf{H} \times \mathbf{Z} \times \mathbf{Z} \longrightarrow \{0,1\}$$

W przypadku, gdy $y_1(h, z, z')=1$ oznacza to, że zadania z, z' zostaną wykonane w tym samym przejeździe. W przeciwnym przypadku $y_1(h, z, z')=0$. Oczywiście w sytuacji $h=1$ $y_1(1, z, z')=0$.

Odwzorowanie y_1 można przedstawić w postaci macierzy $\mathbf{Y1}$:

$$\mathbf{Y1} = [y_1(h, z, z'): y_1(h, z, z') \in \{0, 1\}] \quad (63)$$

Założono, że na iloczynie kartezjańskim $\mathbf{B} \times \mathbf{Z}$ zadane zostało odwzorowanie y_2 , które elementom tego iloczynu przyporządkowuje liczby należące do zbioru dwuelementowego $\{0, 1\}$, tj.:

$$y_2: \mathbf{B} \times \mathbf{Z} \longrightarrow \{0,1\}$$

W przypadku, gdy $y_2(b, z)=1$ oznacza to, że zadanie z zostanie wykonane z zastosowaniem metody pierwszeństwa b , oczywiście w przeciwnym przypadku $y_2(b, z)=0$.

Odwzorowanie y_2 można przedstawić w postaci macierzy $\mathbf{Y2}$:

$$\mathbf{Y2} = [y_2(b, z): y_2(b, z) \in \{0, 1\}] \quad (64)$$

W celu formalnego zapisu modelu matematycznego należy zdefiniować rzeczywisty typ zmiennych decyzyjnych określający czas wyjazdu środków transportowych od nadawcy ładunku.

Na elementach iloczynu kartezjańskiego zbiorów $\mathbf{Z}$ i $\mathbf{NL}$ zadano odwzorowanie tw , które elementy zbioru przeprowadzają w zbiór $\mathbf{R}^+$, tj.:

$$tw: \mathbf{Z} \times \mathbf{NL} \longrightarrow \mathbf{R}^+,$$

przy czym wielkość $tw(z, nl) \in \mathbf{R}^+$ ma interpretację czasu, w którym rozpoczęto wykonanie zadania z u nadawcy nl .

$$\mathbf{TW} = [tw(z, nl): tw(z, nl) \in \mathbf{R}^+] \quad (65)$$

3.2.7 Ograniczenia

Ograniczenia zadania optymalizacji doboru pojazdów do zadań transportowych są ze względu na:

- typ zmiennych decyzyjnych:

$$\forall (v, v') \in \mathbf{LP}, \forall s \in \mathbf{S}, \forall b \in \mathbf{B}, \forall k \in \mathbf{K}(s), \forall nl \in \mathbf{NL}, \forall ol \in \mathbf{OL}, \quad (66)$$

$$\forall z, z' \in \mathbf{Z}, \forall h \in \mathbf{H},$$

$$\begin{aligned}
 x1(nl, s, k, z) &\in \{0, 1\} \\
 x2((v, v'), z, s, k) &\in \{0, 1\} \\
 y1(h, z, z') &\in \{0, 1\} \\
 y2(b, z) &\in \{0, 1\} \\
 tw(z, nl) &> 0
 \end{aligned}$$

- realizację zadań przewozowych:

$$\begin{aligned}
 \forall z \in \mathbf{Z}, \quad \forall nl \in \mathbf{NL} \quad \forall m \in \mathbf{M}, \quad \forall u \in \mathbf{U} \\
 \sum_{s \in \mathbf{S}} \sum_{k \in K(s)} x1(nl, s, k, z) \pi(s, u) \geq Q(z, (nl, ol), m, u) \\
 \sum_{s \in \mathbf{S}} \sum_{k \in K(s)} x1(nl, s, k, z) q(s, u) \geq Q(z, (nl, ol), m, u)
 \end{aligned} \tag{67}$$

- liczbę taboru:

$$\begin{aligned}
 \forall s \in \mathbf{S}, \quad \forall nl \in \mathbf{NL} \\
 \sum_{z \in \mathbf{Z}} \sum_{k \in K(s)} x1(nl, s, k, z) \geq lw(n, s)
 \end{aligned} \tag{68}$$

- wybór jednej z metod pierwszeństwa realizacji:

$$\begin{aligned}
 \forall z \in \mathbf{Z} \\
 \sum_{b \in \mathbf{B}} y2(b, z) = 1
 \end{aligned} \tag{69}$$

- wybór jednego z trybów realizacji:

$$\begin{aligned}
 \forall z \in \mathbf{Z} \\
 \sum_{h \in \mathbf{H}} y1(h, z, z') = 1
 \end{aligned} \tag{70}$$

- czas dojazdu:

$$\begin{aligned}
 \forall z \in \mathbf{Z}, \quad \forall (v, v') \in \mathbf{LP}, \quad \forall d^{p, (nl, pl)} \in \mathbf{P}^{(nl, pl)}, \quad \forall nl \in \mathbf{NL}, \quad \forall ol \in \mathbf{OL} \quad \forall u \in \mathbf{U} \\
 \sum_{(v, v') \in d^{p, (nl, ol)}} \sum_{s \in \mathbf{S}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \sum_{k \in K(s)} \left(\frac{l(v, v')}{E(\{vp(t, (v, v'), m, s), p(vp(t, (v, v'), m, s)\},)} \right. \\
 \cdot x1(nl, s, k, z) \cdot x2((v, v'), z, s, k) \\
 + E(\{t2(ol, s, m, u), p(t2(ol, s, m, u)\}) \cdot Q(z, (nl, ol), m, u) \\
 \left. + E(\{t1(nl, s, m, u), p(t1(nl, s, m, u)\}) Q(z, (nl, ol), m, u) \right) \\
 \leq T_{max}
 \end{aligned} \tag{71}$$

gdzie:

T_{max} - maksymalny koszt wykonania pojedynczego zadania zadań.

- maksymalny koszt (globalny):

$$\sum_{(nl,ol) \in E} \sum_{d^{p,(nl,pl)} \in P^{(nl,pl)}} \sum_{(v,v') \in d^{p,(nl,ol)}} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K(s)} k(m,s) l(v,v') x1(nl,s,k,z) \cdot x2((v,v'),z,s,k) \leq K_{max} \quad (72)$$

gdzie:

K_{max} - maksymalny koszt wykonania wszystkich zadań.

- maksymalny koszt dla poszczególnych nadawców:

$$\forall nl \in NL \quad \sum_{(nl,ol) \in E(nl)} \sum_{d^{p,(nl,pl)} \in P^{(nl,pl)}} \sum_{(v,v') \in d^{p,(nl,ol)}} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K(s)} k(m,s) x1(nl,s,k,z) \cdot x2((v,v'),z,s,k) \leq K_{max}(nl) \quad (73)$$

gdzie:

K_{max} - maksymalny koszt wykonania wszystkich zadań nadawcy nl ;

$E(nl, ol)$ - zbiór relacji przewozu nadawcy nl .

- możliwości realizowania kilka zadań w danej trasie:

$$\forall s \in S, \quad \forall nl \in NL, \quad \forall k \in K(s) \quad \sum_{z \in Z} x1(nl,s,k,z) \leq \begin{cases} 1 & \text{gdy } y2(b,z) = 0 \\ |Z| & \text{gdy } y2(b,z) = 1 \end{cases} \quad (74)$$

gdzie:

$|Z|$ - liczebność zbioru Z .

- nieprzekroczenia pojemności pojazdu:

$$\forall s \in S, \quad nl \in NL \quad \forall k \in K(s) \quad \forall (nl, ol) \in E \quad \forall s \in S \quad \forall m \in M \quad \forall u \in U \quad \sum_{\substack{z \in Z \\ y2(b,z)=1}} x1(nl,s,k,z) Q(z, (nl, ol), m, u) \leq \pi(s, u) \quad (75)$$

- nieprzekroczenia ładowności pojazdu:

$$\forall s \in S, \quad nl \in NL \quad \forall k \in K(s) \quad \forall (nl, ol) \in E \quad \forall s \in S \quad \forall m \in M \quad \forall z \in Z \quad \sum_{\substack{z \in Z \\ y2(b,z)=1}} x1(nl,s,k,z) Q(z, (nl, ol), m) \leq q(s) \quad (76)$$

- na wybór drogi:

$$\exists! d^{p,(nl,pl)} \in P^{(nl,pl)} \quad (v,v') \in \exists! d^{p,(nl,pl)} \in P^{(nl,pl)} \quad \sum_{z=1}^Z \sum_{v \in V} \sum_{v' \in V} x2((v,v'),z,s,k) = 1 \quad (77)$$

- rozpoczęcie i zakończenie trasy w bazie:

$$\begin{aligned} \forall z \in \mathbf{Z}, \forall s \in \mathbf{S} \\ \sum_{v \in \mathbf{NL}} x_{2((v, v'), z, s, k)} = 1 \end{aligned} \quad (78)$$

$$\begin{aligned} \forall z \in \mathbf{Z}, \forall s \in \mathbf{S} \\ \sum_{v' \in \mathbf{OL}} x_{2((v, v'), z, s, k)} = 1 \end{aligned} \quad (79)$$

- na nieprzekroczenie czasu rozpoczęcia pracy nadawcy:

$$\forall z \in \mathbf{Z}, \forall nl \in \mathbf{NL}, \quad (80)$$

$$tw(z, nl) \geq tp1(nl)1$$

- na nieprzekroczenie czasu zakończenia pracy nadawcy:

$$\forall z \in \mathbf{Z}, \forall ol \in \mathbf{OL} \quad (81)$$

$$tw(z, nl) \leq tk1(nl)1$$

- na nieprzekroczenie czasu rozpoczęcia odbiorcy:

$$\begin{aligned} & \forall z \in \mathbf{Z}, \forall ol \in \mathbf{OL} \forall nl \in \mathbf{NL} \forall u \in \mathbf{U} \\ tw(z, nl) + & \sum_{d^{p,(nl,pl)} \in \mathbf{P}^{(nl,pl)}} \sum_{(v,v') \in d^{p,(nl,ol)}} \sum_{s \in \mathbf{S}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \sum_{k \in K(s)} \left(\frac{l(v, v')}{E(\{vp(t, (v, v'), m, s), p(vp(t, (v, v'), m, s)\})\})} \cdot x1(nl, s, k, z) \cdot x2((v, v'), z, s, k) \right. \\ & \left. + E(\{t2(ol, s, m, u), p(t2(ol, s, m, u))\}) \cdot Q(z, (nl, ol), m, u) + E(\{t1(nl, s, m, u), p(t1(nl, s, m, u))\})Q(z, (nl, ol), m, u) \right) \\ & \geq tp1(nl) \end{aligned} \quad (82)$$

- na nieprzekroczenie czasu zakończenia pracy odbiorcy:

$$\begin{aligned} & \forall z \in \mathbf{Z} \quad \forall ol \in \mathbf{OL} \forall nl \in \mathbf{NL} \forall u \in \mathbf{U} \quad (83) \\ tw(z, nl) + & \sum_{d^{p,(nl,pl)} \in \mathbf{P}^{(nl,pl)}} \sum_{(v,v') \in d^{p,(nl,ol)}} \sum_{s \in \mathbf{S}} \sum_{m \in \mathbf{M}} \sum_{k \in K(s)} \frac{l(v, v')}{E(\{vp(t, (v, v'), m, s), p(vp(t, (v, v'), m, s)\})\})} \cdot x1(nl, s, k, z) \\ & \cdot x2((v, v'), z, s, k) + E(\{t2(ol, s, m, u), p(t2(ol, s, m, u))\}) \cdot Q(z, (nl, ol), m, u) \\ & + E(\{t1(nl, s, m, u), p(t1(nl, s, m, u))\})Q(z, (nl, ol), m, u) \leq tk2(ol) \end{aligned}$$

3.2.8 Kryteria oceny/funkcja celu

Wśród kryteriów oceny modelu znajdują się:

- koszt globalny:

$$G = \sum_{(nl,ol) \in E} \sum_{dp,(nl,pl) \in P^{(nl,pl)}} \sum_{(v,v') \in dp,(nl,ol)} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K(s)} k(m,s) l(v,v') x1(nl,s,k,z) \cdot x2((v,v'),z,s,k) \longrightarrow \min \quad (84)$$

- suma zrealizowanego dystansu pojazdów:

$$D = \sum_{(nl,ol) \in E} \sum_{dp,(nl,pl) \in P^{(nl,pl)}} \sum_{(v,v') \in dp,(nl,ol)} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K(s)} l(v,v') x1(nl,s,k,z) x2((v,v'),z,s,k) \longrightarrow \min \quad (85)$$

- czas trwania procesu realizacji pojedynczego zadania transportowego:

$$\begin{aligned} & \forall (nl,ol) \in E \quad \forall m \in M \quad \forall z \in Z \quad \forall t \in T \quad (86) \\ T1(z) = & \sum_{s \in S} (E(\{t2(ol,s,m,u), p(t2(ol,s,m,u))\}) \cdot Q(z, (nl,ol), m, u) \\ & + E(\{t1(nl,s,m,u), p(t1(nl,s,m,u))\}) Q(z, (nl,ol), m, u)) x1(nl,s,k,z) \\ & + \sum_{dp,(nl,pl) \in P^{(nl,pl)}} \sum_{(v,v') \in dp,(nl,ol)} \frac{l(v,v')}{E(\{vp(t, (v,v'), m, s), p(vp(t, (v,v'), m, s))\})} \\ & x1(nl,s,k,z) x2((v,v'),z,s,k) \rightarrow \min \end{aligned}$$

- globalny czas trwania procesu realizacji zadań transportowych:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{TG} \tag{87} \\
 &= \left(\sum_{(nl,ol) \in E} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{z \in Z} \sum_{u \in U} \sum_{ol \in OL} \frac{E(\{t2(ol, s, m, u), p(t2(ol, s, m, u))\})}{dk2(ol)} \cdot Q(z, (nl, ol), m, u) x1(nl, s, k, z) \right. \\
 &+ \sum_{(nl,ol) \in E} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{z \in Z} \sum_{u \in U} \sum_{nl \in NL} \frac{E(\{t1(nl, s, m, u), p(t1(nl, s, m, u))\})}{dk1(nl)} Q(z, (nl, ol), m, u) x1(nl, s, k, z) \\
 &+ \left. \sum_{t \in T} \sum_{dp, (nl, pl) \in P^{(nl, pl)}} \sum_{(v, v') \in dp, (nl, ol)} \frac{l(v, v')}{E(\{vp(t, (v, v'), m, s), p(vp(t, (v, v'), m, s))\})} x1(nl, s, k, z) x2((v, v'), z, s, k) \right) \\
 &\rightarrow \min
 \end{aligned}$$

- współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej ze względu na pojemność:

$$\begin{aligned}
 & \forall u \in U \\
 & \tau(u) = \frac{\sum_{(nl,ol) \in E} \sum_{dp, (nl, pl) \in P^{(nl, pl)}} \sum_{(v, v') \in dp, (nl, ol)} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K(s)} \pi(s, u) x1(nl, s, k, z) \cdot x2((v, v'), z, s, k)}{\sum_{nl \in NL} Q(nl, u)} \rightarrow \max \tag{88}
 \end{aligned}$$

- współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej ze względu na tonaż:

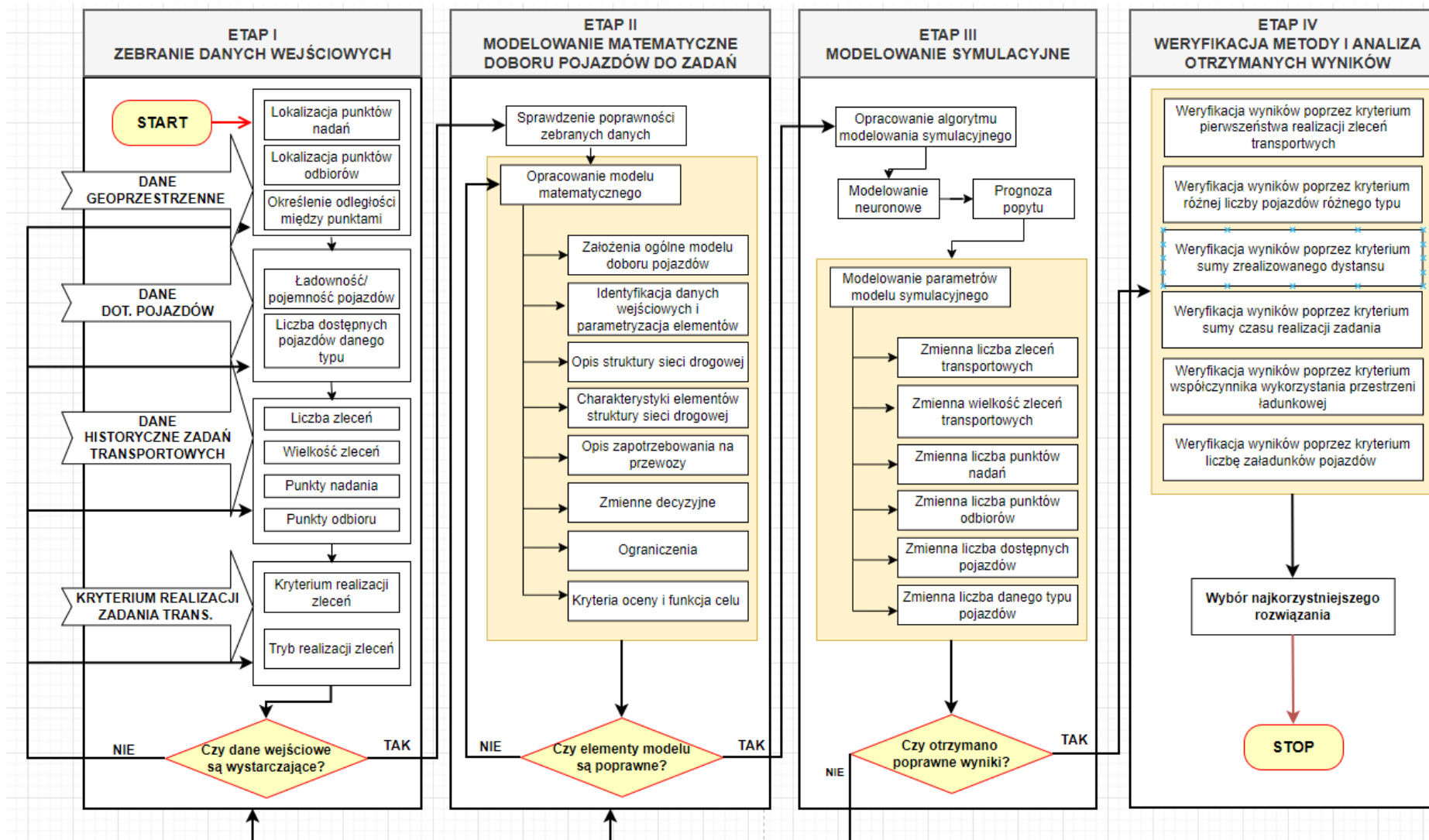
$$\begin{aligned}
 & \varphi = \frac{\sum_{z \in Z} \sum_{(nl,ol) \in E} \sum_{dp, (nl, pl) \in P^{(nl, pl)}} \sum_{(v, v') \in dp, (nl, ol)} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K(s)} q(s) x1(nl, s, k, z) \cdot x2((v, v'), z, s, k)}{\sum_{nl \in NL} Q(nl)} \rightarrow \max \tag{89}
 \end{aligned}$$

4. METODA WSPOMAGANIA DOBORU POJAZDÓW DO ZADAŃ TRANSPORTOWYCH

4.1. Założenia metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych

W pojęciu metody zawiera się określona struktura postępowania, złożona z etapów, dająca określony skutek i zmierzająca do osiągnięcia zamierzonego celu. Zgodnie z [168] metoda, to świadomie stosowany sposób postępowania mający prowadzić do osiągnięcia zamierzonego celu.

Graficzną prezentację opracowanej metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Metoda wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych

Źródło: opracowanie własne.

W opracowanej metodzie wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych wyróżniono 4 główne etapy:

1. Etap I: wprowadzenie danych wejściowych, w których wyróżniono:
 - a. lokalizację punktów nadania ładunków;
 - b. lokalizację punktów odbioru ładunków;
 - c. kryterium przydziału realizacji zadania;
 - d. prognozę liczby i wielkości zleceń transportowych wyrażonych w tonach i m³;
 - e. ładowność dostępnych pojazdów wyrażoną w tonach;
 - f. liczbę dostępnych pojazdów określonej ładowności/pojemności.
2. Etap II: modelowanie matematyczne, w którym uwzględniono:
 - a. zbiory danych;
 - b. ograniczenia;
 - c. zmienne decyzyjne;
 - d. funkcje kryterium.
3. Etap III: Modelowanie symulacyjne, w którym zdefiniowano:
 - a. elementy etapu I-go metody;
 - b. modelowanie neuronowe;
 - i. wprowadzenie i podział na grupy danych wejściowych;
 - ii. proces uczenia sieci neuronowej;
 - iii. wybór najlepszej sieci neuronowej;
 - iv. prognoza popytu z wykorzystaniem najlepszej sieci;
 - c. odzwierciedlono model matematyczny doboru pojazdów do zadań transportowych stanowiący etap II-gi metody;
 - d. elementy wyjściowe metody:
 - i. dobór pojazdów do zadań;
 - ii. wyznaczenie tras jazdy pojazdów;
 - iii. wyznaczenie kolejności realizacji zleceń transportowych;
 - iv. wyznaczenie czasu jazdy poszczególnych pojazdów;
 - v. wyznaczenie zrealizowanego dystansu poszczególnych pojazdów;
 - vi. wyznaczenie liczby przewiezionego ładunku poszczególnych pojazdów;
 - vii. wyznaczenie współczynnika wykorzystania przestrzeni ładunkowej pojazdów.
4. Etap IV: Walidacja i weryfikacja metody, w której zdefiniowano:

- a. jakość otrzymanych wyników symulacyjnych;
- b. poddano analizie:
 - i. sumę czasu realizacji zadania transportowego przez wszystkie pojazdy;
 - ii. sumę zrealizowanego dystansu jazdy wszystkich pojazdów dla poszczególnych kryteriów realizacji zadania transportowego;
 - iii. współczynnik przestrzeni ładunkowej;
 - iv. liczbę załadunków poszczególnych pojazdów podczas realizacji zadania transportowego;
 - v. szacunkowy koszt realizacji zadania transportowego.

Etap I metody, to zbieranie danych wejściowych. Aby przeprowadzić dobór pojazdów do zadań niezbędne jest zdefiniowanie danych wejściowych, takich jak: lokalizacja punktów nadania i odbioru oraz połączeń między nimi (odległości między punktami wyrażono w kilometrach). Konieczne jest też zdefiniowanie kryterium i trybu realizacji zlecenia transportowego. Poprzez tryb rozumie się realizację zleceń pojedynczo lub razem, tzn. dopuszcza się łączenie zleceń celem wykorzystania przestrzeni ładunkowej. Poprzez kryterium realizacji zlecenia przyjęto, iż można je realizować w odpowiednio przyjęty sposób, tzn. w pierwszej kolejności zlecenia największe lub najmniejsze, najbardziej oddalone lub najbliższe położone względem punktu nadania. Następnym krokiem jest wprowadzenie danych szczegółowych zadania transportowego, dotyczących:

- prognozy liczby zleceń;
- prognozy wielkości zleceń;
- lokalizacji punktów nadania;
- lokalizacji punktów odbioru.

Kolejnym elementem etapu I jest wprowadzenie informacji dotyczących wielkości ładowności pojazdów, które mają zrealizować zadanie, a także liczby dostępnych pojazdów określonej ładowności.

Etap II metody to modelowanie matematyczne doboru pojazdów do zadań transportowych. Podzielono go na dwie fazy:

- fazę przygotowawczą, związaną z analizą danych wejściowych, zdefiniowaniem warunków początkowych i wejściowych oraz zakłóceń, a następnie weryfikacją zebranych danych, które są niezbędne do modelowania;

- fazę modelowania, w której zdefiniowano zmienne decyzyjne, kryteria i ograniczenia, a następnie przeprowadzono modelowanie matematyczne doboru pojazdów do zadań transportowych.

