

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA INŻYNIERIA LĄDOWA I TRANSPORT

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Marek LIKOS

**Model przemieszczania wyposażenia wojsk
w ustalonych relacjach przegrupowania wojsk lądowych**

Promotor:

dr hab. inż. Mariusz KOSTRZEWSKI, prof. uczelni

WARSZAWA 2022

Streszczenie

Tytuł rozprawy: Model przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania wojsk lądowych

Opracowanie modelu przemieszczania wyposażenia sił zbrojnych (w szczególności wojsk lądowych) w określonych relacjach przegrupowania tych sił, a przy tym rozważenie przyjętej w pracy tezy, było zasadniczym celem przeprowadzonych w rozprawie badań. Wobec realizacji takiego celu opracowano zadanie optymalizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w relacji przegrupowania wzdłuż alternatywnych dróg w badanej sieci transportowej dla kryterium równych kosztów średnich, kryterium równych kosztów zewnętrznych oraz kryterium czasu przemieszczania. Zadanie to jest traktowane jako model decyzyjny.

W rozprawie zastosowano następujące podejście. W pierwszej części rozprawy dokonano analizy stosowanych pojęć oraz krytycznej analizy literatury dostępnej zarówno w opracowaniach polskich, jak i zagranicznych. Analiza literatury została dokonana w zakresie trzech obszarów: przedstawienie wybranych zasad przemieszczania wyposażenia wojsk w kontekście zabezpieczenia logistycznego, kwestie wyboru dróg alternatywnych oraz metody i narzędzia wykorzystywane w pracach badawczych zbliżonych tematycznie do rozprawy doktorskiej. Na podstawie przedstawionej analizy literatury zdefiniowano lukę badawczą dotyczącą opracowania modelu oraz dokonano jego implementacji w postaci narzędzia decyzyjnego opracowanego z zastosowaniem metod symulacyjnych.

Model decyzyjny, przedstawiony w rozdziale 3., został opracowany z wykorzystaniem metod programowania matematycznego. Dla opracowanego modelu decyzyjnego ustalono dane służące do skonstruowania modelu, w tym charakterystyki dróg, charakterystyki wyposażenia wojsk lądowych i środków transportu służących wsparciem w zakresie przemieszczania wyposażenia po drogach. Ponadto ustalono zmienne decyzyjne, ograniczenia na nie nakładane oraz funkcje kryterium.

Implementację modelu decyzyjnego do postaci modelu symulacyjnego, przedstawiono w rozdziale 4. Założeniem modelowania z wykorzystaniem metod symulacyjnych jest możliwość przeprowadzania analiz scenariuszowych typu *what-if*, a zatem model symulacyjny został opracowany w wielu wariantach (alternatywne drogi), które zostały skomentowane i porównane. Ze względu na trzy różne kryteria optymalizacyjne zastosowane w modelu decyzyjnym i symulacyjnym, do oceny wariantów zastosowano metody optymalizacji wielokryterialnej.

Praca zakończona została podsumowaniem wraz ze wskazaniem wartości teoretycznych, utylitarnych, a przy tym także dalszych możliwości badawczych w zakresie rozpatrywanego zagadnienia.

Słowa kluczowe: przemieszczanie wyposażenia wojsk, model analityczny, model symulacyjny, optymalizacja wielokryterialna

Abstract

Title of the Ph.D. thesis: Model of movement of military equipment in fixed regrouping relations of ground military forces

The development of a model for the equipment movement of the armed forces (especially land forces) in specific regrouping relations of these forces, and at the same time the consideration of the thesis adopted, was the main objective of the research conducted in the Ph.D. thesis. In view of the realisation of such a goal, the optimisation task of the land forces' equipment movement in regrouping relations along alternative routes in the examined transport network was developed for the criterion of equal average costs, the criterion of equal external costs and the criterion of movement time. This task is treated as a decision-making model.

The dissertation uses the following approach. In the first part of the dissertation, a detailed analysis of the concepts used was made and a critical analysis of the literature available in both Polish and foreign research was carried out. The literature analysis was conducted in three areas: presentation of selected principles of moving military equipment in the context of logistic demands, issues of alternative routes selection and methods and tools used in research similar in theme to the dissertation. Based on the presented literature analysis, a research gap was defined concerning the development of a decision-making model and its implementation in the form of a decision-making tool developed with the use of simulation methods.

The decision model, presented in Chapter 3, was developed using mathematical programming methods. For the developed decision model, the data applied to construct the model were established, including the characteristics of roads, the characteristics of army equipment and the means of transport to support the movement of equipment on roads. In addition, the decision variables, the constraints imposed on them, and the criterion functions were established.