Etap III metody, to modelowanie symulacyjne, obejmujące modelowanie neuronowe. Jeżeli otrzymano poprawne wyniki, wszystkie założone parametry zostały przeanalizowane, uznaje się, że modelowanie zakończono sukcesem. Jeżeli w wyniku analizy otrzymanych wyników odnajduje się uchybienia lub braki, powraca się do modyfikacji i aktualizacji danych wejściowych lub parametrów algorytmu. Braki te mogą wynikać z: nieodpowiednio dobranych parametrów, braku wprowadzenia niezbędnych danych do symulacji, błędu decydenta, niemożności sprawdzenia zakładanego parametru, niepoprawnie sformułowanego parametru, itp.

Etap IV, to weryfikacja metody. Przeprowadza się tu ocenę opracowanej metody. Jeżeli wyniki metody są satysfakcjonujące, etap się kończy, jeżeli nie - to powraca się do etapu trzeciego, drugiego lub pierwszego, dokonując tym samym modyfikacji metody, poprzez wprowadzenie kolejnych parametrów i ulepszając dane wejściowe lub algorytm metody.

4.2. Modelowanie neuronowe prognozy popytu

Badania dotyczące możliwości i sposobu wykorzystania sieci neuronowych do prognozy popytu przeprowadzono na podstawie zebranych danych. W celu zastosowania sieci neuronowych do modelowania prognozy popytu określono zbiór sygnałów wejściowych – ilościowych.

Spośród wielu rodzajów sieci neuronowych oraz wielu algorytmów ich uczenia w dalszych badaniach wykorzystano perceptron wielowarstwowy (ang. *Multilayer Perceptron*) i algorytmy uczące: metoda gradientów sprzężonych; metoda najszybszego spadku, metodę BFGS (*Broyden – Fletcher – Goldfarb - Shanno*). Wykorzystana sieć neuronowa należy do grup:

- sieci jednokierunkowych, gdzie przepływ informacji odbywa się w jedną stronę (od wejścia do wyjścia sieci neuronowej);
- tzw. sieci nadzorowanych, gdzie proces uczenia odbywa się pod nadzorem nauczyciela (wśród sygnałów wychodzących jest sygnał wzorcowy);

Wraz ze wskazaniem danych wejściowych, zdefiniowano wielkości zbiorów. Określono, że:

- 80 % - danych stanowić będzie zbiór uczący wykorzystywany do modyfikacji wag;

- 10 % - zbiór testowy przeznaczony do bieżącego monitorowania procesu uczenia;
- 10 % - zbiór walidacyjny do oceny jakości sieci po zakończeniu procesu uczenia.

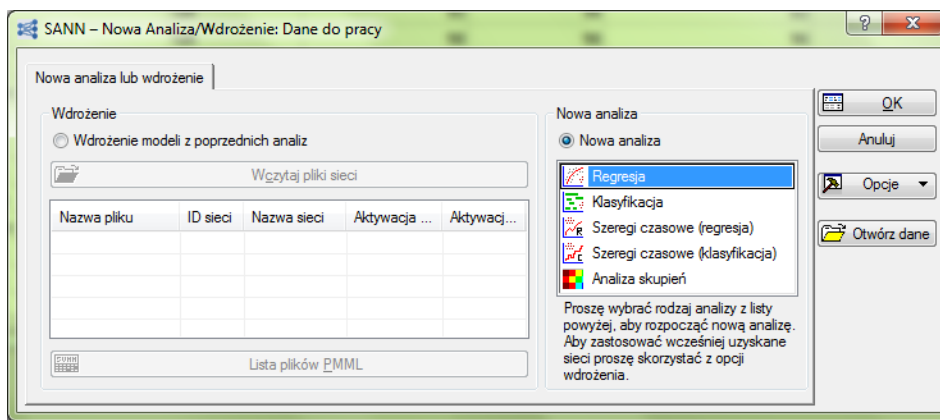
Następnie sprecyzowano podstawowe parametry sieci, tj.: typ sieci (*perceptron wielowarstwowy - MLP*), min. liczbę neuronów ukrytych, max. liczbę neuronów ukrytych, liczbę sieci uczących, liczbę sieci zachowanych, funkcję aktywacji neuronów ukrytych i neuronów wyjściowych, wartości redukcji wag dla warstwy ukrytej i warstwy wyjściowej. Tabela 3 przedstawia przykładowe dane wejściowe wykorzystane do modelowania neuronowego prognozy popytu w ujęciu tygodniowym w okresie 3 letnim tj. 2018-2020.

Tabela 3. Przykładowe dane wejściowe do modelowania neuronowego – dane historyczne wielkości popytu w ujęciu tygodniowym

Lp.	Data	Magazyn centralny	Punkt odbioru	Wielkość ładunku [t]
1	07.06.2019	Sochaczew	Płońsk	49
2	14.06.2019	Sochaczew	Płońsk	51
3	21.06.2019	Sochaczew	Płońsk	52
...				...
1	07.06.2019	Sochaczew	Przasnysz	73
2	14.06.2019	Sochaczew	Przasnysz	71
3	21.06.2019	Sochaczew	Przasnysz	71
...	...	...	...	...
1	07.06.2019	Sierpc	Ostrołęka	29
2	14.06.2019	Sierpc	Ostrołęka	28
3	21.06.2019	Sierpc	Ostrołęka	28
...	...		...	...
1	07.06.2019	Sierpc	Sokołów Podlaski	66
2	14.06.2019	Sierpc	Sokołów Podlaski	66
3	21.06.2019	Sierpc	Sokołów Podlaski	64
...				...
1	07.06.2019	Płock Północ	Siedlce	57
2	14.06.2019	Płock Północ	Siedlce	58
...				...
1	07.06.2019	Płock Północ	Warszawa Północ	72
2	14.06.2019	Płock Północ	Warszawa Północ	71
...				...
1	07.06.2019	Mława	Ciechanów	41
2	14.06.2019	Mława	Ciechanów	40
...				...
1	07.06.2019	Mława	Piaseczno	25
2	14.06.2019	Mława	Piaseczno	26
...				...

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z firmy transportowej.

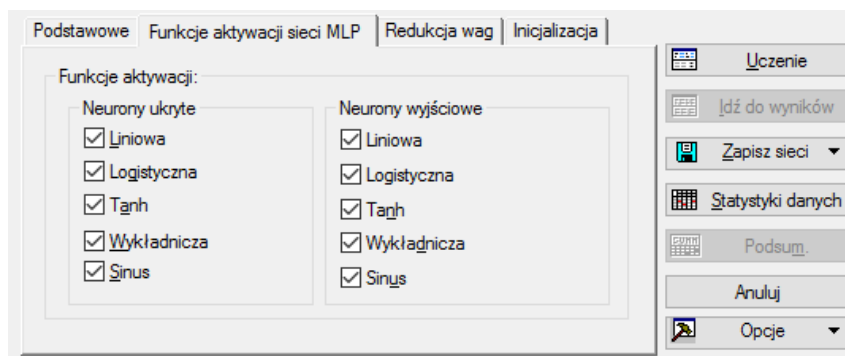
Dane przedstawione w tabeli, wykorzystano do zbudowania i nauczania sieci neuronowej. W pierwszej kolejności określono rodzaj analizy. W tym przypadku jest to sieć jednokierunkowa wielowarstwowa nazwana w programie „regresją” (rys. 15).



Rys. 15. Wybór rodzaju analizy do uczenia sieci neuronowej

Źródło: opracowanie własne.

W kolejnym kroku zdefiniowano podstawowe parametry sieci neuronowej. Przykładowe okno pracy z programu komputerowego Statistica przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16. Wybór parametrów sieci neuronowej

Źródło: opracowanie własne.

Następnie przeprowadzono proces uczenia sieci neuronowej wykorzystując zgromadzone dane. Tabela 4 przedstawia przykładowe wyniki procesu uczenia sieci neuronowej.

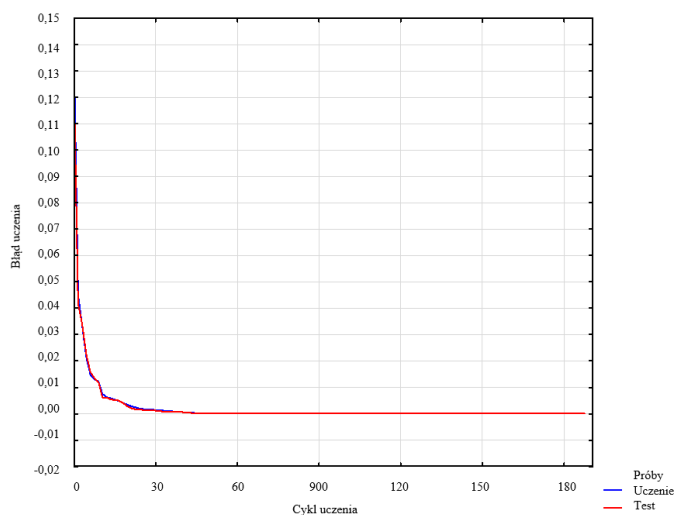
Tabela 4. Przykładowe wyniki procesu uczenia sieci neuronowej

ID	Nazwa sieci	Jakość uczenia	Jakość testowania	Jakość walidacji	Algorytm uczenia	Funkcja błędu	Aktywacja ukryta	Aktywacja wyjściowa
1	MLP 14-25-14	0,98478	0,99442	0,98872	BFGS 51	SOS	Wykładnicza	Logistyczna
2	MLP 14-13-14	0,98557	0,98285	0,94429	BFGS 95	SOS	Logistyczna	Wykładnicza
3	MLP 14-19-14	0,98626	0,99735	0,98563	BFGS 155	SOS	Logistyczna	Tanh
4	MLP 14-34-14	0,98714	0,98971	0,98154	BFGS 42	SOS	Liniowa	Tanh
5	MLP 14-27-14	0,98699	0,98354	0,98866	BFGS 56	SOS	Logistyczna	Tanh
6	MLP 14-33-14	0,98127	0,99669	0,98338	BFGS 17	SOS	Wykładnicza	Logistyczna
7	MLP 14-40-14	0,98562	0,98443	0,98427	BFGS 29	SOS	Logistyczna	Liniowa
8	MLP 14-1-14	0,98343	0,98541	0,98178	BFGS 28	SOS	Liniowa	Tanh
9	MLP 14-16-14	0,99463	0,98859	0,99286	BFGS 80	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
10	MLP 14-34-14	0,99880	0,99404	0,99647	BFGS 64	SOS	Wykładnicza	Wykładnicza
11	MLP 14-3-14	0,98796	0,98678	0,95712	BFGS 72	SOS	Tanh	Tanh
12	MLP 14-31-14	0,98964	0,98568	0,96551	BFGS 56	SOS	Wykładnicza	Logistyczna
13	MLP 14-10-14	0,98429	0,98962	0,98465	BFGS 29	SOS	Logistyczna	Wykładnicza
14	MLP 14-8-14	0,99198	0,98781	0,95855	BFGS 88	SOS	Logistyczna	Tanh
15	MLP 14-6-14	0,97084	0,98454	0,95465	BFGS 32	SOS	Liniowa	Tanh
16	MLP 14-26-14	0,98321	0,98395	0,95824	BFGS 153	SOS	Wykładnicza	Logistyczna
17	MLP 14-1-14	0,97939	0,98770	0,96854	BFGS 135	SOS	Logistyczna	Tanh
18	MLP 14-15-14	0,98749	0,99886	0,97638	BFGS 62	SOS	Wykładnicza	Logistyczna
19	MLP 14-21-14	0,94448	0,98956	0,97776	BFGS 96	SOS	Logistyczna	Liniowa
20	MLP 14-21-14	0,96241	0,98436	0,97732	BFGS 123	SOS	Tanh	Liniowa

Zródło: opracowanie własne.

Struktura najlepszej sieci przyjęła postać MLP 14-34-14, co oznacza 14 neuronów w warstwie wejściowej, 34 neuronów w warstwie ukrytej i 14 neuron w warstwie wyjściowej.

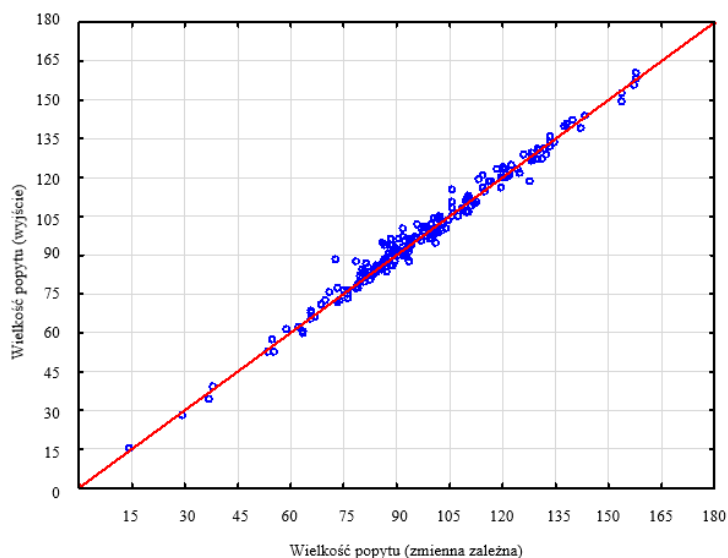
O pozytywnym wyniku uczenia sieci neuronowej świadczy m.in. wykres uczenia (rys. 17), z którego wynika, że najlepszą strukturę sieci odnaleziono w 64 epoce, w której błąd został oszacowany na poziomie 0,00012.



Rys. 17. Wykres uczenia się sieci neuronowej MLP 14-34-14

Źródło: opracowanie własne.

Również wykres rozrzutu zmiennej zależnej i jej predykcji świadczy o pozytywnym wyniku uczenia sieci (rys. 18).



Rys. 18. Wykres rozrzutu zmiennej zależnej sieci neuronowej MLP 14-34-14

Źródło: opracowanie własne.

Z wykresu można odczytać, na ile dokładnie sygnały wyjściowe sieci neuronowej odzwierciedlają rzeczywistą wartość zmiennej wyjściowej – wielkość popytu w danym punkcie odbioru.

Kolejnym krokiem było wykorzystanie projektu wybranej sieci do prognozy popytu. W tym celu wprowadzono do sieci zgromadzone dane historyczne i zaprognozowano 3 horyzonty czasowe do przodu.

Wynik uśredniono zgodnie z wzorem:

$$\bar{x} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3} \right\rfloor & \text{gdy } m\left(\frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}\right) \in \langle 0,5; 1 \rangle \\ \left\lceil \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3} \right\rceil & \text{gdy } m\left(\frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}\right) \in \langle 0; 0,5 \rangle \end{cases} \quad (90)$$

gdzie:

x – średnia arytmetyczna dla 3 horyzontów czasowych;

h – horyzont czasowy wybranej sieci neuronowej

$m\left(\frac{h_1+h_2+h_3}{3}\right)$ - część ułamkowa liczby $\frac{h_1+h_2+h_3}{3}$.

4.3. Opis programu FlexSim

Do implementacji i weryfikacji opracowanej metody doboru pojazdów do zadań transportowych zastosowano program, który pozwolił na odwzorowanie jak najlepszej wizualizacji założeń opracowanej metody. W tym celu w pracy wykorzystano program komputerowy FlexSim pracujący w środowisku Windows. Program ten przede wszystkim umożliwił odwzorowanie opracowanego modelu matematycznego doboru pojazdów do zadań uwzględniając wszystkie jego istotne elementy tj. ograniczenia, zmienne decyzyjne czy funkcje celu. Ponadto program wyposażony jest w bardzo rozbudowane środowisko symulacyjne, a także pozwala na tworzenie autorskich rozwiązań poprzez programowanie całych systemów i procesów transportowo-logistycznych. FlexSim oprócz rozbudowanego środowiska symulacyjnego pozwala na tworzenie własnych rozwiązań w oparciu o język programowania C++ (rys. 19).

```

1
2
3 /**Custom Code*/
4
5 treenode current = param(1);
6 treenode item = param(2);
7 treenode conveyor = param(3);
8
9 int OstatniWiersz=gettablerows("Rekordy");
10
11
12 settablestr("Rekordy",OstatniWiersz,1,getname(current));
13 settablenum("Rekordy",OstatniWiersz,2,getlabel(item,"Nazwa"));
14 settablenum("Rekordy",OstatniWiersz,3,time());
15 addtablerow("Rekordy");
16
17 double CurWe = time();
18 double OstWe = current.OstWe;
19 int OstPoj =getlabel(item,"Nazwa");
20 OstatniWiersz=gettablerows("Kolizje");

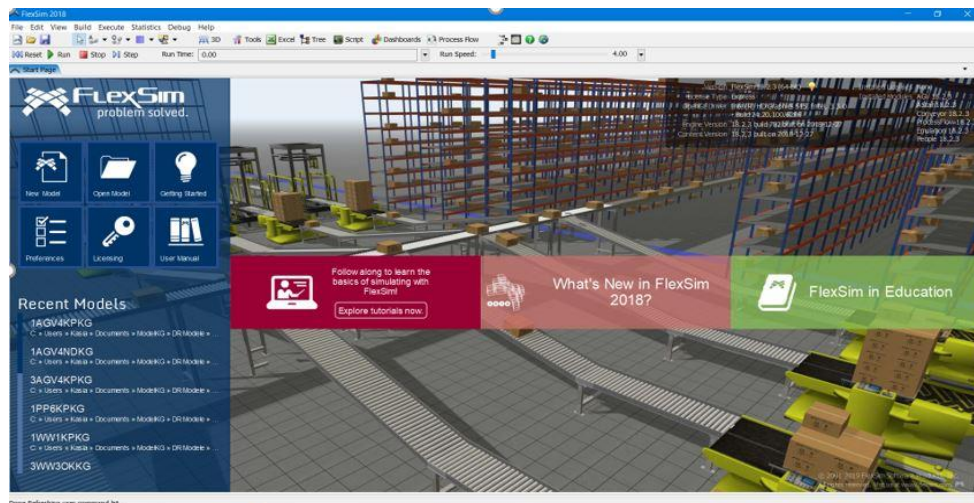
```

Rys. 19. Przykładowe zastosowanie języka C++ w programie FlexSim

Źródło: opracowanie własne.

Dodatkową zaletą programu jest możliwość importu danych z zewnętrznych źródeł. Możliwość ta znacznie ułatwia przeprowadzanie badań symulacyjnych. Program wykorzystuje międzynarodowe jednostki miary SI.

Po uruchomieniu programu pojawia się okno startowe (rys. 20). W oknie tym znajdują się wszelkie opcje programu pozwalające na opracowanie modelu symulacyjnego. Cechą programu jest to, że podczas korzystania z przestrzeni roboczej można obsługiwać tylko jeden model. Aby móc pracować z wieloma, należy otworzyć kolejne okno programu.



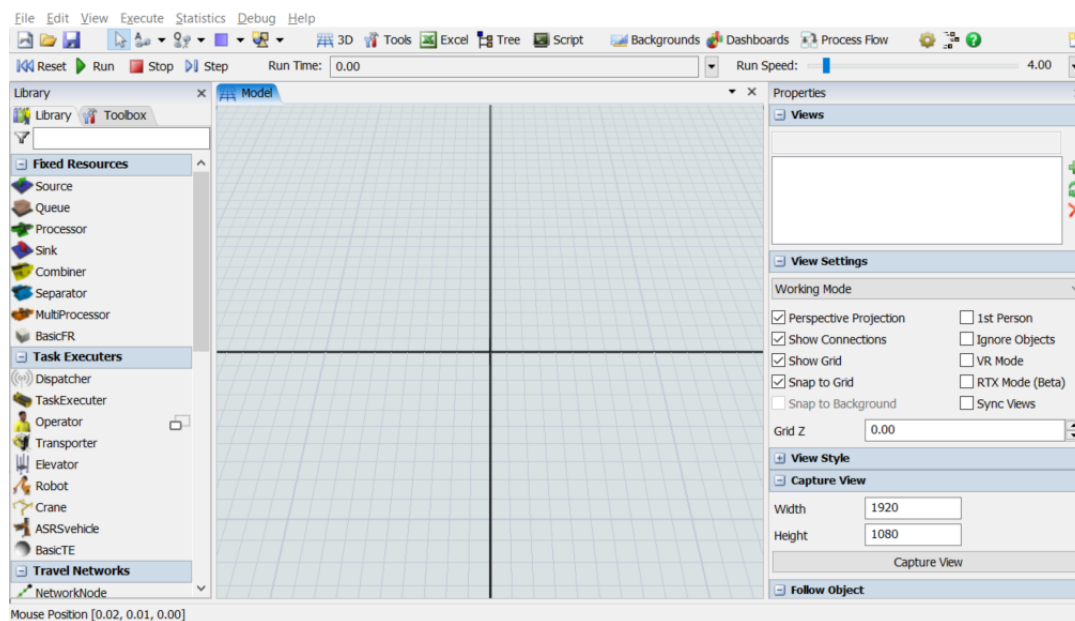
Rys. 20. Okno startowe programu FlexSim

Źródło: opracowanie własne.

Jedną z głównych zalet wybranego programu jest możliwość odzwierciedlania i kształtowania na potrzeby badań wybranych procesów transportowo-logistycznych w tym

dobór pojazdów do zadań transportowych, jak również wyznaczanie trasy jazdy pojazdów, poprzez projektowanie tych procesów od podstaw.

Przestrzeń roboczą programu FlexSim przedstawiono na rys. 21.



Rys. 21. Obszar roboczy programu FlexSim

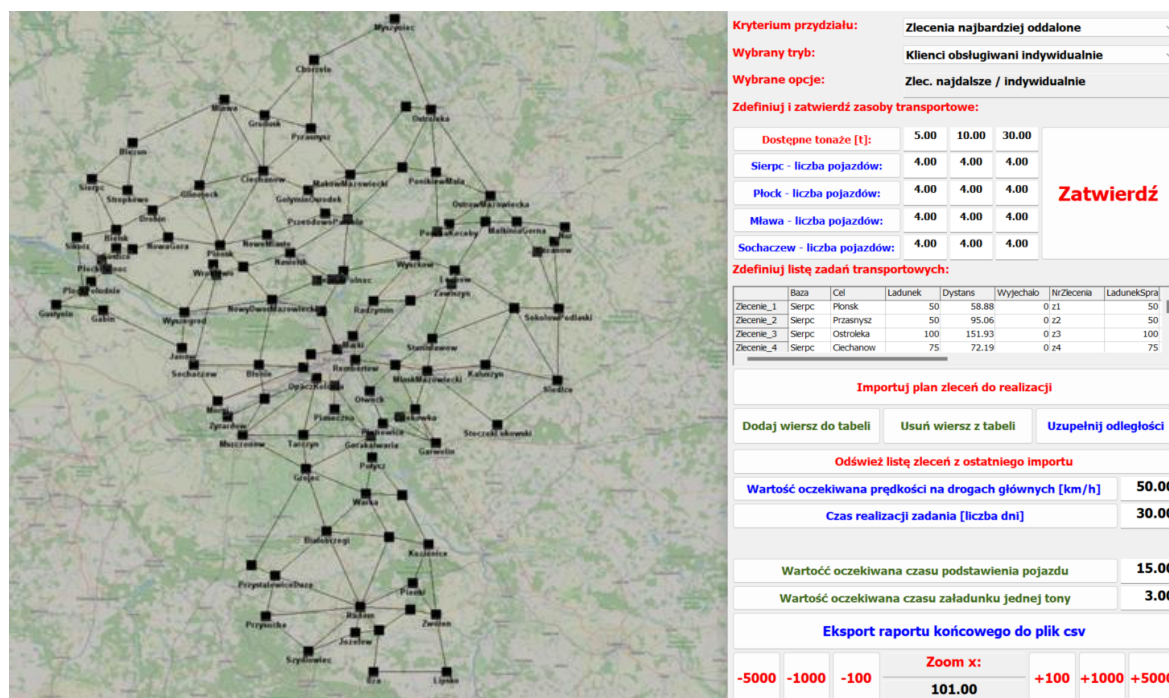
Źródło: opracowanie własne.

Program ma możliwość użycia wszystkich jednostek międzynarodowego układu miar SI. Na potrzeby opracowanej metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych zdefiniowano czas w sekundach i odległość w kilometrach.

4.4. Implementacja Metody Wspomagania Doboru Pojazdów do Zadań Transportowych (MWDPZT) w programie FlexSim

W celu uruchomienia symulacji niezbędne jest uzupełnienie danych zawartych w tabelach tj. punkty nadania, punkty odbioru, odległości między punktami, dane zadań transportowych – wielkość i liczba zleceń. W badanym przypadku zastosowano własne odwołania do tabel tzn. wcześniej przygotowane tabele zaimportowano do programu FlexSim, z których odczytano potrzebne parametry umożliwiające uruchomienie symulacji. Tabele z danymi posłużyły do zapisu niezbędnych parametrów oraz do późniejszej analizy. Pomyślna ocena narzędzi komputerowych powinna być przeprowadzona w oparciu o sformalizowaną procedurę [160]. Dlatego w celu odzwierciedlenia i wizualizacji wszystkich założeń opracowanej metody niezbędne było opracowanie w programie FlexSim interfejsu w postaci Panelu Konfiguracyjnego wyposażonego w moduły wczytywania/wprowadzania danych.

Widok mapy i panelu konfiguracyjnego metody doboru pojazdów do zadań transportowych przedstawiono na rys. 22.



Rys. 22. Widok mapy i panelu konfiguracyjnego metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych

Źródło: opracowanie własne.

W pierwszej kolejności opracowano mapę punktów nadań i odbiorów, następnie określono odległości między wszystkimi lokalizacjami. Dzięki temu opracowano sieć połączeń między punktami. Tabela 5 przedstawia odległości między punktami sieci połączeń.

Tabela 5. Odległości między punktami sieci połączeń [km]

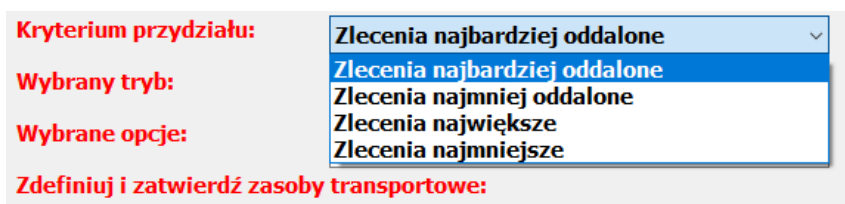
Model	Samochody	Miasta_i_odleglosci											
	Sierpc	Biezun	Mława	Stropkowo	PlockPolnoc	Sikorz	NowaGora	Płonsk	Drobin	Bielsk	Goslice		
Sierpc	0	20.96	59.91	14.42	35.72	36.86	38.66	58.88	26.59	21.57	28.57		
Biezun	20.96	0	38.96	18.41	56.68	57.81	42.65	62.87	30.57	42.52	49.52		
Mława	59.91	38.96	0	57.36	84.79	85.93	66.83	58.75	54.76	70.63	77.63		
Stropkowo	14.42	18.41	57.36	0	42.20	43.34	24.25	44.47	12.17	28.05	35.05		
PlockPolnoc	35.72	56.68	84.79	42.20	0	12.97	26.85	47.08	30.04	14.17	7.17		
Sikorz	36.86	57.81	85.93	43.34	12.97	0	39.82	60.04	31.18	15.30	20.13		
NowaGora	38.66	42.65	66.83	24.25	26.85	39.82	0	20.23	12.08	27.77	20.77		
Płonsk	58.88	62.87	58.75	44.47	47.08	60.04	20.23	0	32.31	47.99	40.99		
Drobin	26.59	30.57	54.76	12.17	30.04	31.18	12.08	32.31	0	15.88	22.88		
Bielsk	21.57	42.52	70.63	28.05	14.17	15.30	27.77	47.99	15.88	0	7.01		
Goslice	28.57	49.52	77.63	35.05	7.17	20.13	20.77	40.99	22.88	7.01	0		
Ciolkowo	34.87	55.82	81.29	38.71	12.39	25.36	14.47	34.69	26.54	13.31	6.31		
Gliniec	46.95	50.94	34.39	32.54	50.40	51.54	32.44	24.36	20.37	36.24	43.24		
PlockPoludnie	44.98	65.93	94.04	51.46	9.26	22.23	36.11	56.33	39.29	23.42	16.42		
Lack	49.55	70.50	98.61	56.03	13.83	20.67	40.68	60.90	43.86	27.99	20.99		
Gostynin	61.46	82.41	110.52	67.94	25.74	32.58	52.59	72.81	55.77	39.90	32.90		
Gabin	60.11	81.06	109.17	66.58	24.39	31.23	51.23	71.46	54.42	38.55	31.55		
Janów	87.54	105.86	101.74	87.46	51.82	64.79	63.22	43.00	75.30	65.98	58.98		
Sochaczew	95.58	110.49	106.36	92.09	59.86	72.83	67.85	47.62	79.92	74.02	67.02		
Wyszogrod	73.83	92.16	88.03	73.76	38.12	51.08	49.52	29.30	61.59	52.28	45.28		
Wroblewo	66.63	70.61	66.49	52.21	54.82	67.79	27.97	7.75	40.05	55.74	48.73		
PlockWschod	39.73	60.68	88.80	46.21	4.02	16.98	30.86	51.09	34.05	18.17	11.17		

Źródło: opracowanie własne.

W pierwszej części panelu konfiguracyjnego zdefiniowano kryteria pierwszeństwa realizacji zleceń transportowych. Założono 4 opcje do wyboru: zlecenia największe, zlecenia najmniejsze, zlecenia najdalsze i zlecenia najbliższe względem punktu nadania.

Kryterium tzw. „zlecenie największe” oznacza, iż w pierwszej kolejności będą realizowane zlecenia, która są największe (jednostka miary zlecenia wyrażona w tonach), a zlecenia najmniejsze będą realizowane jako ostatnie. Kryterium „zlecenie najmniejsze” oznacza, iż w pierwszej kolejności realizowane będą zlecenia najmniejsze, a na końcu zlecenia największe. Kryterium „zlecenia najdalsze” oznacza, iż w pierwszej kolejności będą realizowane zlecenia najbardziej oddalone od punktu nadania, a na końcu zlecenia zlokalizowane najbliżej punktu nadania. Kryterium „zlecenia najbliższe” oznacza, iż w pierwszej kolejności realizowane będą zlecenia najbliżej położone względem punktu nadania, a na końcu zlecenia najbardziej oddalone od punktu nadania.

Wycinek panelu konfiguracyjnego z wyborem kryteriów pierwszeństwa realizacji zleceń transportowych przedstawiono na rys. 23.



Rys. 23. Wycinek panelu konfiguracyjnego z wyborem kryteriów pierwszeństwa realizacji zleceń transportowych

Źródło: opracowanie własne.

Następnie wyróżniono 2 tryby realizacji zleceń transportowych:

- pojedynczo – ładunki nie są ze sobą łączone z różnych zleceń transportowych;
- zbiorczo – ładunki są ze sobą łączone z różnych zleceń transportowych.

Wycinek panelu konfiguracyjnego z wyborem rodzaju trybu realizacji zleceń transportowych przedstawiono na rys. 24.

The screenshot shows a configuration panel with the following elements:

- Wybrany tryb:** Klienci obsługiwani indywidualnie (selected)
- Wybrane opcje:** Klienci obsługiwani indywidualnie, Łączenie ładunków
- Zdefiniuj i zatwierdź zasoby transportowe:**

Rys. 24. Wycinek panelu konfiguracyjnego z wyborem rodzaju trybu realizacji zleceń transportowych

Źródło: opracowanie własne.

Uwzględniając 4 kryteria pierwszeństwa realizacji zadań transportowych i 2 tryby przeprowadzono symulację doboru pojazdów do zadań na 8 różnych sposobów. Sposoby realizacji zadań transportowych z uwzględnieniem ww. kryteriów i trybów przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Sposoby realizacji zadań transportowych

Sposób realizacji zleceń	Numer	Kryterium przydziału
Pojedynczo	1	Najdalsze
	2	Najbliższe
	3	Największe
	4	Najmniejsze
Zbiorczo	5	Najdalsze
	6	Najbliższe
	7	Największe
	8	Najmniejsze

Źródło: opracowanie własne.

W kolejnym kroku panelu konfiguracyjnego definiowano zasoby transportowe polegające na wpisaniu dostępnych ładowności pojazdów wyrażonych w tonach. Określono 4 przykładowe miejsca nadania ładunków. Dla każdego dostępnego tonażu i każdego miejsca nadania jest możliwość wprowadzenia liczby dostępnych pojazdów. Wycinek panelu konfiguracyjnego z możliwością zdefiniowania zasobów transportowych przedstawiono na rys. 25.

Zdefiniuj i zatwierdź zasoby transportowe:

Dostępne tonaże [t]:	3.00	8.00	20.00
Sierpc - liczba pojazdów:	10.00	10.00	10.00
Płock - liczba pojazdów:	10.00	10.00	10.00
Mława - liczba pojazdów:	10.00	10.00	10.00
Sochaczew - liczba pojazdów:	10.00	10.00	10.00

Zatwierdź

Rys. 25. Wycinek panelu konfiguracyjnego z możliwością zdefiniowania zasobów transportowych

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 7 przedstawia zestawienie przykładowej liczby i typów pojazdów wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji.

Tabela 7. Zestawienie przykładowej liczby i typów pojazdów wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji

	NrRejestracyjny	Pojemnosc	Baza	Dostepny	Czas	Dystans	Ladunek	Podstawiany	Wypelnienie	Wykorzystany
Pojazd_1	Sie_5_1	5	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_2	Sie_5_2	5	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_3	Sie_5_3	5	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_4	Sie_5_4	5	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_5	Sie_10_1	10	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_6	Sie_10_2	10	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_7	Sie_10_3	10	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_8	Sie_10_4	10	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_9	Sie_30_1	30	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_10	Sie_30_2	30	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_11	Sie_30_3	30	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_12	Sie_30_4	30	Sierpc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_13	Plo_5_1	5	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_14	Plo_5_2	5	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_15	Plo_5_3	5	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_16	Plo_5_4	5	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_17	Plo_10_1	10	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_18	Plo_10_2	10	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_19	Plo_10_3	10	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_20	Plo_10_4	10	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_21	Plo_30_1	30	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_22	Plo_30_2	30	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_23	Plo_30_3	30	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_24	Plo_30_4	30	PlockPolnoc	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_25	Mla_5_1	5	Mława	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_26	Mla_5_2	5	Mława	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_27	Mla_5_3	5	Mława	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_28	Mla_5_4	5	Mława	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_29	Mla_10_1	10	Mława	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_30	Mla_10_2	10	Mława	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_31	Mla_10_3	10	Mława	1	0	0	0	0	0	0
Pojazd_32	Mla_10_4	10	Mława	1	0	0	0	0	0	0

Źródło: opracowanie własne.

Następna część panelu konfiguracyjnego dotyczy wprowadzania informacji dotyczących zleceń transportowych. W tym celu opracowano interfejs do importowania danych z plików zewnętrznych. Poprzez import pliku wprowadza się następujące informacje: liczbę zleceń, miejsce nadania „Baza”, miejsce odbioru „Cel”, wielkość ładunku w tonach, dystans między punktami nadania i odbioru. Wycinek panelu konfiguracyjnego z szczegółami dotyczącymi zleceń transportowych przedstawiono na rys. 26.

Zdefiniuj listę zadań transportowych:

	Baza	Cel	Ladunek	Dystans	Wyjechało	NrZlecenia	LadunekSpra
Zlecenie_1	Sochaczew	Płońsk	49	0	0	z1	
Zlecenie_2	Sochaczew	Przasnysz	67	0	0	z2	
Zlecenie_3	Sochaczew	Ostrołęka	27	0	0	z3	
Zlecenie_4	Sochaczew	Ciechanów	40	0	0	z4	
Zlecenie_5	Sochaczew	Ostrów Mazo	105	0	0	z5	

Importuj plan zleceń do realizacji

[Dodaj wiersz do tabeli](#)
[Usuń wiersz z tabeli](#)
[Uzupełnij odległości](#)

Rys. 26. Wycinek panelu konfiguracyjnego ze szczegółami dotyczącymi zleceń transportowych

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8 przedstawiona przykładowe zestawienie zleceń transportowych otrzymanych z sieci neuronowej i wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji.

Tabela 8. Przykładowe zestawienie zleceń transportowych wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji

	Baza	Cel	Ladunek	Dystans	Wyjechało	NrZlecenia	L
Zlecenie_1	Sochaczew	Płońsk	49	0	0	z1	
Zlecenie_2	Sochaczew	Przasnysz	67	0	0	z2	
Zlecenie_3	Sochaczew	Ostrołęka	27	0	0	z3	
Zlecenie_4	Sochaczew	Ciechanów	40	0	0	z4	
Zlecenie_5	Sochaczew	Ostrów Mazowiecka	105	0	0	z5	
Zlecenie_6	Sochaczew	Wyszaków	43	0	0	z6	
Zlecenie_7	Sochaczew	Sokołów Podlaski	43	0	0	z7	
Zlecenie_8	Sochaczew	Siedlce	69	0	0	z8	
Zlecenie_9	Sochaczew	Mińsk Mazowiecki	143	0	0	z9	
Zlecenie_10	Sochaczew	Radom	51	0	0	z10	
Zlecenie_11	Sochaczew	Kozienice	52	0	0	z11	
Zlecenie_12	Sochaczew	Nowy Dwór Mazowiecki	28	0	0	z12	
Zlecenie_13	Sochaczew	Piaseczno	30	0	0	z13	
Zlecenie_14	Sochaczew	Warszawa Północ	30	0	0	z14	
Zlecenie_15	Sierpc	Płońsk	58	0	0	z15	
Zlecenie_16	Sierpc	Przasnysz	97	0	0	z16	
Zlecenie_17	Sierpc	Ostrołęka	75	0	0	z17	
Zlecenie_18	Sierpc	Ciechanów	76	0	0	z18	
Zlecenie_19	Sierpc	Ostrów Mazowiecka	92	0	0	z19	
Zlecenie_20	Sierpc	Wyszaków	91	0	0	z20	
Zlecenie_21	Sierpc	Sokołów Podlaski	65	0	0	z21	
Zlecenie_22	Sierpc	Siedlce	55	0	0	z22	
Zlecenie_23	Sierpc	Mińsk Mazowiecki	106	0	0	z23	
Zlecenie_24	Sierpc	Radom	125	0	0	z24	
Zlecenie_25	Sierpc	Kozienice	97	0	0	z25	
Zlecenie_26	Sierpc	Nowy Dwór Mazowiecki	95	0	0	z26	
Zlecenie_27	Sierpc	Piaseczno	136	0	0	z27	
Zlecenie_28	Sierpc	Warszawa Północ	174	0	0	z28	

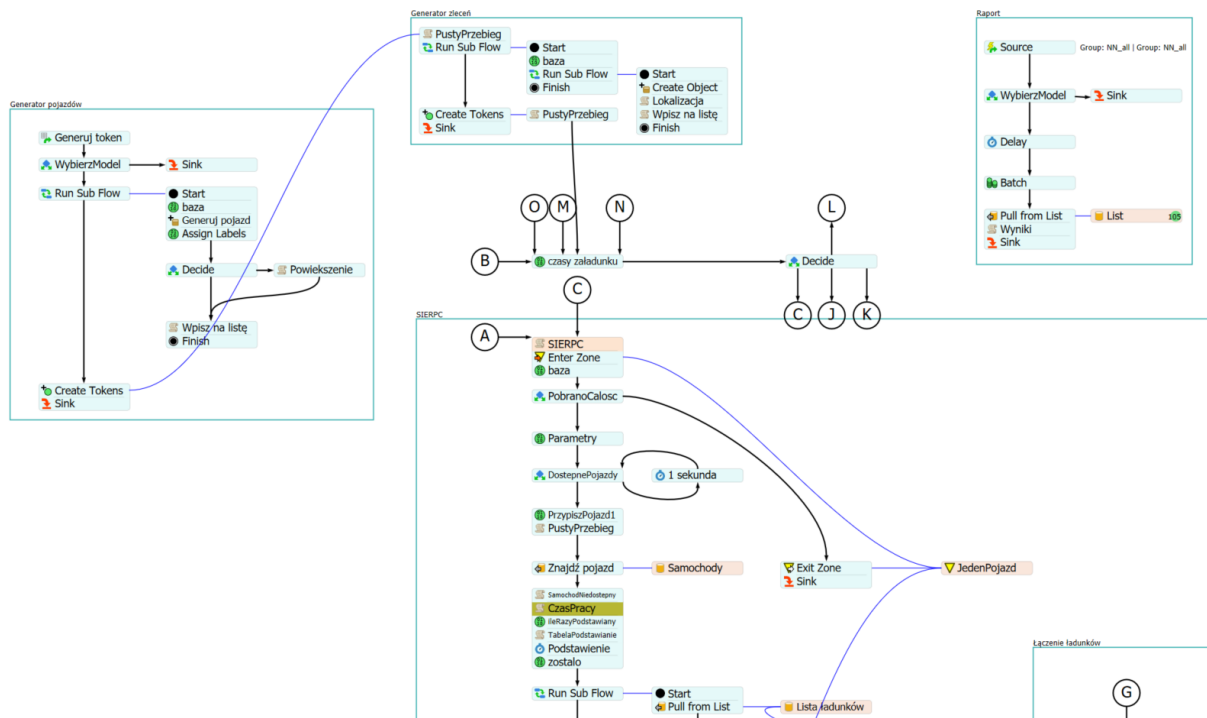
Źródło: opracowanie własne.

Ostatnia część panelu konfiguracyjnego dotyczy ogólnych informacji potrzebnych do przeprowadzenia symulacji, aby ta była jak najbardziej zbliżona do rzeczywistych warunków realizacji zadań transportowych. W tym celu zdefiniowano:

- rozkład prędkości na drogach głównych [km/h];
- rozkład czasu podstawienia pojazdu do załadunku [s];
- rozkład czasu załadunku jednej tony [s].

Dla tych trzech parametrów zastosowano zmienne losowe, dla których przyjęto, na podstawie danych z badanego przedsiębiorstwa transportowego, wartość średnią w oparciu o rozkład normalny.

Pod postacią panelu konfiguracyjnego kryje się tzw. „proces flow”. Jest to algorytm przebiegu procesu obliczeniowego w programie FlexSim. Przykładowy wycinek „procesu flow” dla opracowanej metody przedstawiono na rys. 27.



Rys. 27. Wycinek „procesu flow” dla opracowanej metody

Źródło: opracowanie własne.

Przedstawiony proces obrazuje, jak opracowaną metodę zaimplementowano do programu FlexSim. W pierwszej kolejności opracowano „Generator pojazdów” tj. liczbę, typ i miejsce stacjonowania. Następnym etapem było zdefiniowanie „Generatora zleceń” tj. miejsce załadunku, miejsce wyładunku, liczna i wielkość zleceń. Kolejnym krokiem było połączenie „Generatora pojazdów” i „Generatora zleceń” pod warunkami określonymi w metodzie m.in. kryteria realizacji zleceń, czas załadunku i czas podstawienia pojazdów. Oddzielnym

elementem było opracowanie raportu, który umożliwił pozyskanie danych potrzebnych do analizy i weryfikacji przeprowadzonych symulacji.

Panel konfiguracyjny kończy się na możliwości wyeksportowania wyników – raportu - do pliku zewnętrznego. Plik ten zawiera następujące informacje:

- nr identyfikacyjny pojazdu;
- czas jazdy poszczególnego pojazdu od punktu do punktu (w założeniach modelu od miasta do miasta);
- ładunek na pojeździe w [t] poszczególnego pojazdu od punktu do punktów w czasie jazdy;
- numer realizowanego zlecenia przez poszczególne pojazdy;
- długość zrealizowanej trasy w [km] każdego pojazdu od punktu do punktu;
- liczba załadunków każdego pojazdu;
- wypełnienie przestrzeni ładunkowej każdego pojazdu;
- skumulowany czas jazdy każdego pojazdu;
- skumulowany dystans każdego pojazdu;
- skumulowany współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej każdego pojazdu;
- czas rozpoczęcia, czas trwania jazdy i czas zakończenia jazdy każdego pojazdu;
- wybór najlepszego rozwiązania z punktu widzenia wybranych kryteriów.

Przykładowy raport wyjściowy z opracowanego modelu symulacyjnego przedstawiono na rys. 28.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	NrRejestr	Czas	Lokalizacja	Ładunek	N Ładownos	ListPrzewi	DystansPc	DystansSkumulowar	NrRejestr	Pojemnos	Baza	Czas	Dystans	Ładunek	Podstawi	Wypelnie	Wykorzystanie		
2	Mla_10_1	45,35	Mława	10	10	z38	0	0	Sie_5_1	5	Sierpc	57687,6	598,87	10	2	0,48	1		
3	Mla_10_1	2521,2	Głinojeck	10	10	z38	34,39	34,39	Sie_5_2	5	Sierpc	65052,96	644,41	15	3	0,53	1		
4	Mla_10_1	4274,52	Plonsk	10	10	z38	24,36	58,75	Sie_5_3	5	Sierpc	60272,42	763,11	15	3	0,5	1		
5	Mla_10_1	4831,98	Wroblew	10	10	z38	7,75	66,5	Sie_5_4	5	Sierpc	60704,72	763,12	15	3	0,49	1		
6	Mla_10_1	5324,75	Naruszew	10	10	z38	4,11	70,62	Sie_5_5	5	Sierpc	60848,72	763,12	15	3	0,5	1		
7	Mla_10_1	9616,75	Sochaczew	10	10	z38	35,77	106,39	Sie_5_6	5	Sierpc	65197,95	728,86	15	3	0,54	1		
8	Mla_10_1	10815,07	Morgi	10	10	z38	16,65	123,04	Sie_5_7	5	Sierpc	56883,63	611,05	10	2	0,54	1		
9	Mla_10_1	11334,27	Zyrardow	10	10	z38	7,22	130,26	Sie_5_8	5	Sierpc	57092,79	611,05	10	2	0,55	1		
10	Mla_10_1	11978,25	Mszczono	10	10	z38	8,95	139,21	Sie_5_9	5	Sierpc	57301,95	611,05	10	2	0,55	1		
11	Mla_10_1	13970,9	Grojec	10	10	z38	27,68	166,89	Sie_5_10	5	Sierpc	55347,79	611,05	10	2	0,54	1		
12	Mla_10_1	15792,37	Bialobrzeg	10	10	z38	25,31	192,2	Sie_5_11	5	Sierpc	57685	586,48	10	2	0,54	1		
13	Mla_10_1	18080,56	Radom	10	10	z38	31,79	223,99	Sie_5_12	5	Sierpc	59268,29	671,59	15	3	0,54	1		
14	Mla_10_1	18110,6	Radom	0	10		0	223,99	Sie_5_13	5	Sierpc	56517,23	583,36	10	2	0,52	1		
15	Mla_10_1	20398,79	Bialobrzeg	0	10		31,79	255,77	Sie_5_14	5	Sierpc	56724,35	583,36	10	2	0,52	1		
16	Mla_10_1	22220,26	Grojec	0	10		25,31	281,08	Sie_5_15	5	Sierpc	59436,83	695,08	15	3	0,52	1		
17	Mla_10_1	24212,9	Mszczono	0	10		27,68	308,76	Sie_5_16	5	Sierpc	59965,16	695,08	15	3	0,51	1		
18	Mla_10_1	24856,89	Zyrardow	0	10		8,95	317,71	Sie_5_17	5	Sierpc	62646,92	668,47	15	3	0,55	1		
19	Mla_10_1	25376,09	Morgi	0	10		7,22	324,93	Sie_5_18	5	Sierpc	63480,5	668,47	15	3	0,55	1		
20	Mla_10_1	26574,41	Sochaczew	0	10		16,65	341,58	Sie_5_19	5	Sierpc	64960,95	611,93	15	3	0,54	1		
21	Mla_10_1	30866,41	Naruszew	0	10		35,77	377,35	Sie_5_20	5	Sierpc	56645,86	494,12	10	2	0,55	1		
22	Mla_10_1	31359,18	Wroblew	0	10		4,11	381,47	Sie_10_1	10	Sierpc	62308,92	606,88	20	2	0,44	1		
23	Mla_10_1	31916,64	Plonsk	0	10		7,75	389,22	Sie_10_2	10	Sierpc	61328,76	592,46	20	2	0,44	1		
24	Mla_10_1	33669,96	Głinojeck	0	10		24,36	413,58	Sie_10_3	10	Sierpc	61424,66	592,46	20	2	0,44	1		
25	Mla_10_1	36145,81	Mława	0	10		34,39	447,97	Sie_10_4	10	Sierpc	62558,23	606,88	20	2	0,45	1		

Rys. 28. Przykładowy raport wyjściowy z opracowanego modelu symulacyjnego

Źródło: opracowanie własne.