The implementation of the decision model into a simulation model, is presented in Chapter 4. The assumption of modelling with simulation methods is that *what-if* scenario analyses can be carried out, and therefore the simulation model was developed with multiple options (alternative routes), which were commented on and compared. Due to the three different optimisation criteria used in the decision and simulation model, multi-criteria optimisation methods were used to evaluate the alternatives.

The paper concludes with a summary along with an indication of the theoretical, utilitarian values and at the same time further research opportunities in the considered issue.

Keywords: military movement, analytical model, simulation model, multi-criteria optimization

Spis treści

STRESZCZENIE	3
ABSTRACT	4
SPIS TREŚCI.....	5
WPROWADZENIE	13
1. ZDEFINIOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO W LITERATURZE	17
1.1. WYBRANE ZASADY PRZEMIESZCZANIA WYPOSAŻENIA WOJSK W KONTEKŚCIE ZABEZPIECZENIA LOGISTYCZNEGO	17
1.2. WYBRANE ZAGADNIENIA W ZAKRESIE WYBORU DRÓG ALTERNATYWNYCH	25
1.3. METODY I NARZĘDZIA DECYZYJNE STOSOWANE W BADANIACH NAUKOWYCH	29
2. CEL, ZAKRES ORAZ TEZA PRACY	33
3. SFORMUŁOWANIE MODELU DECYZYJNEGO PRZEMIESZCZANIA WYPOSAŻENIA WOJSK W USTALONYCH RELACJACH PRZEGRUPOWANIA 37	
3.1. ZDEFINIOWANIE STRUKTURY SIECI TRANSPORTOWEJ STOSOWANEJ W MODELU DECYZYJNYM I INNE ZAŁOŻENIA OGÓLNE.....	37
3.2. OKREŚLENIE ZMIENNYCH DECYZYJNYCH	48
3.3. OKREŚLENIE OGRANICZEŃ W MODELU DECYZYJNYM	52
3.4. KRYTERIA OPTYMALIZACYJNE W MODELU DECYZYJNYM	56
3.4.1. <i>Założenia ogólne i charakterystyka kryteriów optymalizacji</i>	56
3.4.2. <i>Kryterium kosztów średnich</i>	66
3.4.3. <i>Kryterium kosztów zewnętrznych</i>	72
3.4.4. <i>Kryterium czasu przemieszczania jako kosztu</i>	88
3.5. OPTYMALIZACJA WIELOKRYTERIALNA	91
4. IMPLEMENTACJA KOMPUTEROWA MODELU DECYZYJNEGO	100
4.1. BUDOWA MODELU SYMULACYJNEGO	100
4.2. IMPLEMENTACJA WARIANTU 1 MODELU DECYZYJNEGO W OPROGRAMOWANIU	106
4.3. IMPLEMENTACJA WARIANTU 2 MODELU DECYZYJNEGO W OPROGRAMOWANIU	112
4.4. IMPLEMENTACJA WARIANTU 3 MODELU DECYZYJNEGO W OPROGRAMOWANIU	117
4.5. WIELOKRYTERIALNA OCENA WARIANTÓW MODELU DECYZYJNEGO	119
PODSUMOWANIE.....	122
BIBLIOGRAFIA	131

Zestawienie wybranych oznaczeń, symboli i skrótów

21 BSP	– 21 Brygada Strzelców Podhalańskich
$\left(\frac{Q}{C}\right)_i$	– współczynnik określający stosunek krytycznego natężenia ruchu do przepustowości dla danego poziomu swobody ruchu, ukształtowania drogi i terenu (współczynnik uwzględniający warunki ruchu)
$\alpha(a(n), b(n))$	– liczba środków transportu, która będzie podlegać przegrupowaniu
ΔQ	– niewielkie zmiany w godzinowym ruchu drogowym
φ	– wielkość ładunków (liczność osób) przemieszczanego w relacji przegrupowania (a, b) , p -tą drogą zawierającą łuk (i, j) w r -tym wariantcie alternatywnego przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych: $\varphi(x((a, b), p, (i, j), r)) \in \mathfrak{R}$
\varkappa	– kąt zwrotu kierunków trasy
τ_s	– czas średni konieczny na pokonanie drogi przez przeciętny pojazd
τ_m	– czas minimalny konieczny na pokonanie drogi
A	– zbiór numerów źródeł ładunków (osób) w modelu przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania
a	– wierzchołek stanowiący początek przegrupowania
ADT	– średniodobowy ruch
B	– zbiór numerów ujść ładunków (osób) w modelu przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania
b	– wierzchołek stanowiący koniec przegrupowania
C_o	– przepustowość jednego pasa ruchu w warunkach idealnych
$CBDT$	– Centralna Baza Danych o Transporcie
CGF	– ang. <i>Computer Generated Forces</i> (pl. siły wytworzone komputerowo)
$c((i, j), m) \in \mathfrak{R}^+$	– parametr o interpretacji kosztu przemieszczania się po połączeniu drogowym lub kolejowym o numerze m , łączącym miejscowości o numerach i oraz j (stosowana będzie notacja $c((i, j), m) \equiv c(i, m, j) \equiv c(i, j)$ przy zachowaniu wcześniej ustalonej interpretacji)
$c(k)$	– względną ważność (stopień ważności, istotność danego kryterium nad innymi) k -tego kryterium cząstkowego
$c(r)^{p, ab}$	– koszt przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób), p -tą drogą w r -tej relacji przegrupowania (a, b)

- $c(r)_{ij}^{p,ab}$ – średni koszt przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób), po tym m -tym łuku pomiędzy wierzchołkami (i, j) , należącym do p -tej drogi w r -tej relacji przegrupowania (a, b) , przy założeniu, że po tym łuku przemieszczane jest wyposażenie wojsk (ładunków, osób) o wielkości $x(r)_{ij,m}^{p,ab}$
- $d((i, j), m) \in \mathfrak{R}^+$ – parametr o interpretacji przepustowości w przypadku połączenia drogowego (łuku) o numerze m , łączącym miejscowości o numerach i oraz j (stosowana będzie notacja $d((i, j), m) \equiv d(i, m, j) \equiv d(i, j)$ przy zachowaniu wcześniej ustalonej interpretacji)
- D** – zbiór decyzji dopuszczalnych określonych za pomocą ograniczeń
- dr – liczba dni w roku, w których odbywa się przemieszczanie wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania
- E** – zbiór par relacji przewozu ładunków w danej sieci transportowej
- ECU – ang. *European Currency Unit* (pl. europejska jednostka monetarna)
- EF_{ik} – czynnik emisji zanieczyszczeń k -tego typu i pojazdu i -tej klasy
- F** – zbiór kryteriów cząstkowych, względem których przeprowadzona będzie ocena różnych wariantów; globalna funkcja kryterium (złożona z wielu kryteriów cząstkowych); zbiór funkcji określonych na łukach grafu struktury $([c_{ij}], [d_{ij}], [z_{ij}], [t_{ij}], [x^{ab}])$
- $F(\mathbf{XL})$ – funkcja kryterium kosztów średnich
- $F_2(\mathbf{XL})$ – funkcja kryterium kosztów zewnętrznych
- $F_3(\mathbf{XL})$ – funkcja kryterium czasu przemieszczenia
- $F_1(X(r))$ – kryterium cząstkowe oceny modelu przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania $X(r)$ w każdym wariancie w , w przypadku kosztów średnich
- $F_2(X(r))$ – kryterium cząstkowe oceny modelu przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania $X(r)$ w każdym wariancie w , w przypadku kosztów zewnętrznych
- $F_3(X(r))$ – kryterium cząstkowe oceny modelu przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania $X(r)$ w każdym wariancie w , w przypadku czasu przebiegu przegrupowania
- f_c – współczynnik uwzględniający strukturę rodzajową pojazdów
- f_k – współczynnik struktury kierunkowej (czyli wpływu kierunkowego rozkładu przemieszczania wyposażenia wojsk: ładunków, osób)
- $f_k(i, j) \equiv f_{ij}^k$ – to k -ta funkcja określona na łuku (i, j) , o ustalonej interpretacji wartości tej funkcji (charakterystyka $f_1(i, j)$ odpowiada przepustowości, $f_2(i, j)$ – jednostkowemu kosztowi przejścia przez ten łuk, a $f_3(i, j)$ – zewnętrznemu kosztowi przejścia przez ten łuk)

$f_p(i, j)$	– współczynnik łącznego wpływu szerokości pasów ruchu i poboczy w zakresie połączenia drogowego łączącego miejscowości o numerach i oraz j
$f_s(x)$	– kryterium cząstkowe
f_{zd}	– współczynnik uwzględniający skład populacji kierowców korzystających z drogi (zwany inaczej współczynnikiem znajomości drogi)
G	– sieć drogowa; graf struktury korytarza transportowego $G = \langle W, L \rangle$
GIS	– ang. <i>Geographic Information System</i> (pl. System Informacji Geograficznej)
IDC	– koszt rozwoju infrastruktury objęty już opłatą
JTLS	– ang. <i>Joint Theater Level Simulation</i> (pl. symulacja na poziomie teatru wojny)
K	– liczba różnych funkcji (o różnej interpretacji) określonych na zbiorze łuków grafu
k	– liczba kierunków ruchu pojazdów
$K(r)^{p,ab}$	– koszt całkowity realizacji przemieszczenia w r -tej relacji (a, b)
$K(r)_{ij}^{p,ab}$	– całkowity koszt przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania o wielkości $x(r)_{ij,m}^{p,ab}$ p -tą drogą w relacji (a, b) , pomiędzy wierzchołkami (i, j) dla r -tego wariantu rozłożenia
l_{pu}	– liczba pojazdów umownych na wagonie
l_w	– liczba wagonów w składzie
M	– zbiór numerów łuków sieci transportowej
m	– parametr wyrażający numer łuku sieci transportowej
MCOO	– ang. <i>modified combined obstacle overlay</i> (pl. zmodyfikowana nakładka na przeszkody)
$MEC(Q)$	– krańcowy koszt zewnętrzny zatłoczenia
n	– współczynnik korygujący dla nocy
NC_{drpz}	– koszt hałasu na osobę narażoną na drodze typu dr na poziom hałasu pz
$n(i, j)$	– liczba pasów ruchu jednej jezdni w zakresie połączenia drogowego łączącego miejscowości o numerach i oraz j
P	– zbiór dróg wiążących początek relacji przewozu z jej końcem
$P(a, b)$	– zbiór numerów dróg między wyróżnionymi wierzchołkami a oraz b (drogi numerowane będą przy uwzględnieniu zmiennej p)