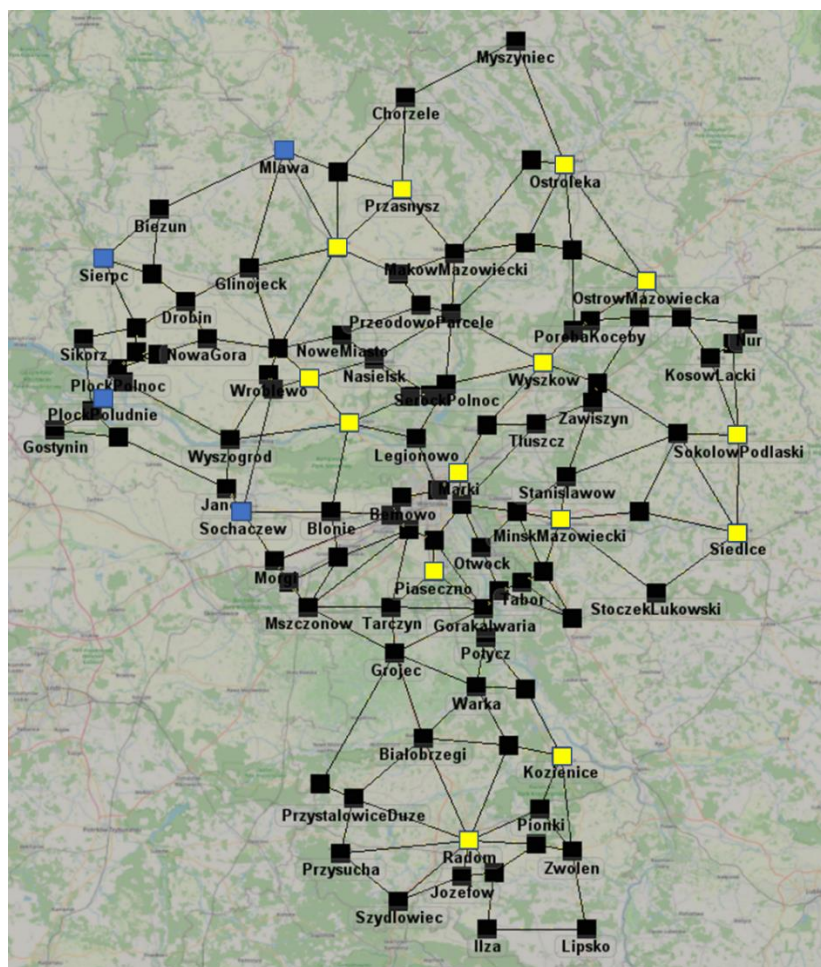
To tylko część całości raportu, który średnio zawiera od kilkuset do kilku tysięcy wierszy z danymi pochodzącymi z przeprowadzenia symulacji.

5. WERYFIKACJA METODY DOBORU POJAZDÓW DO ZADAŃ TRANSPORTOWYCH NA DANYCH RZECZYWISTYCH

5.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa

W celu weryfikacji zaproponowanej metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych wykorzystano dane rzeczywiste przedsiębiorstwa logistycznego funkcjonującego na terenie województwa mazowieckiego specjalizującego się w magazynowaniu jednostek paletowych, na których składowane są meble pakowane w kartonach. Warunkiem koniecznym jest takie ułożenie paczek, aby mieściły się w obrysie palety. Operator logistyczny dysponuje 4 centralnymi magazynami zlokalizowanymi głównie w północno-zachodniej części województwa, tj. w Sierpcu, Płocku, Mławie oraz Sochaczewie. Dysponuje też 14 stałymi punktami odbioru w miejscowościach: Płońsk, Przasnysz, Ostrołęka, Ciechanów, Ostrów Mazowiecka, Wyszaków, Sokołów Podlaski, Siedlce Mińsk Mazowiecki, Radom, Kozienice, Nowy Dwór Mazowiecki, Piaseczno i Warszawa Północ. Towar odbierany jest z magazynów centralnych i przewożony do punktów odbiorów. W zależności od wielkości zadań transportowych, ich realizacja trwa do kilku dni, również w zależności od dostępności liczby i typu pojazdów. Największym problemem w analizowanej firmie jest planowanie i koordynacja wykorzystania dostępnych środków transportowych co przekłada się na niski współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej. Skutkuje to wydłużonym czasem rozwózki towarów, a w konsekwencji wyższymi kosztami. Warto zaznaczyć, iż planowanie odbywa się bez wspomagania systemu informatycznego, bazując w głównej mierze na doświadczeniu pracowników. Planowanie 1 zadania transportowego z użyciem do 5 pojazdów zajmuje średnio do 15 minut pracy. Problem powstaje w momencie, gdy zadanie transportowego wymaga zaplanowania 10 lub więcej pojazdów – przy tej liczbie pojazdów oraz wielu punktów odbiorów – planowanie wydłuża się do co najmniej 30 minut i więcej, które często korygowane jest w trakcie realizacji.

Lokalizację magazynów centralnych i punktów odbioru przedstawiono na rys. 29.



Rys. 29. Lokalizacja magazynów centralnych i punktów odbioru badanego przedsiębiorstwa logistycznego

Źródło: opracowanie własne.

5.2. Dobór pojazdów do zadań transportowych z wykorzystaniem autorskiej metody – weryfikacja na danych rzeczywistych

W celu przeprowadzenia weryfikacji opracowanej metody rozwiązano różne przykładowe zadania transportowe. Ich szczegółowy zakres przedstawiono w dalszej części pracy. W zadaniach stosowano następujące kryteria:

- współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej pojazdów;
- czas trwania realizacji zadania transportowego;
- dystans zrealizowany przez poszczególne pojazdy;
- szacunkowy koszt realizacji zadania transportowego.

Analizowane zadania różniły się:

- liczbą i wielkością ładunku;
- liczbą i lokalizacją magazynów (punktów nadania);

- liczbą i lokalizacją punktów odbioru;
- liczbą dostępnych pojazdów do realizacji zadania;
- typem dostępnych pojazdów do realizacji zadania.

W pracy zaprezentowano 2 przykładowe zadania. Zadanie transportowe nr 1 polegało na rozwiązaniu 800 t ładunku według otrzymanej prognozy popytu wykorzystując sieć neuronową MLP 14-34-14 z jednego magazynu centralnego zlokalizowanego w Sochaczewie do 14 punktów odbioru w województwie mazowieckim. Wykaz punktów odbioru i wielkość ładunków w zadaniu transportowym nr 1 przedstawia tabela 9.

Tabela 9. Wykaz punktów odbioru i wielkość ładunków w zadaniu transportowym nr 1 [t]

Lp.	Lokalizacja magazynu	Punkt odbioru	Horyzont I - h_1	Horyzont II - h_2	Horyzont III - h_3	Średnia $\bar{x}$
1	Sochaczew	Płońsk	52	52	51	52
2	Sochaczew	Przasnysz	70	70	72	71
3	Sochaczew	Ostrołęka	28	27	31	29
4	Sochaczew	Ciechanów	42	42	40	41
5	Sochaczew	Ostrów Mazowiecka	115	110	106	110
6	Sochaczew	Wyszków	44	45	45	45
7	Sochaczew	Sokołów Podlaski	44	42	41	42
8	Sochaczew	Siedlce	73	72	73	73
9	Sochaczew	Mińsk Mazowiecki	135	145	154	145
10	Sochaczew	Radom	53	52	51	52
11	Sochaczew	Kozienice	51	53	55	53
12	Sochaczew	Nowy Dwór Mazowiecki	32	32	27	30
13	Sochaczew	Piaseczno	28	28	28	28
14	Sochaczew	Warszawa Północ	29	30	30	30
SUMA			796	800	804	800

Źródło: opracowanie własne.

Parametry zadania transportowego nr 1 przyjęły wartości:

- $nl = 1$;
- $s = 1$
- $m = 1$;
- $z = 14$;
- $ol = 14$.

Zadanie transportowe nr 2 polegało na rozwiązaniu 3 999 t ładunku według otrzymanej prognozy popytu wykorzystując sieć neuronową MLP 14-34-14 z czterech magazynów centralnych zlokalizowanych odpowiednio w: Sierpcu, Płocku, Mławie i Sochaczewie. Wykaz punktów odbioru i wielkość ładunków w zadaniu transportowym nr 2 przedstawia tabela 10.

Tabela 10. Wykaz punktów odbioru i wielkość ładunków w zadaniu transportowym nr 2 [t]

Lp.	Lokalizacja magazynu	Punkt odbioru	Horyzont I - h_1	Horyzont II - h_2	Horyzont III - h_3	Średnia $\bar{x}$
1	Sochaczew	Płońsk	48	48	50	49
2	Sochaczew	Przasnysz	67	68	67	67
3	Sochaczew	Ostrołęka	26	27	27	27
4	Sochaczew	Ciechanów	41	40	39	40
5	Sochaczew	Ostrów Mazowiecka	107	105	104	105
6	Sochaczew	Wyszaków	45	43	42	43
7	Sochaczew	Sokołów Podlaski	43	43	43	43
8	Sochaczew	Siedlce	68	69	69	69
9	Sochaczew	Mińsk Mazowiecki	141	143	145	143
10	Sochaczew	Radom	51	52	51	51
11	Sochaczew	Kozienice	52	51	53	52
12	Sochaczew	Nowy Dwór Mazowiecki	28	29	27	28
13	Sochaczew	Piaseczno	31	30	30	30
14	Sochaczew	Warszawa Północ	30	31	30	30
15	Sierpc	Płońsk	60	57	58	58
16	Sierpc	Przasnysz	97	98	97	97
17	Sierpc	Ostrołęka	74	74	76	75
18	Sierpc	Ciechanów	76	76	76	76
19	Sierpc	Ostrów Mazowiecka	91	92	92	92
20	Sierpc	Wyszaków	89	92	93	91
21	Sierpc	Sokołów Podlaski	65	64	65	65
22	Sierpc	Siedlce	55	56	55	55
23	Sierpc	Mińsk Mazowiecki	108	106	105	106
24	Sierpc	Radom	123	125	127	125
25	Sierpc	Kozienice	96	97	97	97
26	Sierpc	Nowy Dwór Mazowiecki	95	94	95	95
27	Sierpc	Piaseczno	136	135	137	136
28	Sierpc	Warszawa Północ	172	174	175	174
29	Płock Północ	Płońsk	117	115	118	117
30	Płock Północ	Przasnysz	69	70	70	70
31	Płock Północ	Ostrołęka	69	71	72	71
32	Płock Północ	Ciechanów	192	192	193	192
33	Płock Północ	Ostrów Mazowiecka	58	59	58	58
34	Płock Północ	Wyszaków	74	73	74	74
35	Płock Północ	Sokołów Podlaski	36	36	35	36
36	Płock Północ	Siedlce	56	57	58	57
37	Płock Północ	Mińsk Mazowiecki	46	47	46	46
38	Płock Północ	Radom	41	41	41	41
39	Płock Północ	Kozienice	65	66	64	65
40	Płock Północ	Nowy Dwór Mazowiecki	26	26	27	26

Lp.	Lokalizacja magazynu	Punkt odbioru	Horyzont I - h_1	Horyzont II - h_2	Horyzont III - h_3	Średnia $\bar{x}$
41	Płock Północ	Piaseczno	141	142	142	142
42	Płock Północ	Warszawa Północ	72	72	70	71
43	Mława	Płońsk	54	54	53	54
44	Mława	Przasnysz	70	71	70	70
45	Mława	Ostrołęka	28	29	29	29
46	Mława	Ciechanów	41	41	41	41
47	Mława	Ostrów Mazowiecka	117	118	119	118
48	Mława	Wyszaków	42	44	44	43
49	Mława	Sokołów Podlaski	45	44	45	45
50	Mława	Siedlce	76	75	75	75
51	Mława	Mińsk Mazowiecki	144	142	139	142
52	Mława	Radom	53	54	53	53
53	Mława	Kozienice	51	52	51	51
54	Mława	Nowy Dwór Mazowiecki	33	33	34	33
55	Mława	Piaseczno	27	27	26	27
56	Mława	Warszawa Północ	32	32	31	32
SUMA			3990	4002	4003	3999

Źródło: opracowanie własne.

Parametry zadania transportowego nr 2 przyjęły wartości:

- $nl = 4$;
- $h = 2$;
- $b = 3$;
- $s = 3$;
- $m = 1$;
- $z = 56$;
- $ol = 14$.

Następnym parametrem analizy przydziału pojazdów do zadań transportowych był koszt. Dla potrzeb analizy kosztowej przyjęto stawki wykorzystane do przeprowadzenia analizy kosztowej doboru pojazdów do zadań transportowych (tabela 11).

Tabela 11. Stawki kosztowe wykorzystane do przeprowadzenia analizy doboru pojazdów do zadań transportowych

Typ pojazdu	Stawka [zł/km]	Stawka dzienna kierowcy [dzień/zł]
8 tonowy	4	250
20 tonowy	6	300
24 tonowy	6,5	350

Źródło: opracowanie własne.

W modelu symulacyjnym pojazdom przypisano stałe numery rejestracyjne, które ułatwiły przeprowadzenie analizy dla różnych wariantów symulacji wg schematu, który przedstawia tabela 12.

Tabela 12. Wykaz numerów rejestracyjnych pojazdów w zadaniach transportowych

Lp.	Nr rejestracyjny	Ładowność [t]	Lokalizacja magazynu
1	Soc_8_1	8	Sochaczew
2	Soc_8_2	8	Sochaczew
3	Soc_8_3	8	Sochaczew
4	Soc_20_1	20	Sochaczew
5	Soc_20_2	20	Sochaczew
6	Soc_20_3	20	Sochaczew
7	Soc_24_1	24	Sochaczew
8	Soc_24_2	24	Sochaczew
9	Soc_24_3	24	Sochaczew
10	Plo_8_1	8	Płock
11	Plo_20_1	20	Płock
12	Plo_24_1	24	Płock
13	Mla_8_1	8	Mława
14	Mla_20_1	20	Mława
15	Mla_24_1	24	Mława
16	Sie_8_1	8	Sieradz
17	Sie_20_1	20	Sieradz
18	Sie_24_1	24	Sieradz

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 13 przedstawia zestawienie parametrów zadań transportowych nr 1 i nr 2 wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji. Efektem symulacji jest najlepszy dobór pojazdów do zadania transportowego z punktu widzenia wybranych kryteriów i ich wartości.

Tabela 13. Zestawienie parametrów zadań transportowych wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji

Zadanie transportowe	Ładunek [t]	Lokalizacja magazynu	Liczba dostępnych pojazdów	Ładowność pojazdów
nr 1	800	Sochaczew	10	24 t
nr 2	3 999	Sochaczew Płock Sierpc Mława	5 w każdym magazynie	8 t 20 t 24 t

Źródło: opracowanie własne.

Po wprowadzeniu do modelu wszystkich danych wejściowych przeprowadzono symulację komputerową, dzięki której uzyskano wyniki szczegółowo opisane poniżej.

Rozwiązanie zadania 1

W przypadku zastosowania jednego typu pojazdu (8 tonowe) model określił parametry:

- $h = 2$ – łączenie zleceń;
- $b = 3$ – w 1-szej kolejności zlecenia realizowane największe.

Parametry te potwierdzają kryteria:

- $TG = \text{ok. } 504 \text{ godzin}$;
- $D = \text{ok. } 9\,400 \text{ km}$;
- $\tau = 0,22$.

W przypadku zastosowania jednego typu pojazdu (24 tonowe) model przyporządkował następującą liczbę pojazdów do realizacji zadania transportowego nr 1 wg poszczególnych kryteriów:

- KG – 3 pojazdy – 64 703,29 zł;
- $T1$ – 6 pojazdów – 87:54:57 godzin.

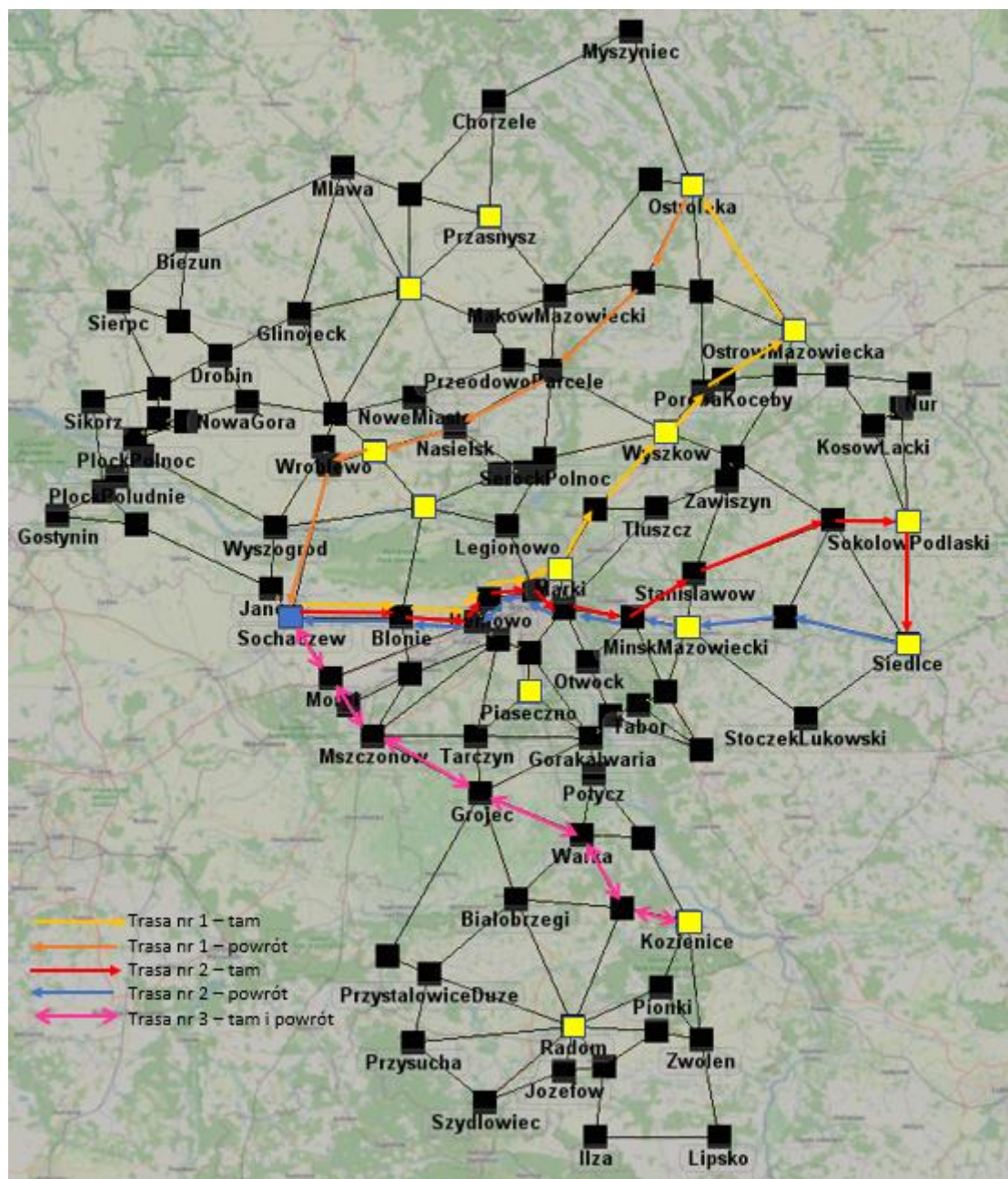
Wycinek raportu wyjściowego dla zadania transportowego nr 1 przedstawiono na rys. 30.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	NrRejstra	Czas	Lokalizacj	LadunekN	Ladownosi	ListPrzewo	DystansPo	DystansSkumulowany	NrRejstra	Pojemnos	Baza	Czas	Dystans	Ladunek	Podstawa	Wypelnien	Wykorzysta	
2	Soc_24_1	9000,33	Sochaczew	24	24	z7	0	0	Soc_24_1	24	Sochaczew	305288,2	1734,37	176	8	0,24	0,92	
3	Soc_24_1	10800,33	Blonie	24	24	z7	25,01	25,01	Soc_24_2	24	Sochaczew	283657,2	1611,85	168	7	0,26	1	
4	Soc_24_1	12026,44	OzarowMa	24	24	z7	17,04	42,04	Soc_24_3	24	Sochaczew	284445,1	1607,69	168	7	0,23	1	
5	Soc_24_1	12487,47	OpaczKolo	24	24	z7	6,41	48,45	Soc_24_4	24	Sochaczew	280493,7	1547,34	168	7	0,22	1	
6	Soc_24_1	13035,81	Ursynow	24	24	z7	7,62	56,08	Soc_24_5	24	Sochaczew	166359	1026,5	96	4	0,27	1	
7	Soc_24_1	13957,86	Rembertov	24	24	z7	12,81	68,89	Soc_24_6	24	Sochaczew	27724,75	285,21	24	1	0,37	1	
8	Soc_24_1	15069,66	Halinow	24	24	z7	15,45	84,34										
9	Soc_24_1	17152,58	Stanislawc	24	24	z7	17,37	101,7	Czas realizacji procesu:									
10	Soc_24_1	21197,65	Wegrow	24	24	z7	33,72	135,42	316497									
11	Soc_24_1	22422,01	SokolowPc	24	24	z7	17,01	152,43										
12	Soc_24_1	29622,05	SokolowPc	0	24		0	152,43	Suma czasow pracy wszystkich pojazdow:									
13	Soc_24_1	30846,41	Wegrow	0	24		17,01	169,44	1347968									
14	Soc_24_1	34891,48	Stanislawc	0	24		33,72	203,16										
15	Soc_24_1	36974,4	Halinow	0	24		17,37	220,53										
16	Soc_24_1	38086,21	Rembertov	0	24		15,45	235,97										
17	Soc_24_1	39008,26	Ursynow	0	24		12,81	248,79										
18	Soc_24_1	39556,59	OpaczKolo	0	24		7,62	256,41										
19	Soc_24_1	40017,62	OzarowMa	0	24		6,41	262,82										
20	Soc_24_1	41243,73	Blonie	0	24		17,04	279,86										
21	Soc_24_1	43043,73	Sochaczew	0	24		25,01	304,86										

Rys. 30. Wycinek raportu wyjściowego dla zadania transportowego nr 1

Źródło: opracowanie własne.

Przykładowe trasy 3 wybranych pojazdów w zadaniu transportowym nr 1 przedstawiono na rys. 31.



Rys. 31. Trasy 3 wybranych pojazdów zadania transportowego nr 1

Źródło: opracowanie własne.