PC_{dk}	– pieniężny koszt zanieczyszczenia k -tego typu na drodze typu dr
POP_{pz}	– liczba ludności narażonej na dzienny poziom hałasu p na kilometr na podstawie tzw. strategicznych map hałasu
PSR	– poziom swobody ruchu
Q	– średniogodzinowy ruch drogowy
Q_0	– optymalny godzinowy ruch drogowy
$Q_k^p(i, j)$	– roczna wielkość modelu przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania, wyrażona w pojazdach umownych dla połączenia szynowego łączącego miejscowości o numerach i oraz j
$Q_{ki}(i, j)$	– przepustowość dróg dwupasmowych dwukierunkowych dla połączenia drogowego łączącego miejscowości o numerach i oraz j
$Q_{ki}^w(i, j)$	– przepustowość dróg wielopasmowych dla połączenia drogowego łączącego miejscowości o numerach i oraz j
R	– promień krzywizny poziomej
S	– uporządkowana para (G, F) odwzorowująca charakterystyki modelu przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania
$t((i, j), m)$	– parametr o interpretacji czasu przemieszczenia w przypadku połączenia drogowego (łuku) o numerze m , łączącym miejscowości o numerach i oraz j (stosowana będzie notacja $t((i, j), m) \equiv t(i, m, j) \equiv t(i, j)$ przy zachowaniu wcześniej ustalonej interpretacji)
W	– zbiór numerów wierzchołków (węzłów) sieci transportowej
w	– parametr wyrażający numer wierzchołka (węzła) sieci transportowej
WR	– zbiór numerów wariantów alternatywnego przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania w sieci transportowej; zbiór relacji przegrupowania
WR	– liczba wariantów alternatywnego przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania
wr	– zmienna określająca warianty alternatywnego modelu przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania w sieci transportowej
w_{pso}	– średnie zapelnienie dla ruchu pasażerskiego w przypadku samochodów osobowych
w_{sc}	– współczynnik przeliczeniowy pojazdów rzeczywistych na pojazdy umowne dla pojazdów typu samochody ciężarowe bez przyczepy
w_{scp}	– współczynnik przeliczeniowy pojazdów rzeczywistych na pojazdy umowne dla pojazdów typu samochody ciężarowe z przyczepą

w_{sda}	– współczynnik przeliczeniowy pojazdów rzeczywistych na pojazdy umowne dla pojazdów typu samochody dostawcze i autobusy
w_{som}	– współczynnik przeliczeniowy pojazdów rzeczywistych na pojazdy umowne dla pojazdów typu samochody osobowe
V	– zbiór numerów węzłów pośrednich
v	– wierzchołek stanowiący węzeł pośredni przegrupowania
$v(Q)$	– średnia prędkość ruchu drogowego
X	– zbiór wariantów alternatywnego przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania w sieci transportowej
x	– wektor zmiennych decyzyjnych
XL	– zbiór o elementach postaci $x_{ij,m}^{p,ab}$ będących wielkościami w modelu przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób), w ustalonych relacjach przegrupowania, po m -tym łuku pomiędzy wierzchołkami (i, j) , należącym do p -tej drogi w relacji przegrupowania (a, b) (w części obliczeniowej pracy pominięto oznaczenie m jako identyfikowalne na podstawie (i, j))
XL^*	– rozwiązanie dopuszczalne spełniające ograniczenia nakładane na przemieszczanie wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania w przypadku kryterium kosztów średnich
XL_z^*	– rozwiązanie dopuszczalne spełniające ograniczenia nakładane na przemieszczanie wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania w przypadku kryterium kosztów zewnętrznych
XL_t^*	– rozwiązanie dopuszczalne spełniające ograniczenia nakładane na przemieszczanie wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania w przypadku kryterium czasu
XLR	– zbiór o elementach postaci $x(r)_{ij,m}^{p,ab}$ dla r -tego wariantu rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania
$X(r)$	– macierz rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w ustalonych relacjach przegrupowania dla r -tego wariantu
$x_{ij,m}^{p,ab}$	– element zbioru XL
$x(wr)^{p,ab}$	– wielkość potrzeb przemieszczanie wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w r -tej relacji (a, b)
$x(wr)_{ij,m}^{p,ab}$	– wielkość wyposażenia wojsk (ładunków, osób) przemieszczanego p -tą drogą w relacji (a, b) , zawierającą po tym m -tym łuku pomiędzy wierzchołkami (i, j) dla r -tego wariantu rozłożenia