Rozwiązanie zadania 2

Ze względu na przyjęte kryteria program wskazał najlepsze rozwiązanie:

- 20 pojazdów 24-tonowe - po 5 w każdym magazynie;
- 4 pojazdy 20-tonowe - po 1 w każdym magazynie;
- 4 pojazdy 8-tonowe - po 1 w każdym magazynie;

dla których kryteria przyjęły wartości:

- KG – 427 tys. zł;

- $\tau = 0,25$;
- $D = 52\,094$ km;
- $TG = 142:48:53$.

Wycinek raportu wyjściowego dla zadania transportowego nr 2 przedstawiono na rys. 32.

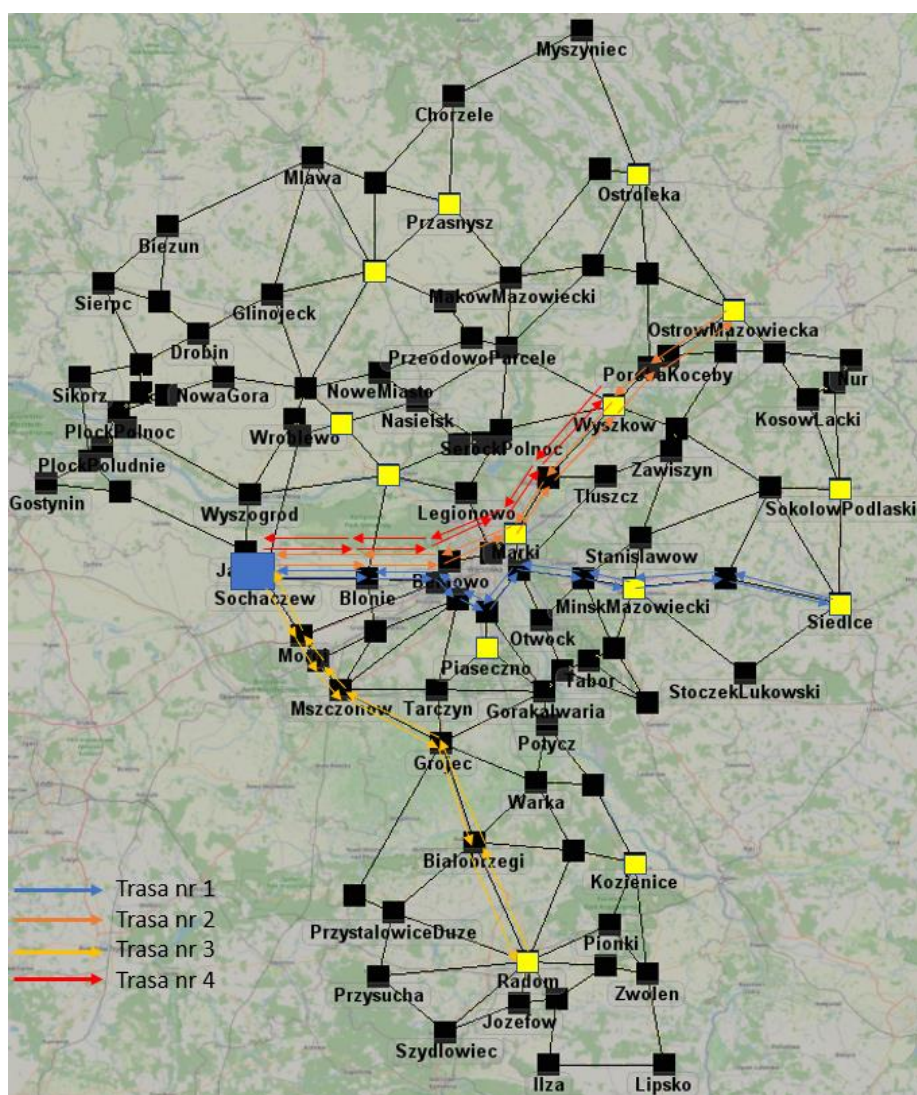
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	NrRejstra	Czas	Lokalizacja	Ladunek	Ni	Ladownos	ListPrzewo	DystansPo	DystansSkumulowany	NrRejstra	Pojemnos	Baza	Czas	Dystans	Ladunek	Podstawa	Wypelnien	Wykorzystanie
2	Mla_20_1	52805,34	Mława	20	20	z30		0	0	Sie_8_1	8	Sierpc	366447,3	1781,09	47	6	0,21	0,98
3	Mla_20_1	56542,37	Ciechanov	20	20	z30		31,15	31,15	Sie_20_1	20	Sierpc	341404,9	1475,34	100	5	0,19	1
4	Mla_20_1	57911,82	GolyminOs	20	20	z30		19,03	50,18	Sie_24_1	24	Sierpc	432872,9	2798,5	240	10	0,3	1
5	Mla_20_1	59208,65	Przedowc	20	20	z30		10,81	60,99	Sie_24_2	24	Sierpc	371253,9	2370,61	216	9	0,28	1
6	Mla_20_1	60274,92	Pultusk	20	20	z30		8,89	69,88	Sie_24_3	24	Sierpc	401825,1	2382,36	168	7	0,26	1
7	Mla_20_1	63818,48	Wyszkw	20	20	z30		29,54	99,42	Sie_24_4	24	Sierpc	335251,9	1855,16	144	6	0,23	1
8	Mla_20_1	64991,26	Lochow	20	20	z30		16,3	115,72	Sie_24_5	24	Sierpc	279924,3	1589,48	120	5	0,24	1
9	Mla_20_1	65382,31	Zawiszyn	20	20	z30		5,44	121,15	Plo_8_1	8	PlockPoln	375362,6	2325,57	64	8	0,26	1
10	Mla_20_1	66987,86	Stanislawc	20	20	z30		22,31	143,46	Plo_20_1	20	PlockPoln	328418,5	1707,63	100	5	0,25	1
11	Mla_20_1	67882,56	MinskMazc	20	20	z30		12,43	155,89	Plo_24_1	24	PlockPoln	434149,5	2756,92	240	10	0,26	1
12	Mla_20_1	73882,6	MinskMazc	0	20			0	155,89	Plo_24_2	24	PlockPoln	428748,5	2756,92	224	10	0,24	0,93
13	Mla_20_1	74777,29	Stanislawc	0	20			12,43	168,33	Plo_24_3	24	PlockPoln	391531,3	2412,77	216	9	0,27	1
14	Mla_20_1	76382,85	Zawiszyn	0	20			22,31	190,63	Plo_24_4	24	PlockPoln	372596,5	2018,12	168	7	0,24	1
15	Mla_20_1	76773,89	Lochow	0	20			5,44	196,07	Plo_24_5	24	PlockPoln	203996,5	671,4	72	3	0,15	1
16	Mla_20_1	77946,68	Wyszkw	0	20			16,3	212,37	Mla_8_1	8	Mława	401203,4	1946,23	56	7	0,24	1
17	Mla_20_1	81490,23	Pultusk	0	20			29,54	241,9	Mla_20_1	20	Mława	439270,2	1705,76	120	6	0,16	1
18	Mla_20_1	82556,5	Przedowc	0	20			8,89	250,8	Mla_24_1	24	Mława	494426,2	2821,58	264	11	0,28	1
19	Mla_20_1	83853,33	GolyminOs	0	20			10,81	261,61	Mla_24_2	24	Mława	476807,4	2445,53	264	11	0,24	1
20	Mla_20_1	85222,79	Ciechanov	0	20			19,03	280,64	Mla_24_3	24	Mława	486687	2284,74	240	10	0,22	1
21	Mla_20_1	88959,82	Mława	0	20			31,15	311,79	Mla_24_4	24	Mława	478130,1	2242,87	179	8	0,21	0,93
22	Mla_20_1	240005	Mława	20	20	z26		0	311,79	Mla_24_5	24	Mława	440471,2	1856,45	144	6	0,19	1
23	Mla_20_1	243742,1	Ciechanov	20	20	z26		31,15	342,94	Soc_8_1	8	Sochaczew	217477,3	1593,33	48	6	0,29	1
24	Mla_20_1	249742,1	Ciechanov	0	20			0	342,94	Soc_20_1	20	Sochaczew	183724,4	1091,76	65	4	0,23	0,81
25	Mla_20_1	253479,1	Mława	0	20			31,15	374,09	Soc_24_1	24	Sochaczew	261962,8	1563,27	168	7	0,24	1
26	Mla_20_1	297005	Mława	20	20	z25		0	374,09	Soc_24_2	24	Sochaczew	258746,4	1480,02	168	7	0,22	1

Rys. 32. Wycinek raportu wyjściowego dla zadania transportowego nr 2

Źródło: opracowanie własne.

Łącznie wskazano 28 pojazdów (ze względu na otrzymaną bardzo dużą liczbę wyników, zaprezentowano jedynie wyniki najlepszych symulacji w celu weryfikacji otrzymanego rozwiązania). Również ze względu na otrzymanie wyników o tej samej sumarycznej liczbie pojazdów, ale różnej liczbie typów pojazdów rozwiązanie wskazane przez metodę w dalszej części pracy będzie oznaczone pod postacią „**28 pojazdów A**”.

Rys. 33 przedstawia zrealizowane trasy przez pojazd 24-tonowy nr 4 dla symulacji realizacji zadania transportowego nr 2.



Rys. 33. Zrealizowane trasy przez pojazd 24-tonowy nr 4 dla symulacji realizacji zadania transportowego nr 2

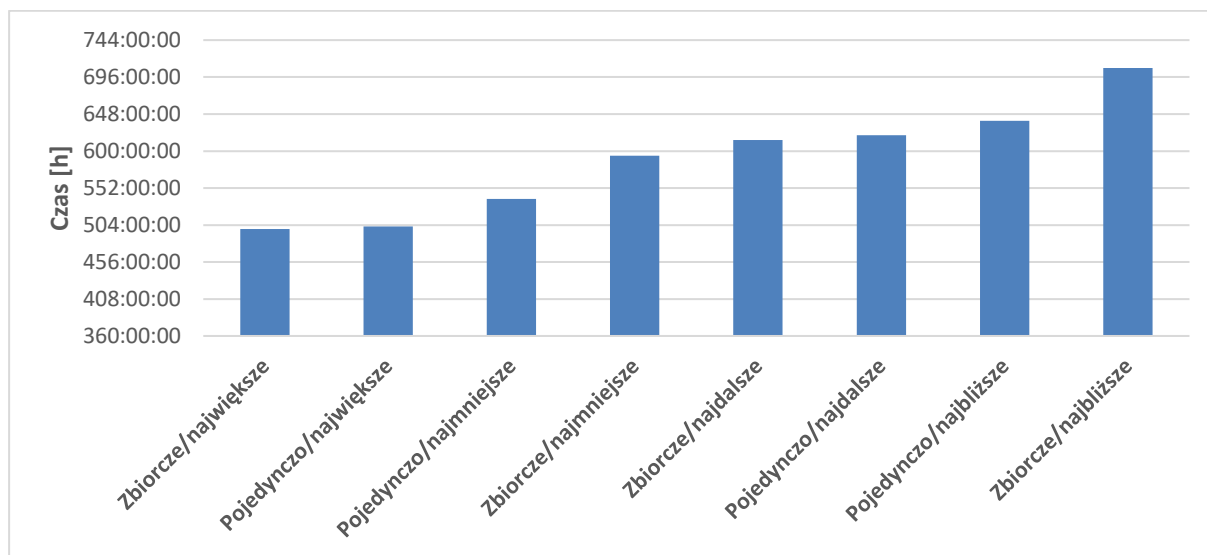
Źródło: opracowanie własne.

5.3. Weryfikacja doboru typu i liczby pojazdów do zadania transportowego nr 1

W celu weryfikacji metody otrzymane wyniki symulacji pod postacią wygenerowanych raportów poddano analizie w narzędziu Excel. Przeprowadzona analiza polegała na zestawieniu ze sobą wszystkich otrzymanych wyników symulacji dla poszczególnych założeń i ich porównanie.

Poniżej zaprezentowano wybraną szczegółową analizę otrzymanych wyników symulacji zadania transportowego nr 1.

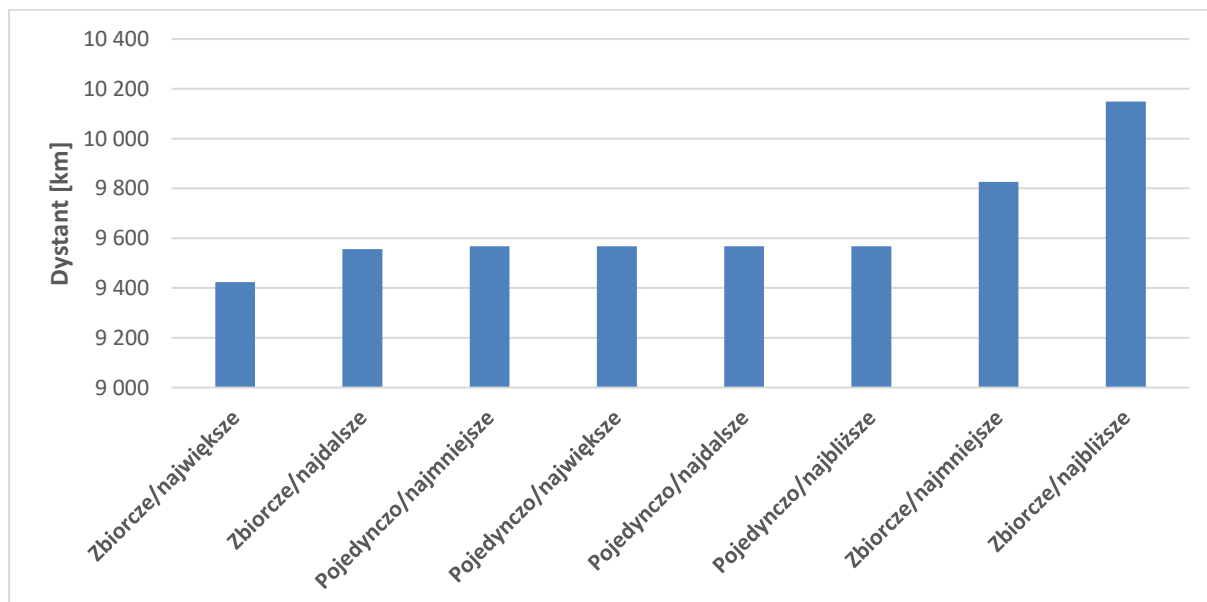
Model z dostępnych 8 możliwości (tabela 6) sposobów realizacji zadania transportowego wybrał kryterium „zbiorcze/największe”, gdyż czas trwania całego procesu rozwózki był najkrótszy, co zaprezentowano na rys. 34.



Rys. 34. Czas trwania procesu dla poszczególnych kryteriów realizacji zad. trans. nr 1 – pojazdy 8 tonowe

Źródło: opracowanie własne.

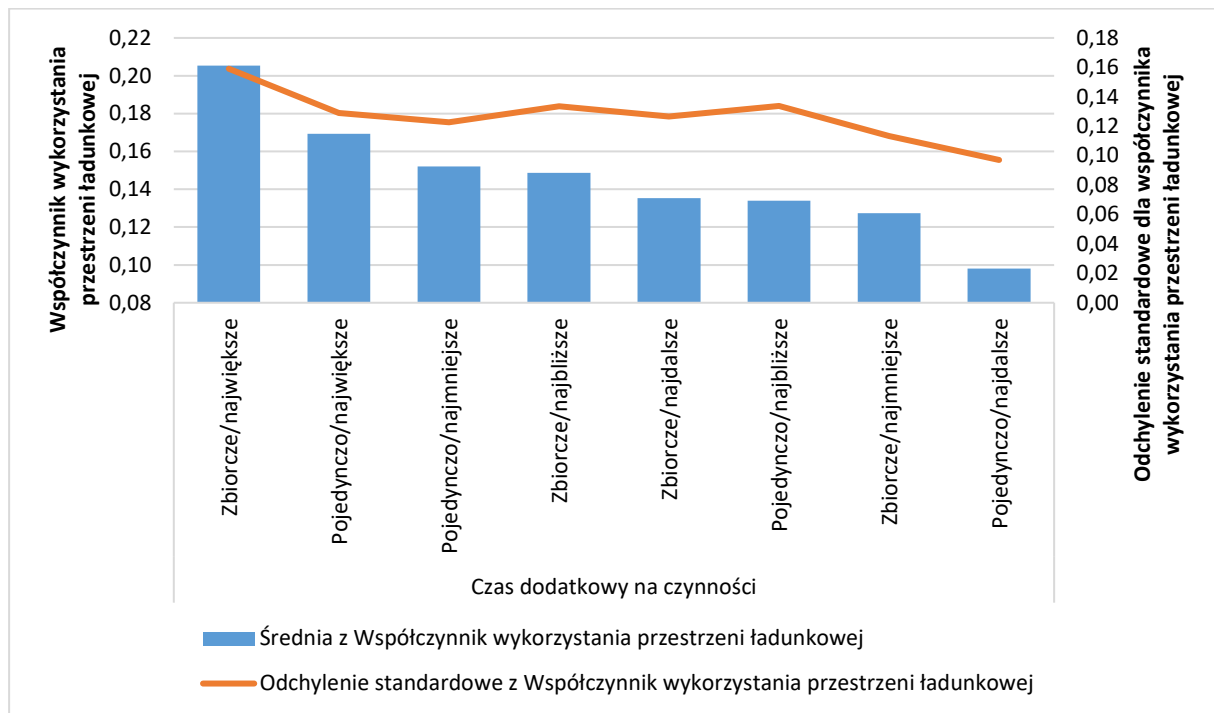
Dodatkowo suma zrealizowanego dystansu jazdy wszystkich pojazdów była najniższa dla kryterium „zbiorcze/największe”, co przedstawiono na rys. 35.



Rys. 35. Suma zrealizowanego dystansu jazdy wszystkich pojazdów dla poszczególnych kryteriów realizacji zad. trans. nr 1 – pojazdy 8 tonowe

Źródło: opracowanie własne.

Współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej dla poszczególnych kryteriów realizacji zadania transportowego nr 1 przedstawiono na rys. 36.



Rys. 36. Współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej pojazdów dla poszczególnych kryteriów realizacji zad. trans. nr 1 – pojazdy 8 tonowe

Źródło: opracowanie własne.

Z przedstawionego na rys. 36 zestawienia wynika, iż najwyższym współczynnikiem wykorzystania przestrzeni ładunkowej cechują się kryteria:

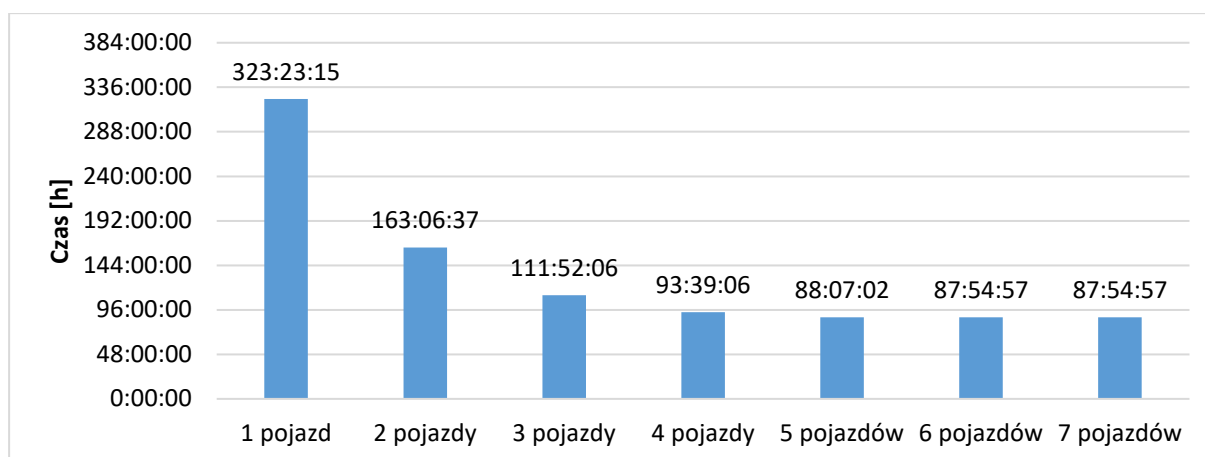
- zbiorcze/największe;
- pojedyncze/największe;
- pojedyncze/najmniejsze.

Kolejne wyniki symulacji współczynnika wykorzystania przestrzeni ładunkowej poszczególnych kryteriów są średnio niższe (od 25 do 35%) względem wyniku najlepszego.

Podsumowując, weryfikacja otrzymanych wyników symulacji potwierdza, iż opracowana metoda i model symulacyjny w programie FlexSim prawidłowo przeprowadza proces doboru pojazdów do zadań transportowych z uwzględnieniem wybranych kryteriów.

Z punktu widzenia pokonanego dystansu, suma przejechanych kilometrów jest na takim samym poziomie, tj. ok. 7 800 km. Dlatego w tym przypadku kryterium dystansu nie jest brane pod uwagę.

Czas realizacji zadania transportowego nr 1 z wykorzystaniem pojazdów 24-tonowych przedstawiono na rys. 37.

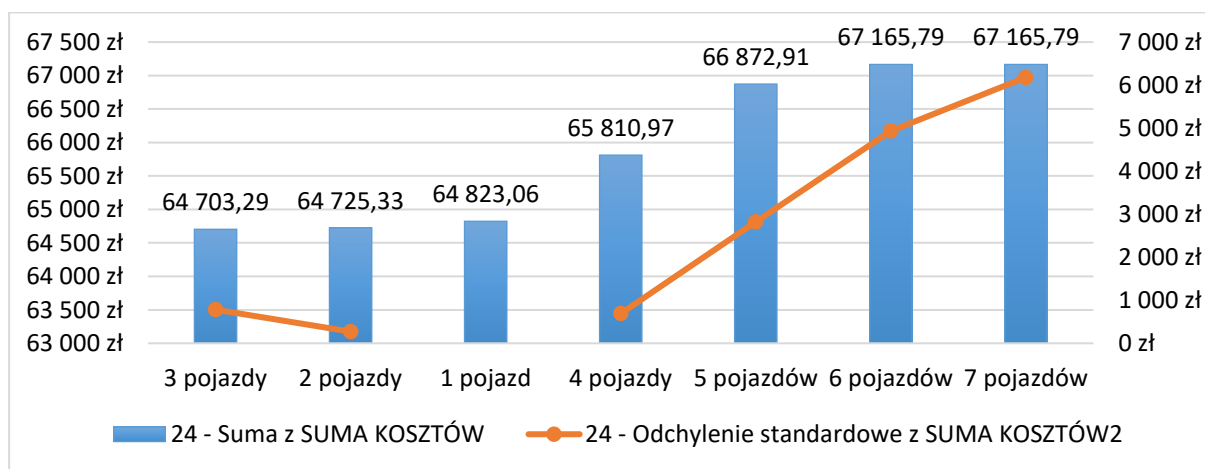


Rys. 37. Czas realizacji zad. trans. nr 1 z wykorzystaniem pojazdów 24-tonowych

Źródło: opracowanie własne.

Z przedstawionego rys. 37 wynika, iż czas realizacji zadania transportowego nr 1 maleje wraz ze wzrostem liczby pojazdów. Również dla liczby pojazdów 6 i więcej czas ten się stabilizuje i wynosi ok. 88 h.

Zestawienie symulacji kosztów realizacji zadania transportowego nr 1 przez pojazdy 24-tonowe przedstawiono na rys. 38.



Rys. 38. Zestawienie kosztów realizacji zad. trans. nr 1 przez pojazdy 24-tonowe

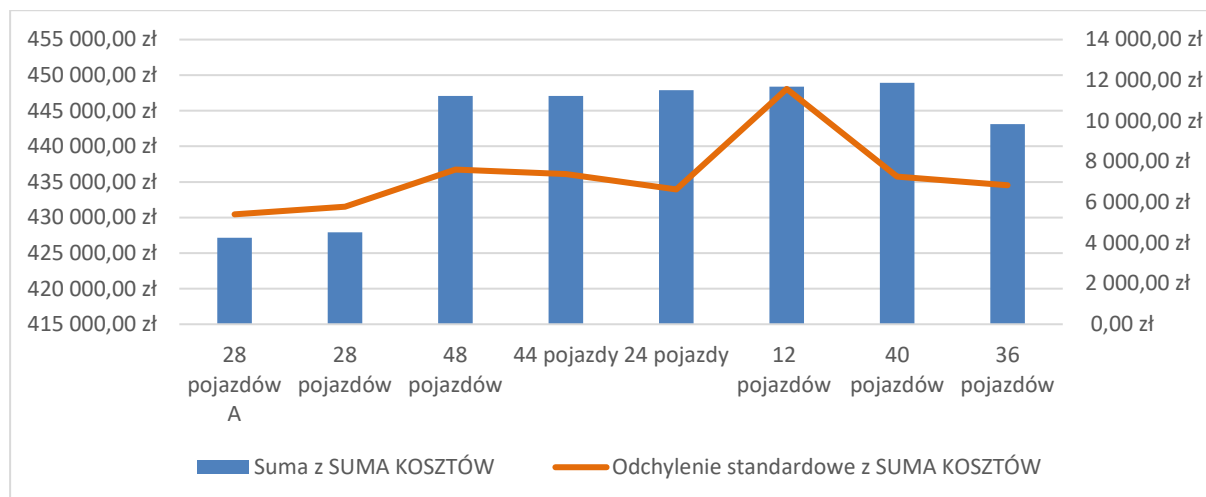
Źródło: opracowanie własne.

Z przedstawionego na rys. 38 zestawienia wynika, iż najniższy koszt realizacji zadania transportowego nr 1 przez pojazdy 24-tonowe będzie zrealizowany przez 3 pojazdy, co również potwierdza poprawny wynik symulacji.

5.4. Weryfikacja doboru typu i liczby pojazdów do zadania transportowego nr 2

Podobnie jak w poprzednim zadaniu w celu weryfikacji wyników symulacji zestawiono otrzymane wyniki dla poszczególnych kryteriów w narzędziu Excel.

Zestawienie kosztów realizacji zadania transportowego nr 2 przez różną liczbę pojazdów różnego typu przedstawiono na rys. 39.

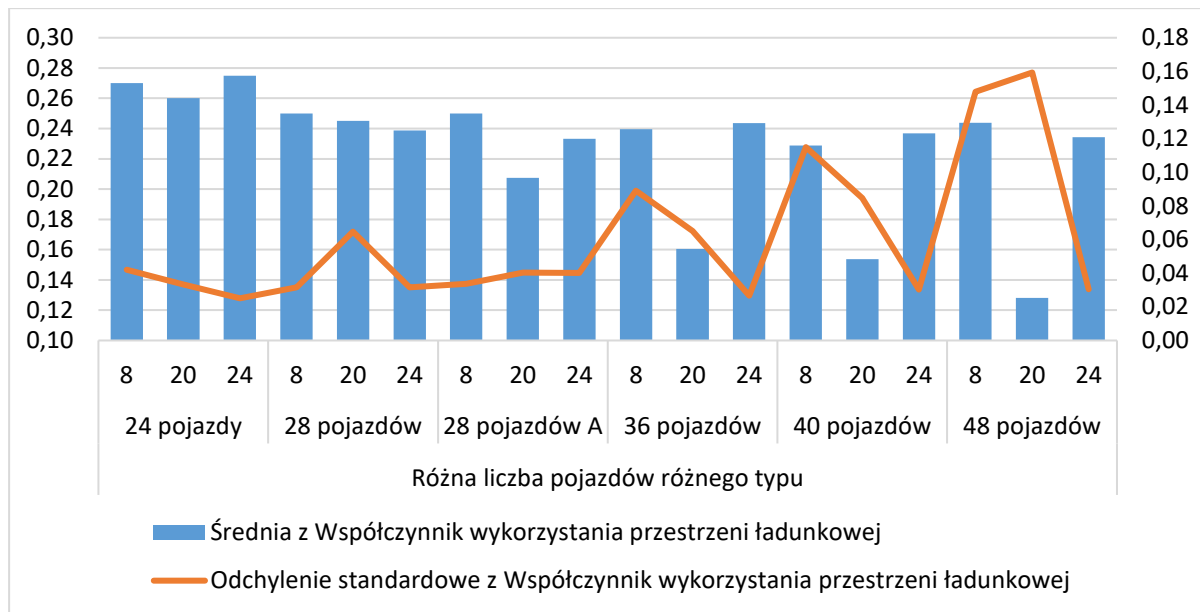


Rys. 39. Zestawienie kosztów realizacji zad. trans. nr 2 przez różną liczbę pojazdów różnego typu

Źródło: opracowanie własne.

Z przedstawionego na rys. 39 zestawienia wynika, że najniższy koszt zadania transportowego nr 2 będzie dotyczył zestawienia dla 28 pojazdów A, również przy najniższym odchyleniu standardowym, co potwierdza prawidłowy wynik symulacji.

Współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej poszczególnych typów pojazdów i ich liczby dla zadania transportowego nr 2 przedstawiono na rys. 40.



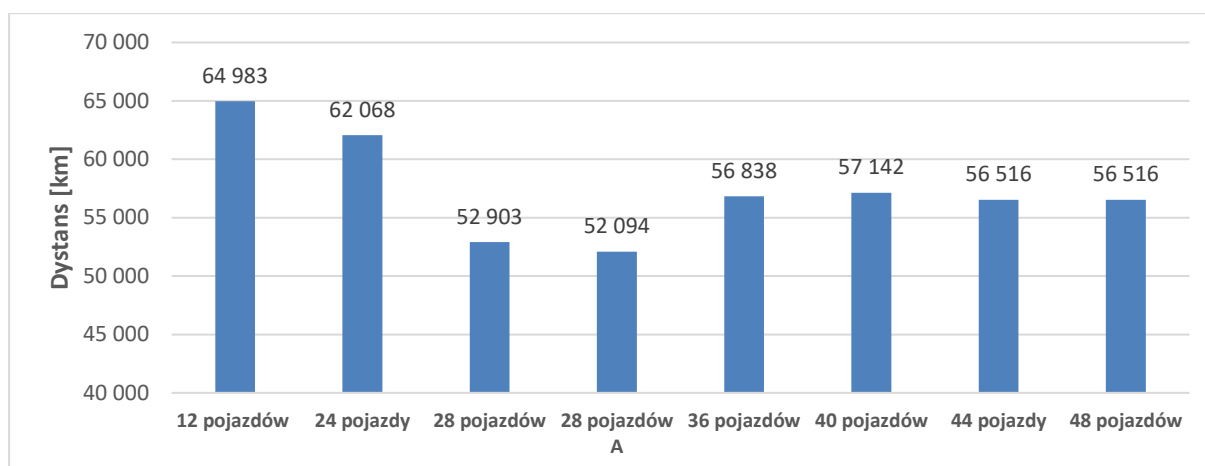
Rys. 40. Współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej poszczególnych typów pojazdów i ich liczby dla zad. trans. nr 2

Źródło: opracowanie własne.

Z przedstawionego na rys. 40 zestawienia wynika, iż liczba 24 pojazdów cechuje się najwyższym współczynnikiem wykorzystania przestrzeni ładunkowej pojazdów. Jest to inny wynik niż otrzymany w symulacji. Wynika to z tego, iż 1-szym kryterium wskazania najlepszego rozwiązania jest kryterium kosztów. Dodatkowo zestawienie 28 pojazdów A uzyskało najlepsze wyniki wg innych kryteriów.

Z przedstawionych symulacji można wnioskować, iż poprzez dobór liczby pojazdów danego typu można wpłynąć na współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej pojazdu danego typu i tym samym poprzez dobór odpowiedniej liczby pojazdów obniżyć odchylenie standardowe tego współczynnika, co świadczyć będzie o bardziej równomiernym wykorzystaniu dostępnych pojazdów i ich efektywniejszym wykorzystaniu.

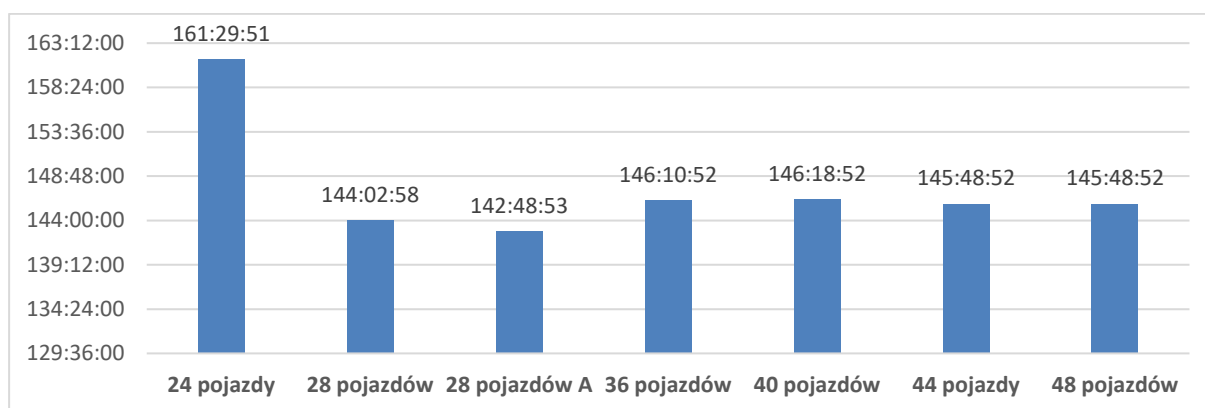
Sumę zrealizowanego dystansu doboru różnej liczby i typu pojazdów do zadania transportowego nr 2 przedstawiono na rys. 41.



Rys. 41. Suma zrealizowanego dystansu dla doboru różnej liczby i typu pojazdów zad. trans. nr 2

Źródło: opracowanie własne.

Analizę czasu trwania zadania transportowego nr 2 przedstawiono na rys. 42.



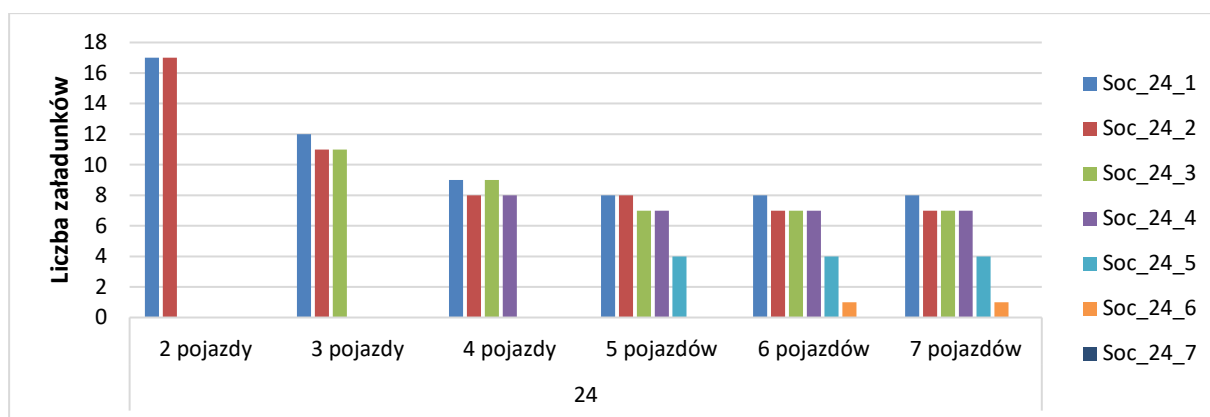
Rys. 42. Czas realizacji zad. trans. nr 2 z wykorzystaniem różnej liczby i typu pojazdów

Źródło: opracowanie własne.

Z przedstawionych na rys. 41 i rys. 42 danych wynika, iż liczba pojazdów 28A charakteryzuje się najniższą sumą zrealizowanego dystansu i najkrótszym czasem trwania zadania transportowego nr 2, co również weryfikuje pozytywny wynik wskazany przez program.

5.5. Podsumowanie weryfikacji metody

Podczas przeprowadzenia symulacji, jak i weryfikacji otrzymanych wyników dodatkowo można zauważyć np. liczbę załadunków pojazdów 24-tonowych dla zadania transportowego nr 1, którą przedstawiono na rys. 43.

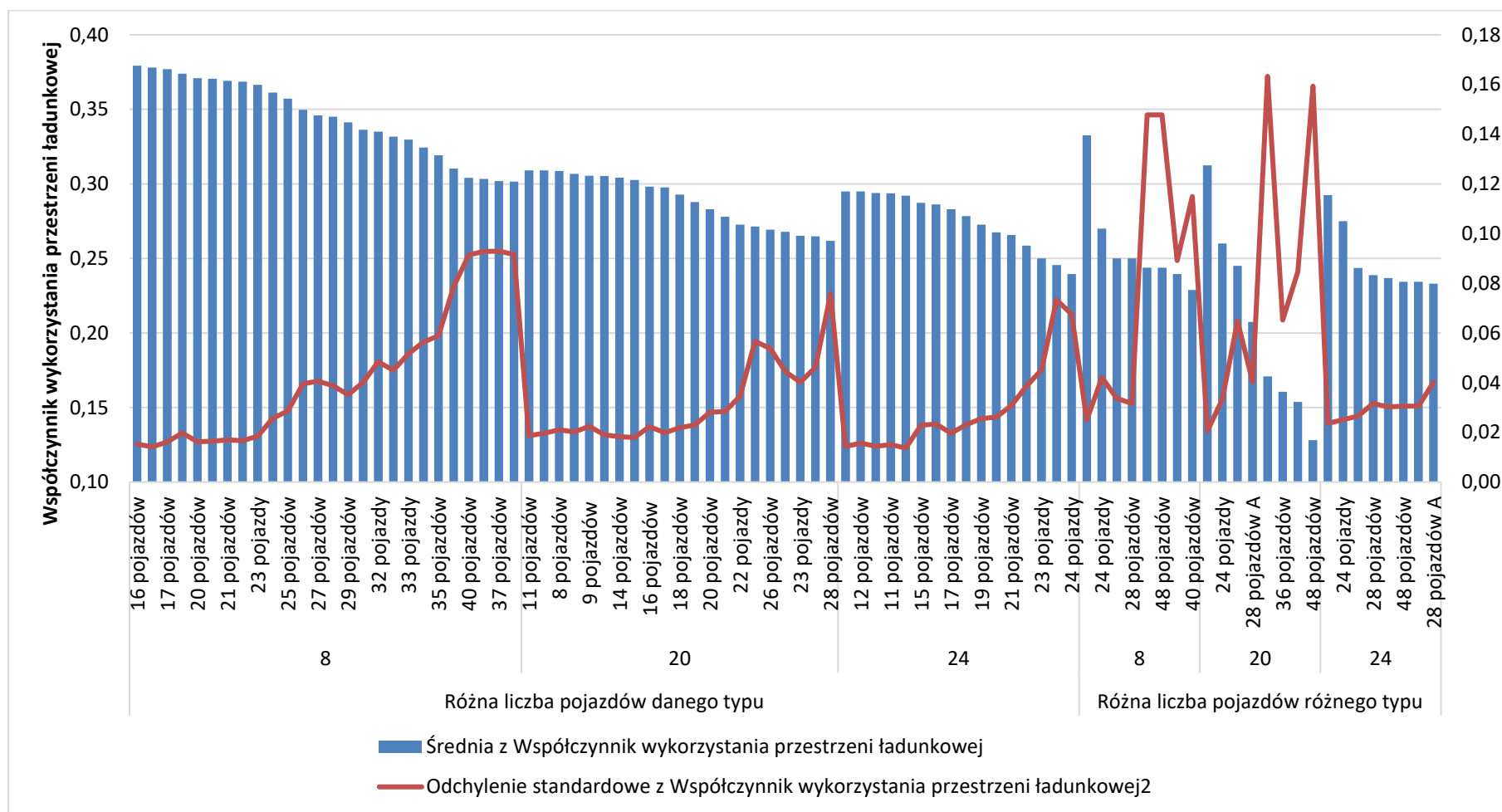


Rys. 43. Liczba załadunków pojazdów 24-tonowych dla zad. trans. nr 1

Źródło: opracowanie własne.

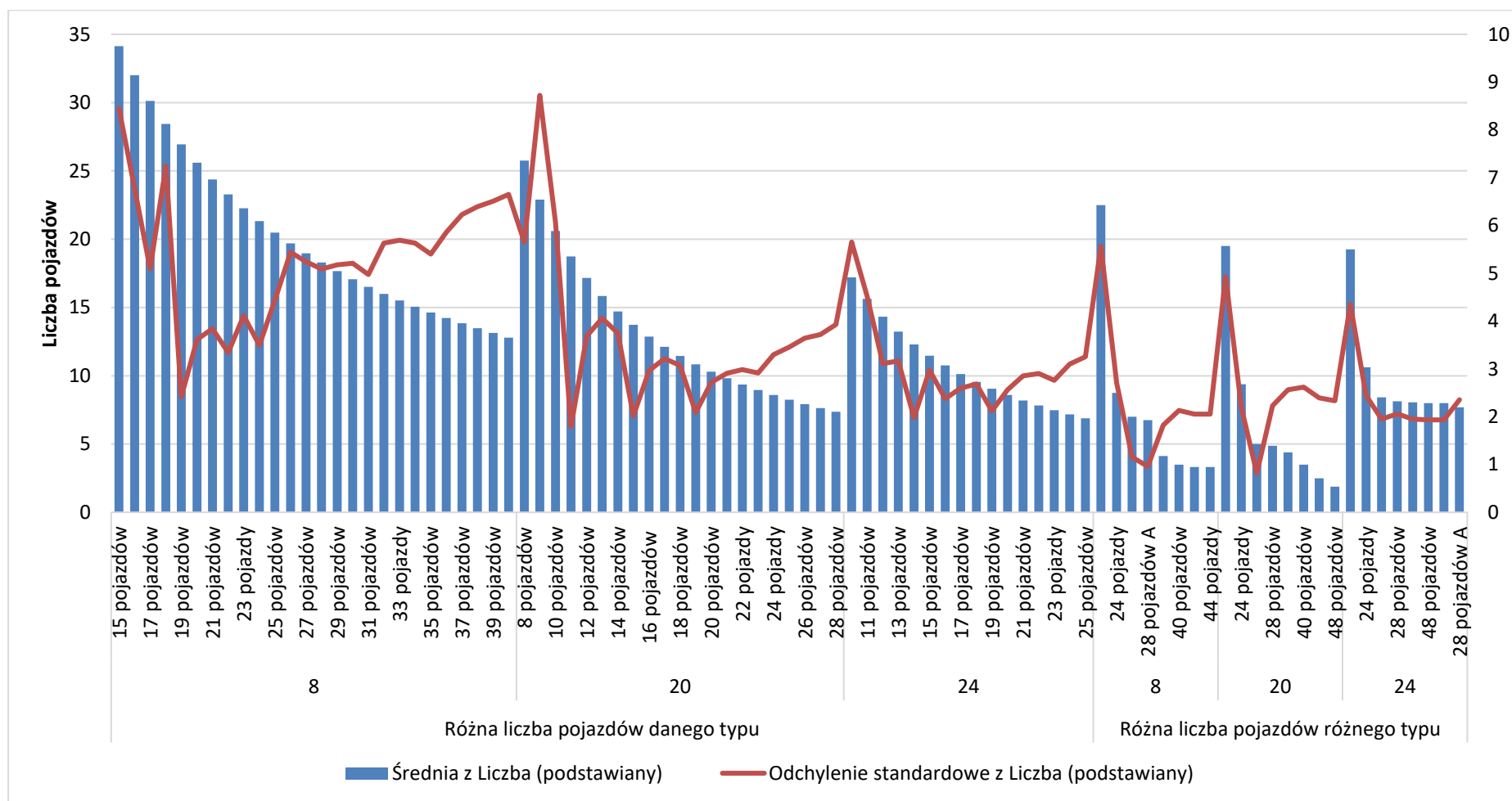
Z przedstawionego rys. 43 można wnioskować, iż w przypadku pojazdów 24-tonowych do realizacji zadania transportowego nr 1 liczba pojazdów w przedziale od 2 do 4 jest wykorzystywana równomiernie. Dla większej liczby pojazdów, kolejne pojazdy tj. odpowiednio 6, 7 i 8 wykorzystywane są dużo mniej. Może to być kolejnym kryterium przy podjęciu decyzji o liczbie doboru pojazdów.

Autorska metoda pozwala również na pełną analizę doboru pojazdów dla danych z zadania transportowego nr 2 z punktu widzenia wybranych parametrów (rys. 44, rys. 45, rys. 46).



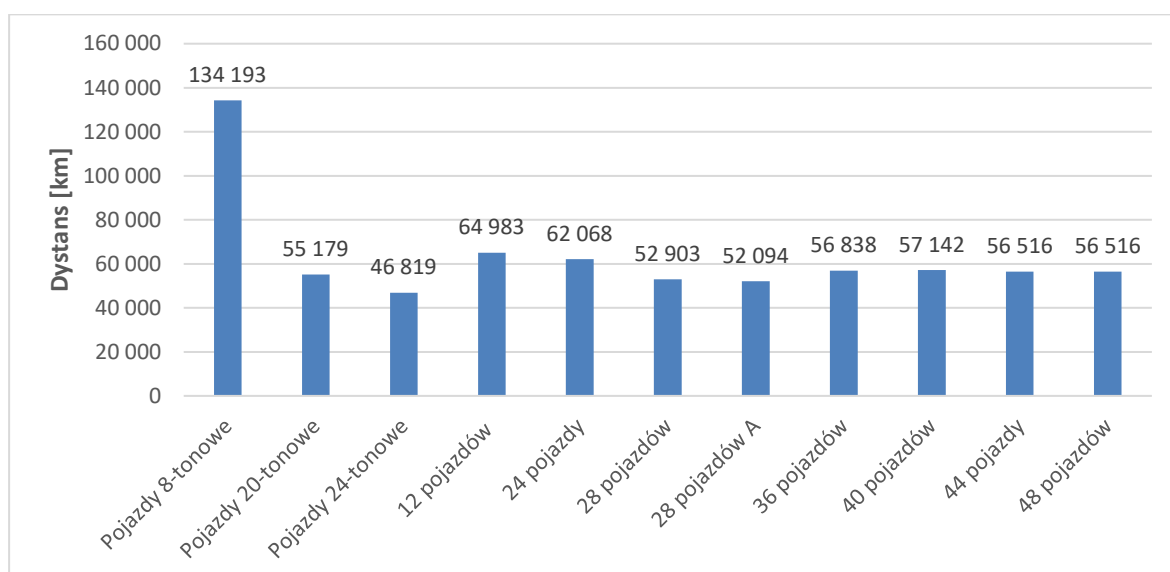
Rys. 44. Zestawienie współczynnika wykorzystania przestrzeni ładunkowej pojazdów w zadaniu transportowym nr 2

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 45. Zestawienie średniej liczby załadunku pojazdów w zadaniu transportowym nr 2

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 46. Zestawienie sumy zrealizowanego dystansu pojazdów w zadaniu transportowym nr 2 wszystkich symulacji

Źródło: opracowanie własne.

Z punktu widzenia każdego kryterium racjonalna liczba pojazdów do realizacji zadania transportowego była inna. Jest to potwierdzenie, iż na dobór pojazdów do zadań wpływa wiele czynników i nie ma „najlepszej” liczby pojazdów, która będzie najbardziej korzystna z punktu widzenia oceny tych i innych parametrów/kryteriów.

Przeprowadzona weryfikacja symulacji potwierdza, iż opracowana metoda, a w tym model symulacyjny w pożądanym sposób przeprowadza dobór pojazdów do zadań transportowych i wskazuje racjonalne rozwiązanie. Mając na uwadze przyjęte różne kryteria, można stwierdzić iż opracowana metoda w sposób racjonalny dobiera pojazdy do zadań transportowych.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Problematyka i złożoność zagadnienia doboru pojazdów do zadań transportowych ma odzwierciedlenie w licznych publikacjach naukowych, a jednocześnie w małej dostępności narzędzi/programów wspomagających. Bazując na dostępnej wiedzy teoretycznej oraz doświadczeniu praktycznym autorki dysertacji zdecydowano się na opracowanie metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych.