- $z((i, j), m)$ – parametr o interpretacji kosztu zewnętrznego dla połączenia drogowego lub kolejowego o numerze m , łączącym miejscowości o numerach i oraz j (stosowana będzie notacja $z((i, j), m) \equiv z(i, m, j) \equiv z(i, j)$ przy zachowaniu wcześniej ustalonej interpretacji)
- $z^{r,ab}(\mathbf{XL})$ – wartość kosztów zewnętrznych dla wyposażenia wojsk (ładunków, osób) przemieszczanych r -tą drogą w relacji (a, b)
- $z^{r',ab}(\mathbf{XL})$ – wartość kosztów zewnętrznych dla wielkości wyposażenia wojsk (ładunków, osób), przemieszczanego r' -tą drogą w relacji (a, b)
- $z_{zp,i,dr}^{r,ab}(\mathbf{XL})$ – koszt zanieczyszczenia powietrza przez pojazd i -tej klasy i na drodze typu dr dla wyposażenia wojsk (ładunków, osób), przemieszczanego r -tą drogą w relacji (a, b)
- $z_{h,i,dr}^{r,ab}(\mathbf{XL})$ – koszt hałasu powodowanego w porze dziennej przez pojazd i -tej klasy i na drodze typu dr dla wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) r -tą drogą w relacji (a, b)
- $z_{h,i,dr,\Theta}^{r,ab}(\mathbf{XL})$ – koszt hałasu powodowanego w porze nocnej przez pojazd i -tej klasy i na drodze typu dr dla wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób) r -tą drogą w relacji (a, b)
- $z_{k,i,dr}^{r,ab}(\mathbf{XL})$ – należny koszt zatłoczenia

Wprowadzenie

Przemieszczanie wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania jest niezwykle istotnym zagadnieniem z punktu widzenia funkcjonowania sił zbrojnych. W rozprawie doktorskiej tematyka ta została rozpatrzona z punktu widzenia wojsk lądowych.

Wobec analizy problemu badawczego istotne są trzy podstawowe pojęcia, wobec których autor będzie odnosił się w treści całej rozprawy, w związku z czym warto już we wstępie przedstawić ich znaczenie (w dalszej części rozprawy tematyka i pojęcia te zostaną przedstawione w bardziej rozszerzonym zakresie). Dotyczy to następujących terminów: wyposażenie wojsk, przemieszczenie wojsk i przegrupowanie wojsk.

Pod pojęciem wyposażenia wojsk w rozprawie rozumiany jest ogół koniecznych dla realizacji zadań przegrupowania systemów uzbrojenia i sprzętu wojskowego (gdzie przez uzbrojenie i sprzęt wojskowy należy rozumieć „techniczne środki walki, sprzęt techniczny oraz wyposażenie i środki materiałowe, w tym oprogramowanie i usługi, specjalnie zaprojektowane i wykonane do celów wojskowych tj. na podstawie odpowiednich specyfikacji technicznych”, Hamroza 2006). Poza systemami uzbrojenia i sprzętem wojskowym, do wyposażenia wojsk zaliczono w rozprawie niezbędne zasoby ludzkie, w tym żołnierzy sił zbrojnych, personel medyczny oraz wszelkie dobra pozwalające na funkcjonowanie wojska bez zakłóceń (w tym np. pożywienie, lekarstwa itp.). A zatem pod pojęciem wyposażenia wojsk należy rozumieć ogół środków materialnych niezbędnych do prowadzenia niezachwianej, podstawowej działalności (prawidłowego funkcjonowania) sił zbrojnych (tematyka ta – a przy tym także inne pojęcia wraz niezbędnymi definicjami – zostały szerzej przedstawione w rozdziale 1). Z punktu widzenia wyposażenia wojsk musi zachodzić zabezpieczenie logistyczne wojsk, czyli zapewnienie ciągłości zaopatrywania w niezbędne asortymentowo i ilościowo zaopatrzenie oraz ewakuacji uszkodzonego zasadniczego sprzętu wojskowego.