Przedstawione w dysertacji podejście do zagadnienia doboru pojazdów do zadań transportowych jest oryginalnym autorskim pomysłem na rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Bazując na nowoczesnych algorytmach ewolucyjnych przedstawiono zagadnienie doboru pojazdów do zadań nie tylko w ujęciu jednokryterialnym, ale również w ujęciu wielokryterialnym, dodatkowo bazując na prognozie popytu przy wykorzystaniu sieci neuronowych. Współczesne technologie komputerowe wychodzą naprzeciw potrzebom rynków wymagających analizy dużej liczby danych, do których należy zagadnienie doboru pojazdów do zadań w przedsiębiorstwach transportowo-logistycznych. Implementacja opracowanej metody możliwa była poprzez opracowanie modelu matematycznego, modelu sieci neuronowej w programie komputerowym Statistica i modelu symulacyjnego w programie komputerowym FlexSim, który posłużył również do weryfikacji opracowanej metody. Taki schemat realizacji pracy był konieczny ze względu na brak narzędzi symulacyjnych wykorzystujących zdefiniowany model matematyczny oraz potrzebę weryfikacji otrzymanych wyników na podstawie danych rzeczywistych. To było podstawą do stwierdzenia, iż otrzymane wyniki badań symulacyjnych są zgodne z założeniami teoretycznymi, co tym samym potwierdziło poprawność opracowanej metody.

Wyniki pracy mają charakter zwiększający wiedzę i rozwijający naukę. Zaproponowana metoda może posłużyć jako wzbogacenie narzędzi optymalizacyjnych wyznaczających dobór pojazdów do zadań, liczbę i typ pojazdów, a także wyznaczyć trasę tych pojazdów. Ponadto, niweluje możliwość popełnienia błędu przez pracownika, a także w zasadniczy sposób skraca czas doboru pojazdów do zadań, co również przekłada się na lepsze wykorzystanie przestrzeni ładunkowej. Zaproponowane rozwiązanie skraca czas planowania doboru pojazdów do czasu ok. 5 minut – to jest co najmniej 4x szybciej niż w analizowanym przedsiębiorstwie.

Rezultat pracy w postaci opracowanej metody doboru pojazdów do zadań transportowych może znaleźć zastosowanie w przedsiębiorstwach transportowo-logistycznych poprawiając efektywność przewozów ładunków. Ponadto opracowaną metodę można zastosować

w profesjonalnych pakietach wspomagających planowanie przewozów i podejmowaniu decyzji (AI - baza danych).

Wymiernym efektem pracy jest opracowany model matematyczny i model symulacyjny doboru pojazdów do zadań transportowych zaimplementowany w programie komputerowym. Opracowana w ten sposób w pracy metoda w zależności od sytuacji decyzyjnej umożliwia realizację zadań stawianych przed operatorami transportowymi lub operatorami logistycznymi. Może skrócić czas opracowania doboru pojazdu do zadań (w tym szybsze opracowanie trasy przejazdu), a także eliminuje możliwość popełnienia błędu przez pracownika.

Wyniki pracy określono jako rozszerzające dotychczasową wiedzę w tym zakresie. Tym samym przyjęta teza badawcza „**metoda modelowania matematycznego wykorzystująca sieci neuronowe do wyznaczenia prognoz popytu umożliwi racjonalny dobór pojazdów do przyszłych zadań transportowych, w którym jednocześnie wyznaczane są trasy jazdy pojazdów**„ została potwierdzona, a cel pracy „**opracowanie metody wielokryterialnego wspomagania decyzji w zakresie racjonalnego doboru pojazdów do zadań transportowych**” został osiągnięty.

W wyniku osiągnięcia celu pracy i przeprowadzonych badań symulacyjnych potwierdzono prawdziwość założonej tezy. Na tej podstawie oceniono, że użyte w pracy metody badawcze oraz narzędzia zostały dobrane w sposób prawidłowy. Tym samym zrealizowano cele częściowe pracy, tj.:

- zidentyfikowano obszar badawczy w zakresie transportu drogowego towarów, w tym branży meblarskiej i problematyki wyznaczania tras przejazdów;
- usystematyzowano wiedzę na temat procesu doboru pojazdów do zadań transportowych oraz zastosowania sieci neuronowych w logistyce;
- zaprojektowano sieć neuronową do prognozy popytu;
- opracowano model doboru pojazdów do zadań transportowych;
- opracowano model symulacyjny do weryfikacji opracowanego rozwiązania poprzez wykorzystanie danych rzeczywistych oraz ocenę poprawności wyników.
- opracowanie modelu symulacyjnego do weryfikacji opracowanego rozwiązania oraz ocenę poprawności wyników.

W pracy opisano działania o charakterze poznawczym (aspekty teoretyczne), które znalazły odzwierciedlenie w działaniach o charakterze użytkowym (aspekty praktyczne). Wybrane z nich przywołano w kolejnych akapitach.

Do aspektów poznawczych w dysertacji zaliczono:

- pogłębiony przegląd literatury, który umożliwił wskazanie luki badawczej w zakresie rozważań dotyczących wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych;
- przytoczenie podstawowej terminologii w zakresie doboru pojazdów do zadań transportowych, a także problem wyznaczania tras pojazdów;
- opracowanie modelu matematycznego doboru pojazdów do zadań transportowych uwzględniającego wszystkie jego istotne elementy ze względu na przedmiot badań tj.: formalizację języka opisu, formalizację kryteriów oceny, zapisu układu ograniczeń uwzględniających aspekty techniczne, ekonomiczno-technologiczne.

Do aspektów użytecznych (praktycznych) w pracy zaliczono:

- opracowanie projektu sieci neuronowej umożliwiający prognozę popytu;
- założenia modelu matematycznego zostały zaimplementowane do modelu symulacyjnego, a następnie za pomocą programu FlexSim nastąpiła symulacja komputerowa, która stanowiła weryfikację opracowanej metody;
- przeprowadzenie symulacji doboru pojazdów do zadań transportowych;
- metoda umożliwia zaplanowanie sztytu na miarę parku samochodowego, ich liczba i typ będą wykorzystywane w efektywny sposób;
- zaproponowana metoda jest metodą uniwersalną, może być stosowana dla różnych rodzajów ładunków, różnych typów pojazdów, różnej liczby punktów nadania i odbioru;
- metoda skraca czas podejmowania decyzji.

Wkład Autorki w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport zawiera takie elementy, jak:

- opracowanie modelu matematycznego uwzględniające jednoczesne zastosowanie różnych kryteriów optymalizacyjnych;
- autorska metoda wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych;
- opracowanie projektu sieci neuronowej umożliwiający prognozę popytu;
- opracowanie w programie komputerowym narzędzia optymalizującego dobór pojazdów do zadań i wyznaczania tras przejazdów.

W dalszych badaniach można byłoby rozszerzyć metodę poprzez zmianę warunków ograniczających i rozbudowę wspomnianych zagadnień o kierunki rozwoju tj.:

- analizę doboru pojazdów do zadań pod kątem efektywności ekonomicznej tzn. szczegółowa analiza kosztów transportu związana z trasą przejazdu, poszerzona

o koszty zużycia paliwa, opłat drogowych, wynagrodzeń, kosztów utrzymania pojazdów itp.

- uwzględnienie przeszkód terenowych i elementów infrastruktury na trasie przejazdów, co przełożyłoby się na inny czas i koszt realizacji zadania;
- wykorzystywanie mocy obliczeniowej w analizie danych z różnych źródeł;
- możliwość zastosowania oceny wielokryterialnej;
- analiza sytuacji drogowej w czasie rzeczywistym podczas planowania doboru pojazdów do zadań dla realizacji zadania transportowego;
- zastosowanie innych technik i narzędzi z obszaru AI.

Mając na uwadze złożoną problematykę przedstawionego zagadnienia, ciągły rozwój technologii informacyjnych, a także dynamicznie zmieniające się otoczenie przedsiębiorstw transportowo-logistycznych zasadnym wydaje się być analiza i modelowanie tych zagadnień z wykorzystaniem narzędzi, metod i algorytmów z obszaru sztucznej inteligencji. Mógłby to być kolejny obszar badań poszerzający dotychczasową wiedzę z tego zakresu.

LITERATURA

- [1] Achuthan N. R., Caccetta L., 1991. Integer linear programming formulation for a vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. Vol. 52(1), pp. 86-89.
- [2] Altmel I.K., Öncan T., 2005. A new enhancement of the Clarke and Wright savings heuristic for the capacited vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*. Vol. 56, pp. 954-961
- [3] Aora S., Puri M.C., A variant of time minimizing assignment problem, *European Journal of Operational Research* 110 (2) (1998) 314–325.
- [4] Apanowicz J., *Metodologia ogólna*, Wyższa Szkoła Administracji i Biznesu, Gdynia, 2002.
- [5] Arabas J., *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*. WNT, Warszawa 2001.
- [6] Armstrong R. D., Jin Z.: Solving linear bottleneck APs via strong spanning trees, *Operations Research Letters*, Volume 12, Issue 3, pp. 179-180, 1992.
- [7] Atkin J., Burke Edmund K., Greenwood John S., Reeson D.: Hybrid Metaheuristics to Aid Runway Scheduling at London Heathrow Airport, *Transportation Science*, Institute for Operations Research and the Management Sciences, Volume 41 Issue 1, pp. 90-106, USA 2007.
- [8] Awrejcewicz J., *Matematyczne modelowanie systemów*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Fundacja Książka „Naukowo-Techniczna”, Warszawa 2007.
- [9] Azi, N., Gendreau, M., Potvin, J. Y. 2010. An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. *European Journal of Operational Research*. Vol. 202(3), pp.756-763.
- [10] Banachowski L., Diks K., Rytter W., *Algorytmy i struktury danych*. WNT, Warszawa 2001.
- [11] Bektas T.: The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures *Omega* 34 209 – 219, 2006.
- [12] Bellman R., On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 16, Providence 1958.
- [13] Belowska-Bień K., Bień B., Wykorzystanie technik sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego we wspomaganiu diagnostyki i leczenia chorób neurologicznych, *Aktualności neurologiczne*, 2021, Vol 21, Issue 3.

- [14] Benes J.: Teoria systemów. PWN, Warszawa 1979.
- [15] Berbeglia G., Cordeau J.-F., Gribkovskaia I., Laporte G., 2007. Static pickup and delivery problems: A classification scheme and survey. TOP, Vol. 15(1), pp. 1–31.
- [16] Berkeley E.C.: Symbolic Logic and Intelligent Machines. Reinhold Publishing Corporation, New York 1960.
- [17] Biggs N. L., Lloyd E. K., Wilson R. J., Graph Theory 1736 – 1936. Clarendon Press, Oxford 1986.
- [18] Bodin L., Golden B., Assad A., Ball M.: Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art, Computers and Operations Research Vol 10, 1983.
- [19] Bodziony P., Kasztelewicz Z., Sawicki P., The problem of multiple criteria selection of the surface mining haul trucks, Arch. Min. Sci., Vol. 61 (2016), No 2, p. 223–243.
- [20] Branża meblarska, pozycja międzynarodowa polskich producentów i prognozy rozwoju rynku do 2026 r., Departament Analiz Ekonomicznych, PKO BP, październik 2022.
- [21] Breakers, K., Ramaekers, K., Van Nieuwenhuyse, I., 2016. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. Computers & Industrial Engineering, 99, 300–313.
- [22] Brooke A., D. Kendrick, A. Meeraus: "Gams Release 2.25, A User's Guide". GAMS Development Corporation, Washington, USA, 1996.
- [23] Brzeziński M.: Systemy w logistyce. Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa 2007.
- [24] Burkard R., Dell'Amico M., Martello S.: APs Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia 2009.
- [25] Burkard R.E., Rendl F., Lexicographic bottleneck problems, Operations Research Letters 10 (5) (1991) 303–308.
- [26] Buslenko H. P., Kałasznikow W.W., Kowalenko I., U., Teoria systemów złożonych. PWN, Warszawa 1979.
- [27] Cáceres-Cruz J., Riera D., Buil R., Juan A.A., 2013. Applying a savings algorithm for solving a rich vehicle routing problem in a real urban context. Lecture Notes in Management Science vol. 5 p. 84–92.
- [28] Całczyński A.: Metody optymalizacyjne w obsłudze transportowej rynku, PWE, Warszawa 1992.
- [29] Caron G., Hansen P., Jaumard B., The assignment problem with seniority and job priority constraints, Operations Research 47 (3) (1999) 449–454.

- [30] Cattrysse D.G., Van Wassenhove L.N., A survey of algorithms for the generalized assignment problem, *European Journal of Operational Research* 60 (3) (1992) 260–272.
- [31] Cempel Cz.: *Teoria i inżynieria Systemów – zasady i zastosowania myślenia systemowego*. Wydawnictwo Naukowe ITE, Radom 2008.
- [32] Chabrier A.: Vehicle routing problem with elementary shortest path-based column generation, *Computers & Operations Research*, 33(10)/2006, pp. 2972-2990.
- [33] Chang G.J., Ho P.-H., The b-assignment problems, *European Journal of Operational Research* 104 (3) (1998) 593–600.
- [34] Chao I. M., Golden B. L., Wasil E.A. (1998) A New Algorithm for the Site-Dependent Vehicle Routing Problem. In: Woodruff D.L. (eds) *Advances in Computational and Stochastic Optimization, Logic Programming, and Heuristic Search*. Operations Research/Computer Science Interfaces Series, vol 9. Springer, Boston, MA.
- [35] Ciepiela D., Zbierają się czarne chmury nad kołem zamachowym polskiej gospodarki, wnp.pl (dostęp dnia 29.11.2019).
- [36] Ciesielski M. *Rynek usług logistycznych*. Warszawa, Difin: 2005.
- [37] Cigu, E., Agheorghiesei, D.T., Vatamanu, A.F., Toader, E. (2019), Transport Infrastructure Development, Public Performance and Long-Run Economic Growth: A Case Study for the Eu-28 Countries, “Sustainability”, No. 11(1), DOI:10.3390/su11010067.
- [38] Clarke, G., Wright J. W., 1964. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research* vol. 12(4) p.568–581.
- [39] Dantzig G. B., On the Shortest Route through a Network. *Management Science*, Vol. 6, Catonsville 1960.
- [40] Dantzig, G. B., Ramser J. H., 1959. The truck dispatching problem. *Management Science* vol. 6(1) p.80–91.
- [41] Dasgupta S., Papadimitriou C., Vazirani U., *Algorytmy*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [42] Dell’Amico M., Martello S., The k-cardinality assignment problem, *Discrete Applied Mathematics* 76 (1–3) (1997) 103–121.
- [43] DellAmico M., Martello S., Linear assignment, in: M. DellAmico, F. Maffioli, S. Martello (Eds.), *Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 1997.

- [44] Dere E., Durdu A., Usage of the A* Algorithm to Find the Shortest Path in Transportation Systems, Conference: International Conference on Advanced Technologies. Computer Engineering and Science, 2018.
- [45] Desaulniers G., Desrosiers J., Erdmann A., Solomon M.M., Soumis F., 2002. VRP with pickup and delivery, pp. 225–242 in Toth P & Vigo D (Eds.), The vehicle routing problem, SIAM, Philadelphia (PA).
- [46] Desrochers M., Verhoog T.W., 1991. A new heuristic for the fleet size and mix vehicle routing problem. Computers & Operations Research, Vol. 18(3), pp. 263–274.
- [47] Dijkstra E. W., A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik, Vol. 1, Berlin 1959.
- [48] Dorigo M., Gambardella L.M., Ant Colony System: A cooperative learning approach to the Travelling Salesman Problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1, 1997.
- [49] Dramski M., Problemy wyznaczania optymalnej trajektorii obiektu na obszarze ograniczonym, Studia i Materiały Informatyki Stosowanej, Tom 6, nr 17, 2014.
- [50] Drezner Z., A new genetic algorithm for the quadratic assignment problem, INFORMS Journal on Computing 15 (3) (2003) 320–330.
- [51] Duin C.W., Volgenant A., Minimum deviation and balanced optimization: A unified approach, Operations Research Letters 10 (1) (1991) 43–48.
- [52] Dulleart W., Janssens G.K., Sorensen K., Vernimmen B., 2002. New heuristics for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. Journal of the Operational Research Society. Vol. 53(11). pp. 1232–1238.
- [53] ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ttr00005/default/table?lang=en (dostęp dnia 19.10.2023)
- [54] Elshafei A.N., Hospital lay-out as a quadratic assignment problem, Operational Research Quarterly 28 (1) (1977) 167–179.
- [55] encyklopedia.pwn.pl (dostęp 14.04.2021).
- [56] Europejski Semestr - zestawienie informacji tematycznych. Transport., Komisja Europejska, Bruksela 2020.
- [57] Ficoń K., Krasnodębski G., Cztery generacje logistycznych systemów informatycznych, geneza, aplikacje, trendy; Systemy Logistyczne Wojsk, nr 44, Warszawa, 2016.

- [58] Filina-Dawidowicz L., Kotowska I., Mańkowska M., Pluciński M., A method to estimate the demand for freight transport in absence of historical data. A case study of the Oder Waterway, SHS Web of Conferences 58, 01009 (2018).
- [59] Ford Jr. L.R., Fulkerson D.R., Flows in Networks, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1966 (Section II.6).
- [60] Ford L. R., Network Flow Theory. Rand Corporation, Santa Monica 1956.
- [61] Franz L.S., Miller J.L., Scheduling medical residents to rotations: Solving the large-scale multiperiod staff assignment problem, Operations Research 41 (2) (1993) 269–279.
- [62] Fredman M. L., Tarjan R. E., Fibonacci Heaps and Their Uses in Improved Network Optimization Algorithms. 25th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Singer Island 1984.
- [63] GDDKiA, Serwis dla kierowców, Lista utrudnień. <https://www.gddkia.gov.pl/pl/19/lista-utrudnien> (dostęp 08.03.2021).
- [64] Geetha S., Nair K.P.K.: A variation of the AP, European Journal of Operational Research 68 (3) (1993) 422–426.
- [65] Gendreau M., Potvin J., Laporte G.: Vehicle routing: Modern heuristics. In: Local Search in Combinatorial Optimization. John Wiley and sons, pp.311-336, 1997.
- [66] Giosa D., Tansini L., Viera O.: Assignment algorithms for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem. 28 Jornadas de Informática e Investigación Operativa, Buenos Aires, Argentina, September 1999.
- [67] Główny Urząd Statystyczny <https://stat.gov.pl/> (dostęp 24.08.2021).
- [68] Goldberg D. E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowania. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1995.
- [69] Golden B, Assad A, Levy L & Gheysens F, 1984, The fleet size and mix problem, Computers & Operations Research, Vol. 11(1), pp. 49–66.
- [70] Golden B, Levy L, Dahl R. Two generalizations of the traveling salesman problem. Omega; 9(4):439–41, 1981.
- [71] Golden, B.L., Raghavan S., Wasil E. A., eds. 2008. The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. Springer, New York.
- [72] Gortazar, F., A. Duarte, M. Laguna, R. Martí (2010) “Black Box Scatter Search for General Classes of Binary Optimization Problems,” Computers and Operations Research, vol. 37, no. 11, pp. 1977-1986.

- [73] Grygiel G., Algebraic Σk -assignment problems, *Control and Cybernetics* 10 (3&4) (1981) 155–165.
- [74] Gupta S.K., Punnen A.P., Minimum deviation problems, *Operations Research Letters* 7 (4) (1988) 201–204.
- [75] GUS, Grupy przedsiębiorstw w Polsce w 2019 r., Warszawa, 2021.
- [76] Gutenbaum J., Modelowanie matematyczne systemów, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa 2003.
- [77] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_rk320/default/table?lang=en (dostęp 07.05.2021).
- [78] <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/transport;3988780.html> (dostęp 02.02.2022)
- [79] <https://mfiles.pl/pl/index.php/Proces> Encyklopedia Zarządzania (dostęp 28.04.2021).
- [80] <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/transport-i-lacznosc/transport/transport-wyniki-dzialalnosci-w-2022-roku,9,22.html> (dostęp 21.05.2023).
- [81] Iszkowski W., Tadeusiewicz R., Na marginesie dyskusji o sztucznej inteligencji, *Nauka*, 4/2023.
- [82] Izdebski M., Jacyna-Gołda I., Nivette M., Szczepański E., Selection of a fleet of vehicles for tasks based on the statistical characteristics of their operational parameters, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 24/3, 2022.
- [83] Izdebski M., Modelowanie i analiza problemów decyzyjnych przydziału pojazdów do zadań w zagadnieniach transportowych; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2018.
- [84] Jacyna M. (red.), Kształtowanie systemów w wybranych obszarach transportu i logistyki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
- [85] Jacyna M. (red.), System logistyczny Polski, Uwarunkowania techniczno-technologiczne komodalności transportu, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2012.
- [86] Jacyna M., Lewczuk K., Projektowanie systemów logistycznych, PWN, Warszawa, 2016.
- [87] Jacyna M., Modelowanie i ocena systemów transportowych, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2009.
- [88] Jacyna M.: Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej Transport*, z. 47, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.

- [89] Jakubowska A., Piechocka K., W poszukiwaniu optymalnej trasy – wybrane algorytmy w zastosowaniu do problemu komiwojażera. *Journal Of Translogistics* 2015.
- [90] Jasiński L.J.: Optymalizacja dostaw towarów na zaopatrzenie rynku w warunkach niepewności, IRWiK, Warszawa 1987.
- [91] Javaid A., Understanding Dijkstra Algorithm. *SSRN Electronic Journal*, 2013.
- [92] Jedynak Z. Struktura przedsiębiorstw logistycznych. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Śląska* 2015; (z. 82): 89–99.
- [93] Józwiak K., Problematyka doboru pojazdów do zadań w przedsiębiorstwach, *Systemy Logistyczne Wojsk*, nr 50, Warszawa, 2019.
- [94] Józwiak K., Sołoducha P., Concept of improving shipping processes om a selected example, *Motor Transport*, 1(63), Warszawa, 2021.
- [95] Juan A.A., Faulin J., Ruiz R., Barrios B., Caballè S., 2010. The SR-GCWS hybrid algorithm for solving the capacitated vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*. Vol. 10, pp. 215-224.
- [96] K.C. Gilbert, R.B. Hofstra, Multidimensional assignment problems, *Decision Sciences* 19 (2) (1988) 306–321.
- [97] K.C. Gilbert, R.B. Hofstra, R. Bisgrove, An algorithm for a class of three-dimensional assignment problems arising in scheduling operations, *Institute of Industrial Engineers Transactions* 19 (1) (1987) 29–33.
- [98] Kalbarczyk-Guzek E., Józwiak A., Decyzje taktyczne firm w zakresie ustalania warunków dystrybucji towarów, *Systemy Logistyczne Wojsk* , nr 49, Warszawa, 2018.
- [99] Karkula M., Modelowanie i symulacja procesów logistycznych, Wydawnictwo AGH, Kraków, 2013.
- [100] Kennington J., Wang Z., A shortest augmenting path algorithm for the semi-assignment problem, *Operations Research* 40 (1) (1992) 178–187.
- [101] Klaus P., Braki dostępności pojazdów w przewozach całopojazdowych (FTL) w Europie, Uniwersytet Fryderyka i Aleksandra w Erlangen i Norymberdze, Norymberga 2020.
- [102] Klir G.J.: Ogólna teoria systemów. WNT, Warszawa 1976.
- [103] Kłodawski M., Lewczuk K., Jacyna-Golda I., Żak J., Decision making strategies for warehouse operations, *Archives of Transport* 41, Warsaw, 2017.
- [104] Komisja Europejska (2011a), Biała Księga Transportu, Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu, Dyrekcja Generalna ds. Mobilności i Transportu Urząd Publikacji Unii Europejskiej, Bruksela, COM(2011) 144 wersja ostateczna.

- [105] Komisja Europejska (2018), EU Transport in Figures. Statistical Pocketbook 2018, Urząd Publikacji Unii Europejskiej, Luksemburg, https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2018_en (dostęp 04.10.2023).
- [106] Kouvelis P., Yu G., Robust Discrete Optimization and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1997.
- [107] Kozieł G., Algorytmy wyznaczania optymalnej trasy przejazdu. Logistyka – nauka, 3, Poznań 2014.
- [108] Kramer T.: Podstawy marketingu, Polskie Wydaw. Ekonomiczne, Warszawa 2004.
- [109] Łacny J., Systemy telematyczne i informatyczne w nowoczesnych przedsiębiorstwach transportu drogowego. Polski Kongres Logistyczny Logistics 2008 – Nowe wyzwania – nowe rozwiązania, Poznań 2008.
- [110] Laguna M., OptQuest Optimization of Complex Systems, 5/9/2011.
- [111] Laguna, M. and R. Martí (2003) Scatter Search: Methodology and Implementations in C, Kluwer Academic Publishers: Boston, ISBN 1-4020-7376-3.
- [112] Laporte G., 2009. Fifty Years of Vehicle Routing. Transportation Science. Vol. 43(4) p.408-416. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0301>.
- [113] LeBlanc L.J., Shtub A., Anandalingam G., Formulating and solving production planning problems, European Journal of Operational Research 112 (1) (1999) 54–80.
- [114] Lee S.M., Schniederjans M.J.: A multicriteria AP: A goal programming approach, Interfaces 13 (4) (1983) 75–81.
- [115] Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G., 1981. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. Networks, Vol. 11(2), pp. 221–227.
- [116] Łęski J., Systemy neuronowo - rozmyte, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2008.
- [117] Liu F-H., Shen S-Y., 1999. The fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. Journal of the Operational Research Society. Vol. 50(7). pp. 721–732.
- [118] Lonc Z.: Wstęp do algorytmicznej teorii grafów, Centrum Studiów Zaawansowanych, Warszawa 2010.
- [119] Maccaferri L., A* pathfinding search in C# - Part 2. <https://www.leniel.net/2009/06/astar-pathfinding-search-csharp-part-2.html> (dostęp 05.06.2020).
- [120] Malhotra R., Bhatia H.L., Puri M.C., The three-dimensional bottleneck assignment problem and its variants, Optimization 16 (2) (1985) 245–256.

- [121] Martello S., Pulleyblank W.R., Toth P., Werra D., Balanced optimization problems, *Operations Research, Letters* 3 (5) (1984) 275–278.
- [122] Masum A. K. M., Shahjalal M., Faruque Md. F., Sarker Md. I. H., Solving the Vehicle Routing Problem using Genetic Algorithm. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 2, Issue 7, Bradford 2011.
- [123] Mazzola J.B., Neebe A.W., Bottleneck generalized assignment problems, *Engineering Costs and Production Economics* 14 (1) (1988) 61–65.
- [124] Mazzola J.B., Neebe A.W., Resource-constrained assignment scheduling, *Operations Research* 34 (4) (1986) 560–572.
- [125] McConnell J. J., *Analysis of Algorithms: An Active Learning Approach*. Jones and Bartlett Publishers, Sudbury 2001.
- [126] Mehrez A., Yuan Y., Gafni A.: Stable solutions vs. multiplicative utility solutions for the AP, *Operations Research Letters* 7 (3) (1988) 131–139.
- [127] Michalewicz Z., Fogel D., *Jak to rozwiązać, czyli nowoczesna heurystyka*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2006.
- [128] Michłowicz E.: Algorytm ewolucyjny dla problemu komiwojażera z wieloma centrami dystrybucyjnymi, *Logistyka* 2009.
- [129] Michłowicz E.: *Podstawy logistyki przemysłowej*. Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 2002.
- [130] Mindur M., Wzajemne relacje między gospodarką a transportem. *LogForum*, 1, 2005.
- [131] Montoya-Torres J., Franco J., Isaza S., Felizzola H., Herazo-Padilla N., (2014). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 79, pp. 115-129.
- [132] Nałęcz M. (red.), *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2000.
- [133] Nazurczak J.M., Wpływ światowego kryzysu finansowego na gospodarkę Polski i jej regionów, R. Kisiel, M. Wojarksa (red.), *Wybrane aspekty rozwoju regionalnego*, Fundacja „Wspieranie i Promocja Przedsiębiorczości na Warmii i Mazurach”, Olsztyn.
- [134] Nowicki T., Tarapata Z., (red.), *Problemy modelowania i projektowania opartych na wiedzy systemów informatycznych na potrzeby bezpieczeństwa narodowego*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2014.
- [135] Ocetkiewicz K. M., *Algorytmy i struktury danych – Struktury złączalne, zbiory rozłączne – wykład*. https://enauczanie.pg.edu.pl/moodle/pluginfile.php/321126/mod_resource/content/2/a-join.pdf (dostęp 01.11.2020).

- [136] Ostrowski D., Pozniak-Koszalka I., Koszalka L., Kasprzak A., Comparative Analysis of the Algorithms for Pathfinding in GPS Systems. ICN 2015: The Fourteenth International Conference on Networks, Barcelona 2015.
- [137] Owczarek P., Jóźwiak K., Modelowanie neuronowe systemu eksploatacji pojazdów ciężarowych, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, z. 126, Warszawa, 2019.
- [138] Pamuła T., Model predykcji natężenia ruchu pojazdów z użyciem sztucznych sieci neuronowych, *Logistyka*, nr 3, Poznań 2014.
- [139] Paszkowski S.: Podstawy teorii systemów i analizy systemowej. Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa 1999.
- [140] Pentico D., W.: APs: A golden anniversary survey, *European Journal of Operational Research*, Volume 176, Issue 2, 2007, pp. 774-793.
- [141] Pichpibul T., Kawtummachai R., 2012. An Improved Clarke and Wright Savings Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Science Asia* Vol. 38, pp. 307-318.
- [142] Prins C., An overview of scheduling problems arising in satellite communications, *Journal of the Operational, Research Society* 45 (6) (1994) 611–623.
- [143] Pszczołkowski T., Mała encyklopedia prakseologii i teorii organizacji. Wydawnictwo Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk 1978.
- [144] Punnen A.P., Aneja Y.P.: Categorized assignment scheduling: A tabu search approach, *Journal of the Operational Research Society* 44 (7) (1993) 673–679.
- [145] Pyza D., Jachimowski R.: Modelling of parcels' transport system, w: 19th International Conference Transport Means 2015. *Proceedings / Kersys Robertas (red.)*, Transport Means, Kaunas University of Technology 2015.
- [146] Pyza D., Miętus M., Organizacja przewozu ładunków transportem drogowym z uwzględnieniem różnych technologii przewozowych, *Prace naukowe Politechniki Warszawskiej*, z.120 Transport 2018.
- [147] Pyza D., Potencjał systemu przewozowego i jego ocena, *Badania*, nr 12, 2015.
- [148] Rand G.K., 2009. The life and times of the Savings Method for Vehicle Routing Problems. *ORiON*. Vol. 25(2). pp. 125-146. 10.5784/25-2-78.
- [149] Raport o stanie sektora małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce, Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości, Warszawa, 2020.
- [150] Ratajczyk W., Modelowanie sieci transportowych, UAM, Poznań, 1999.
- [151] Ravindran A., Ramaswami V., On the bottleneck assignment problem, *Journal of Optimization Theory and, Applications* 21 (4) (1977) 451–458.

- [152] Rexing B., Barnhart C., Kniker T., Jarrah A., Krishnamurthy N.: Airline Fleet Assignment with Time Windows, Volume 34, Issue 1, pp. 1-20, Transportation Science (2000).
- [153] Rosa G., Usługi Transportowe. Rynek – Konkurencja – Marketing, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin 2006.
- [154] Russell R.: An effective heuristic for the M-tour traveling salesman problem with some side conditions. Oper.Res. 25 517–524, 1977.
- [155] Rutkowski L., Metody i techniki sztucznej inteligencji, Polskie Wydawnictwo Wydawnicze, Warszawa, 2005.
- [156] Rydzkowski W.: Usługi logistyczne – teoria i praktyka, Biblioteka Logistyka, Poznań 2011.
- [157] Rynek usług logistycznych (pod red.): M. Ciesielskiego, Difin, Warszawa 2005.
- [158] Salari M., Toth P., Tramontani A., 2010. An ILP improvement procedure for the Open Vehicle Routing Problem. Computers & Operations Research. Vol. 37(12), pp. 2106–2120. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2010.02.010>.
- [159] Salhi S., Rand G.K., 1993. Incorporating vehicle routing into the vehicle fleet composition problem. European Journal of Operational Research, Vol. 66(3), pp. 313–330.
- [160] Sawicki P., Kiciński M., Fierek Sz., Selection of the most adequate trip-modelling tool for integrated transport planning system, Archives of Transport, Volume 37, Issue 1, 2016.
- [161] Scarelli A., Narula S.C.: A multicriteria AP, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis 11 (2) (2002) 65–74.
- [162] Semenov I., Filina-Dawidowicz L., Trojanowski P., Integrated approach to information analysis for planning the transport of sensitive cargo, Archives of Transport, Volume 51, Issue 3, 2019.
- [163] Serafin E., Systemy informatyczne w logistyce, Logistyka, nr 3, 2014.
- [164] Seshan C.P., Some generalisations of the time minimising assignment problem, Journal of the Operational Research Society 32 (6) (1981) 489–494.
- [165] Shigeno M., Saruwatari Y., Matsui T., An algorithm for fractional assignment problems, Discrete Applied Mathematics 56 (2–3) (1995) 333–343.
- [166] Sienkiewicz P.: Analiza systemowa. Wydawnictwo Bellona, 1994.

- [167] Słotwiński D., Grafowe bazy danych – przegląd technologii. 2010. https://ai.ia.agh.edu.pl/_media/pl:dydaktyka:ztb:2010:projekty:gdb:grafowe_bazy_danych.pdf (dostęp 09.03.2021).
- [168] Słownik języka polskiego, PWN, 2012. (dostęp 25.11.2023).
- [169] Słownik terminologii logistycznej. Biblioteka Logistyka, Poznań 2006. (dostęp 25.11.2023).
- [170] Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych, Wiedza Powszechna, Warszawa 1971.
- [171] Sneyers J., Schrijvers T., Demoen B., Dijkstra's Algorithm with Fibonacci Heaps: An Executable Description in CHR. 20th Workshop on Logic Programming, Wiena, 2006.
- [172] Soczówka P., Żochowska R., Karoń G., Method of the Analysis of the Connectivity of Road and Street Network in Terms of Division of the City Area, *Computation* 2020, 8, 54; doi:10.3390/computation8020054.
- [173] Sokkalingam P.T., Aneja Y.P., Lexicographic bottleneck combinatorial problems, *Operations Research Letters* 23 (1) (1998) 27–33.
- [174] Solomon, M.M. (1986), On the Worst-Case Performance of Some Heuristics for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window Constraints, *Networks*, Vol. 16, pp. 161–174.
- [175] Solomon, M.M. (1987), Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints, *Operations Research* Vol. 35, pp. 254–265.
- [176] Solomon, M.M., Baker E.K., Schaffer J.R. 1988. Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints: Efficient Implementations of Solution Improvement Procedures, in *Vehicle Routing: Methods and Studies*, B. Golden and A. Assad (eds), pp. 85–106, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- [177] Solomon, M.M., Desrosiers J., 1988. Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems, *Transportation Science* Vol. 22, pp. 1–13.
- [178] Świdorski A., Jóźwiak A., Algorytmy sztucznej inteligencji w logistyce, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, z. 117, Warszawa 2017.
- [179] Świdorski A., Jóźwiak A., Jachimowski R. Eksploatacyjne miary jakości pojazdów w zastosowaniu do oceny usług transportowych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20 (2): 292–299.
- [180] Świdorski A., Modelowanie oceny jakości usług transportowych, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Transport* 81, Warszawa 2011.

- [181] Świdorski A., Neural modelling of process risk estimation in quality management. Polish Journal of Commodity Science nr 4 (17), Radom 2008.
- [182] Tadeusiewicz R., Szaleniec M., Leksykon sieci neuronowych, Wydawnictwo Funkdacji „Projekt nauka”, Wrocław 2015.
- [183] Taillard E., Laporte G., Gendreau M., 1996. Vehicle Routing with Multiple Use of Vehicles. The Journal of the Operational Research Society. Vol. 47(8), pp. 1065-1070.
- [184] Thorup M., Integer priority queues with decrease key in constant time and the single source shortest paths problem. Journal of Computer and System Sciences, Vol. 69, Amsterdam 2004.
- [185] Tillman F.A., 1969. The Multiple Terminal Delivery Problem with Probabilistic Demands. Transportation Science. Vol. 3(3) p. 183-275.
- [186] Topolski M., Planowanie optymalnej trasy przejazdu transportu samochodowego z wykorzystaniem miękkich metod obliczeniowych. Autobusy, 6, Radom 2016.
- [187] Toth P, Vigo D. eds. 2014. Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications. Philadelphia: SIAM. 2nd ed.
- [188] Toth, P., D. Vigo, eds. 2002. The Vehicle Routing Problem. SIAM. Monographs on Discrete Mathematics and Applications. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.
- [189] Transport – wyniki działalności w 2020 r., GUS, Warszawa, 2021 (dostęp 05.06.2022).
- [190] Transport drogowy w Polsce 2021+, SpotData, Związek Pracodawców Transport i Logistyka Polska, Warszawa, marzec 2022.
- [191] Transport inkluzyny – rola polityki transportowej w kształtowaniu zrównoważonego rozwoju kraju, Policy Paper 6/2019, Polski Instytut Ekonomiczny; Warszawa, 2019.
- [192] Trojanowski P., Analiza SWOT narzędzi do wyznaczania tras na przykładzie drogowego transportu chłodniczego w województwie zachodniopomorskim. Logistyka – nauka, 4, Poznań 2015.
- [193] Trojanowski P., Analiza użyteczności algorytmów do wyznaczania tras w transporcie drogowym ładunków wrażliwych. Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, 108, Warszawa 2015.
- [194] Vidal T., Crainic T.G., Gendreau M., Prins Ch., 2012. Heuristics for Multi Attribute Vehicle Routing Problem: A Survey and Synthesis. CIRRELT-2012-05.
- [195] Vigo D., 1996. A heuristic algorithm for asymmetric capacities Vehicle routing problem. European Journal of Operational Research. Vol. 89, pp. 108-126.

- [196] Volgenant A., A note on the assignment problem with seniority and job priority constraints, *European Journal of Operational Research* 154 (1) (2004) 330–335.
- [197] Volgenant A., Linear and semi-assignment problems: A core-oriented approach, *Computers & Operations Research* 23 (10) (1996) 917–932.
- [198] Volgenant A.: Solving some lexicographic multi-objective combinatorial problems, *European Journal of Operational Research* 139 (3) (2002) 578–584.
- [199] Wasiak M., Jacyna-Golda I., *Transport drogowy w łańcuchach dostaw, wyznaczanie kosztów*, Wyd. PWN., Warszawa, 2016.
- [200] Wasiak M.: *Modelowanie przepływu ładunków w zastosowaniu do wyznaczania potencjału systemów logistycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe Transport, z.79, Warszawa 2011.
- [201] Waśniewski R.T, Żak J., Świdorski J., Jóźwiak K. , *Problematyka planowania transportu ładunków niebezpiecznych z wykorzystaniem narzędzi symulacyjnych*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, z. 124, Warszawa, 2019.
- [202] Wassan N. A., 2016. Meta-heuristics for the multiple trip vehicle routing problem with backhauls. Doctor of Philosophy (PhD) thesis, University of Kent.
- [203] Wojciechowski Ł, Cisowski T., Grzegorzczak P., *Metody zarządzania flot samochodów w firmie, Autobusy*, 6/2010.
- [204] Woźniak M., Marszałek Z., Gabryel M, Nowicki R. K., Preprocessing Large Data Sets by the Use of Quick Sort Algorithm. *Advances in Intelligent Systems and Computing – KICSS*, 364, 2016.
- [205] Yihan LIU 2017. Optimization of Vehicle Routing Problem for Field Service, PhD Thesis, École centrale de Lille, France.
- [206] Yuan Y., Mehrez A., Gafni A., Reducing bias in a personnel assignment process via multiplicative utility solution, *Management Science* 38 (2) (1992) 227–239.
- [207] Yusoff M., Ariffin J., Mohamed A.: Solving Vehicle AP Using Evolutionary Computation, *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 6145/2010.
- [208] Żochowska R., Kłos J.M., Soczówka P., Pilch M., Assessment of accessibility of public transport by using temporal and spatial analysis, *Sustainability* 2022, 14, 16127.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Część PKB generowana przy krytycznym, istotnym, umiarkowanym lub niskim udziale transportu drogowego towarów	15
Rys. 2. Schemat graficzny modelu wahadłowego organizacji przewozu	31
Rys. 3. Schemat graficzny modelu wahadłowo-ciągłego organizacji przewozu	32
Rys. 4. Schemat graficzny modelu promienisto-gwieździstego organizacji przewozu	32
Rys. 5. Schemat graficzny modelu obwodowego organizacji przewozu	33
Rys. 6. Schemat graficzny modelu sztafetowego organizacji przewozu	33
Rys. 7. Warianty CVRP	37
Rys. 8. Podział użyteczności algorytmów ze względu na stopień skomplikowania zależności występujących przy planowaniu tras	38
Rys. 9. Odwzorowanie za pomocą grafu sieci transportowej na przykładzie sieci drogowej Rumunii.....	39
Rys. 10. Mapa sztucznej inteligencji.....	45
Rys. 11. Model neuronu	45
Rys. 12. Procedura konstruowania modelu	50
Rys. 13. Model procesu doboru pojazdów	75
Rys. 14. Metoda wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych	95
Rys. 15. Wybór rodzaju analizy do uczenia sieci neuronowej.....	100
Rys. 16. Wybór parametrów sieci neuronowej	100
Rys. 17. Wykres uczenia się sieci neuronowej MLP 14-34-14	102
Rys. 18. Wykres rozrzutu zmiennej zależnej sieci neuronowej MLP 14-34-14.....	102
Rys. 19. Przykładowe zastosowanie języka C++ w programie FlexSim	104
Rys. 20. Okno startowe programu FlexSim	104
Rys. 21. Obszar roboczy programu FlexSim	105
Rys. 22. Widok mapy i panelu konfiguracyjnego metody wspomagania doboru pojazdów do zadań transportowych	106
Rys. 23. Wycinek panelu konfiguracyjnego z wyborem kryteriów pierwszeństwa realizacji zleceń transportowych.....	107
Rys. 24. Wycinek panelu konfiguracyjnego z wyborem rodzaju trybu realizacji zleceń transportowych.....	108

Rys. 25. Wycinek panelu konfiguracyjnego z możliwością zdefiniowania zasobów transportowych.....	109
Rys. 26. Wycinek panelu konfiguracyjnego ze szczegółami dotyczącymi zleceń transportowych.....	110
Rys. 27. Wycinek „procesu flow” dla opracowanej metody	111
Rys. 28. Przykładowy raport wyjściowy z opracowanego modelu symulacyjnego	113
Rys. 29. Lokalizacja magazynów centralnych i punktów odbioru badanego przedsiębiorstwa logistycznego	115
Rys. 30. Wycinek raportu wyjściowego dla zadania transportowego nr 1	120
Rys. 31. Trasy 3 wybranych pojazdów zadania transportowego nr 1	121
Rys. 32. Wycinek raportu wyjściowego dla zadania transportowego nr 2	122
Rys. 33. Zrealizowane trasy przez pojazd 24-tonowy nr 4 dla symulacji realizacji zadania transportowego nr 2	123
Rys. 34. Czas trwania procesu dla poszczególnych kryteriów realizacji zad. trans. nr 1 – pojazdy 8 tonowe	124
Rys. 35. Suma zrealizowanego dystansu jazdy wszystkich pojazdów dla poszczególnych kryteriów realizacji zad. trans. nr 1 – pojazdy 8 tonowe	124
Rys. 36. Współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej pojazdów dla poszczególnych kryteriów realizacji zad. trans. nr 1 – pojazdy 8 tonowe.....	125
Rys. 37. Czas realizacji zad. trans. nr 1 z wykorzystaniem pojazdów 24-tonowych.....	126
Rys. 38. Zestawienie kosztów realizacji zad. trans. nr 1 przez pojazdy 24-tonowe	126
Rys. 39. Zestawienie kosztów realizacji zad. trans. nr 2 przez różną liczbę pojazdów różnego typu.....	127
Rys. 40. Współczynnik wykorzystania przestrzeni ładunkowej poszczególnych typów pojazdów i ich liczby dla zad. trans. nr 2.....	128
Rys. 41. Suma zrealizowanego dystansu dla doboru różnej liczby i typu pojazdów zad. trans. nr 2.....	129
Rys. 42. Czas realizacji zad. trans. nr 2 z wykorzystaniem różnej liczby i typu pojazdów...	129
Rys. 43. Liczba załadunków pojazdów 24-tonowych dla zad. trans. nr 1	130
Rys. 44. Zestawienie współczynnika wykorzystania przestrzeni ładunkowej pojazdów w zadaniu transportowym nr 2.....	131
Rys. 45. Zestawienie średniej liczby załadunku pojazdów w zadaniu transportowym nr 2..	132
Rys. 46. Zestawienie sumy zrealizowanego dystansu pojazdów w zadaniu transportowym nr 2 wszystkich symulacji.....	133

SPIS WYKRESÓW

Wyk. 1.	Transport drogowy towarów w Polsce w latach 2011-2022	17
Wyk. 2.	Przedsiębiorstwa działające w branży transportu drogowego według wielkości zatrudnienia w Polsce w 2021	17
Wyk. 3.	Procentowa zmiana liczby przedsiębiorstw działających w branży transportu drogowego w 2021	18
Wyk. 4.	Udział polskich przewoźników drogowych w pracy przewozowej (t-km) w UE.	18
Wyk. 5.	Udział Polski w przewozach międzynarodowych przewoźników UE w wybranych krajach (t-km)	19
Wyk. 6.	Struktura światowego eksportu mebli w 2021 r.	23
Wyk. 7.	Handel zagraniczny produktami meblarskimi w Polsce (mln EUR)	23
Wyk. 8.	Struktura polskiego eksportu mebli.....	24
Wyk. 9.	Struktury systemów transportowych: a) jednostopniowy, b) systemy wielostopniowe, c) systemy kombinowane	27
Wyk. 10.	Porównanie szybkości działania algorytmów dokładnych w zależności od liczby krawędzi w sieci	40

SPIS TABEL

Tabela 1.	Procentowy udział poszczególnych gałęzi transportu w Polsce w latach 2010-2022	16
Tabela 2.	Klasyfikacja problemu przydziału ze względu na kryterium liczby zadań	54
Tabela 3.	Przykładowe dane wejściowe do modelowania neuronowego – dane historyczne wielkości popytu w ujęciu tygodniowym	99
Tabela 4.	Przykładowe wyniki procesu uczenia sieci neuronowej	101
Tabela 5.	Odległości między punktami sieci połączeń [km].....	107
Tabela 6.	Sposoby realizacji zadań transportowych.....	108
Tabela 7.	Zestawienie przykładowej liczby i typów pojazdów wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji	109
Tabela 8.	Przykładowe zestawienie zleceń transportowych wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji	110
Tabela 9.	Wykaz punktów odbioru i wielkość ładunków w zadaniu transportowym nr 1 [t]	116
Tabela 10.	Wykaz punktów odbioru i wielkość ładunków w zadaniu transportowym nr 2 [t]	117
Tabela 11.	Stawki kosztowe wykorzystane do przeprowadzenia analizy doboru pojazdów do zadań transportowych	118
Tabela 12.	Wykaz numerów rejestracyjnych pojazdów w zadaniach transportowych	119
Tabela 13.	Zestawienie parametrów zadań transportowych wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji	119