Przegrupowanie wojsk natomiast zachodzi drogą przemieszczenia ogółu wyposażenia wojsk. W dokumencie Dowództwo Wojsk Lądowych (2008) wskazana jest definicja przegrupowania wojsk. Jest ono traktowane jako zmiana lokalizacji, rozmieszczenia sił i środków w stosunku do poprzedniej lokalizacji. Dalej wskazano, że „[m]oże ono nastąpić drogą przemieszczeń wojsk z jednego rejonu (rubieży) do drugiego w celu stworzenia nowego ugrupowania, adekwatnego do zaistniałej sytuacji lub potrzeb pola walki”, Dowództwo Wojsk Lądowych (2008). Przemieszczenie wojsk, które pojawia się zarówno w przytoczonej definicji, jak i tytule rozprawy doktorskiej jest rozumiane jako „rodzaj działalności sił zbrojnych,

którego celem jest zmiana lokalizacji całych jednostek wojskowych, grup lub pojedynczych żołnierzy, a także uzbrojenia i sprzętu wojskowego oraz zapasów. To wszelkie zmiany położenia wojsk w formie marszu, przewozów lub przerzutów. Zmiany te dokonuje się z jednego rejonu do drugiego w celu utworzenia zamierzonego ugrupowania bojowego lub dokonania koncentracji sił i środków”, Dowództwo Wojsk Lądowych (2008).

Przemieszczenie wojsk obejmuje zarówno marsze jak i przewozy: transportem kolejowym, powietrznym i morskim (Dowództwo Wojsk Lądowych 2008) oraz drogowym (Kowalski 2010).

Praca dotyczy problematyki przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych za pośrednictwem środków transportu drogowego i kolejowego, realizowanego w rejonie przegrupowania. Przemieszczenie wyposażenia, w tym znacznej liczby osób, sprzętu (mienia wojskowego, ładunków) oraz środków zabezpieczenia logistycznego odbywa się kilka razy w roku w celu odbycia ważnego w działalności Sił Zbrojnych RP szkolenia na poligonie w Drawsku Pomorskim. Planowanie przemieszczenia jest jednym z zasadniczych problemów związanych z przegrupowaniem jednostek wojskowych, zarówno w czasie działań bojowych, jak i na etapie ich planowania lub w ramach ćwiczeń w czasach pokoju.

Przyjęto, że sieć transportowa dotycząca przemieszczania będzie w rozprawie doktorskiej przedstawiona w postaci grafu. Krawędzie grafu (łuki w grafie) mają interpretację połączeń drogowych (kołowych lub kolejowych), wierzchołki grafu mają interpretację miejscowości. Połączenia wyróżnionej sieci transportowej scharakteryzowane są: długością trasy przegrupowania, prędkością przemieszczania, z jaką można pokonywać trasy przegrupowania (drogi przegrupowania w zadanej relacji), przepustowością połączeń (łuków w grafie), natężeniem ruchu na połączeniach oraz kosztami przemieszczania się po połączeniach. W rozprawie doktorskiej określone zostają potencjalne środki transportu, które mogą być stosowane do przemieszczania (wyrażone w postaci liczb pojazdów umownych). Ponadto określone zostają parametry techniczno-ekonomiczne sieci transportowej rejonu przegrupowania, w szczególności w zakresie rozpatrywanych dróg transportowych (dróg przemieszczania wyposażenia wojsk).

W rozprawie doktorskiej, w zakresie modelu decyzyjnego, sformułowano także zadanie optymalizacyjne rozłożenia środków transportu w rejonie przegrupowania uwzględniające funkcje kryterium w kontekście minimalizacji kosztów średnich, a także w kontekście minimalizacji kosztów zewnętrznych oraz czasu przemieszczania (zadanie to rozwiązywane jest z wykorzystaniem analitycznych metod optymalizacyjnych, w szczególności jest

przedstawione w załączniku 6.). Opracowana została również aplikacja proponowanego modelu decyzyjnego, służącego m.in. do analizy dróg przemieszczania wyposażenia wojsk, w postaci oprogramowania komputerowego, pozwalającej aranżować modelowanie z wykorzystaniem metod symulacyjnych. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem tej aplikacji pozwalają weryfikować słuszność przyjętych założeń dla rozwiązań zadań z wykorzystaniem analitycznych metod optymalizacyjnych.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono model przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w ustalonych relacjach przegrupowania wojsk. Temat pracy wynika z braku metody umożliwiającej optymalizację dróg przemieszczania wojsk lądowych w ustalonych relacjach z uwzględnieniem zróżnicowanych kryteriów optymalizacyjnych.

Co jest niezwykle ważne, podjęta tematyka rozprawy doktorskiej oparta jest na analizie przebiegu rzeczywistego procesu przegrupowania.

Opracowany model decyzyjny wymaga realizacji następujących etapów prac:

- sformułowanie zadań optymalizacyjnych przemieszczania wyposażenia wojsk za pośrednictwem środków transportu szynowego lub drogowego w rejonie przegrupowania, o różnych funkcjach kryterium,
- wyznaczenie dróg przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, wraz z uwzględnieniem parametrów techniczno-ekonomicznych tych dróg,
- weryfikacja i walidacja modelu decyzyjnego na wybranych, rzeczywistych przykładach, dokonana przy wykorzystaniu opracowanego oprogramowania komputerowego.

Przewiduje się, że w wyniku rozwiązania zadań optymalizacyjnych, adekwatnych do sytuacji decyzyjnych przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych, wyznaczone będą te drogi transportowe, które powodują, że koszt i czas przegrupowania będą minimalne.

Częścią integralną pracy są Załącznik 1. – 11., dołączone do niej na nośniku zewnętrznym:

- Załącznik 1. Struktura sieci transportowej i obciążenie ruchem poszczególnych odcinków rozpatrywanych dróg;
- Załącznik 2. Teoretyczne przepustowości poszczególnych odcinków analizowanych dróg;
- Załącznik 3. Macierz incydencji;

- Załącznik 4. Zestawienie kosztów zewnętrznych przypadających na dany łuk w sieci transportowej w zakresie przegrupowania wojsk lądowych;
- Załącznik 5. Wykaz wyposażania wojsk lądowych 21BSP;
- Załącznik 6. Części integralne rozdziałów 5.2.2.1.-5.2.2.3.;
- Załącznik 7. Koszty obsługi procesów towarzyszących przegrupowaniu wojsk lądowych w zadanej relacji, w obszarze danego wierzchołka, w przypadku wybranej analizowanej drogi;
- Załącznik 8. Charakterystyki czasowe i kosztowe uzyskane w przypadku zastosowania modelu symulacyjnego dla wariantów W1 – W3;
- Załącznik 9. Tabele wykorzystane przy obliczaniu przepustowości dróg samochodowych;
- Załącznik 10. Dodatkowe dane obciążenia ruchem poszczególnych odcinków dróg;
- Załącznik 11. Bibliometria.

Załączniki na ogół zawierają tabele, do których odwołania znajdują się w części zasadniczej pracy. Tabele w załącznikach numerowane są według następującego schematu: "Z."<nr_zalacznika>".<nr_kolejny_tabeli_w_zalaczniku>". Rysunki w załącznikach numerowane są według następującego schematu: "Z."<nr_zalacznika>".<nr_kolejny_rysunku_w_zalaczniku>".

Na koniec, warto zwrócić uwagę na fakt, że ze względu na tematykę rozprawy związaną z funkcjonowaniem wojsk lądowych, ograniczono się w niej do wykorzystania wyłącznie informacji o charakterze jawnym.

1. Zdefiniowanie problemu badawczego w literaturze

1.1. Wybrane zasady przemieszczania wyposażenia wojsk w kontekście zabezpieczenia logistycznego

W literaturze wielokrotnie przywoływane jest pochodzenie logistyki (cywilnej) ze struktur związanych z wojskowością. Choćby w pracy Szlachta (2007) zauważono, powołując się na Encyklopedię PWN (1974), że logistyka uznawana jest za dziedzinę wiedzy, której rozwój nastąpił na gruncie wojska, w efekcie przeprowadzania czynności zaopatrzenia, dowozu, komunikacji, administracji, konserwacji, remontów, ewakuacji rannych i chorych, wykorzystania zasobów miejscowych, realizacji przedsięwzięć budowlanych oraz inwestycji wojskowych. Francuskie słowo *logistique*, współcześnie tłumaczone na język polski jako logistyka, odnosi się w pierwotnym konstrukcie do aspektów wojskowości, i tłumaczone jest jako teoretyczne i praktyczne przedsięwzięcia mające na celu wsparcie i utrzymanie gotowości sił zbrojnych (obejmujące m.in. zaopatrywanie, konserwacje, remonty, komunikację), powiązane jest ze sprawami zakwaterowania, zaopatrzenia i przemieszczania wyposażenia wojsk (Bryk 2021), czyli tematyką rozprawy doktorskiej. Francuskie *logistique* stosowane jest w rozumieniu pracy sztabów, sztuki dowodzenia, przemieszczania wyposażenia wojsk, zaopatrzenia oraz rozbudowy inżynieryjnej (Mroczo 2016).

Autor pracy Szlachta (2007) przytacza także pojęcie Systemu Logistycznego Wojska (w szczególności systemu logistycznego sił zbrojnych RP), na który składa się podsystem kierowania (w tym: sztaby logistyki, logistyczne organy kierowania), podsystem materiałowy (którego głównym celem są dostawy zaopatrzenia), podsystem techniczny (odpowiadający za uzbrojenie i eksploatację), podsystem infrastruktury (rozumiany w kontekście zakwaterowania), podsystem ochrony zdrowia oraz podsystem transportu wojskowego. Na potrzeby rozprawy doktorskiej warto szczególnie zwrócić uwagę na dwa podsystemy, a mianowicie materiałowy oraz transportu, które stanowią zasadniczy przedmiot zainteresowania autora rozprawy. System ten rozpatrywany był także w pracy Słomiany (2017), w przypadku której autor rozpatrzył możliwości systemu w zakresie reagowania na pozamilitarne sytuacje kryzysowe (w tym m.in. klęski żywiołowe).

Efektom setek lat zbierania doświadczeń opracowywane były rozmaite metody zabezpieczenia wojsk, które doprowadziły do silnie rozbudowanej teorii i praktyki systemów logistycznych, zwłaszcza w efekcie akcji militarnych Stanów Zjednoczonych Ameryki

Północnej (Abt 1996, Szlachta 2007). Kwestie podsystemów materiałowego oraz transportu powiązane są z zaspokojeniem potrzeb pokonania czasu i przestrzeni przez zasoby logistyczne, konsekwentnie zatem podsystemy te realizują funkcje zabezpieczenia logistycznego oraz zabezpieczenia komunikacyjnego. Warto zatem pokrótce rozważyć cele i struktury systemów zabezpieczenia logistycznego oraz zabezpieczenia komunikacyjnego.

Celem zabezpieczenia logistycznego wojsk jest zaspokojenie ich potrzeb w zakresie uzbrojenia, sprzętu wojskowego, środków bojowych i materiałowych do szkolenia i walki oraz jednocześnie zachowanie zdolności stanów osobowych i sprawności technicznej sprzętu i uzbrojenia doprowadzenia działań bojowych (Szlachta 2007), a więc rozumieć należałoby to pojęcie utożsamiać z szeroko pojmowanym zabezpieczeniem potrzeb materiałowych. Cel ten wspierany jest przez infrastrukturę techniczno-ekonomiczną, która stanowi wspomaganie realizacji zadań związanych z produkcją, przechowywaniem, zaopatrywaniem i świadczeniem usług logistycznych dla wojsk, a także stanowią podstawę do ich mobilizacyjnego rozwinięcia jak wskazał Grala (2017) (praca ta stanowi obszerne opracowanie na temat zabezpieczenia logistycznego wojsk, zarówno na obszarze terytorialnym kraju jak i poza jego granicami, w efekcie działań kontyngentów wojskowych). W przeważającej większości wykorzystywane są w tym celu elementy infrastruktury liniowej drogowo-kolejowej, z tego też względu w rozprawie przedstawione są charakterystyki tychże. W kontekście zabezpieczenia logistycznego (ang. *logistics support*) wg Kolek et al. (2012) nie zaleca się używania pojęć: działanie logistyczne, zabezpieczenie tyłowe. Pojęciem hierarchicznie nadrzędnym jest logistyka wojskowa, natomiast relacja skojarzeniowa występuje w tym względzie z terminami: ewakuacja materiałowa, służby logistyczne, wsparcie logistyczne. Pojęcia hierarchicznie podrzędne wobec zabezpieczenia logistycznego to zabezpieczenie komunikacyjne, zabezpieczenie materiałowe, zabezpieczenie materiałowo-techniczne, zabezpieczenie medyczne oraz zabezpieczenie techniczne.

W pracy Kaźmierczak (2019) rozpatrzono organizacyjno-logistyczne aspekty przemieszczania wyposażenia wojsk po drogach publicznych w okresie pokoju, zwięźczone istotnym z punktu widzenia rozprawy doktorskiej wnioskiem, a mianowicie, że „organy transportu i ruchu wojsk powinny nieustannie poszukiwać nowych sposobów działania, innowacyjnych rozwiązań, które przyczynią się do ciągłego ulepszenia procesu przemieszczania transportem samochodowym jednostek wojskowych.” Organy transportu zasadniczo nie mają dostępu do oprogramowania wspierającego działania wojska, m.in. z uwagi na tajność spraw, manewrów i innych działań wojskowych.

Zabezpieczeniu komunikacyjnemu poświęcono uwagę np w. opracowaniu Sitarek i Wętyczko (1996). Pojęcie to rozumiane jest jako całokształt przedsięwzięć związanych z działalnością planistyczną, organizacyjną, inwestycyjną, materiałową, produkcyjną i innymi, które obejmują przygotowanie sieci transportowej i poszczególnych rodzajów transportu do realizacji zadań przewozowych planowanych na wypadek konfliktu lub w zakresie potrzeb własnych (np. działań ćwiczeniowych) na obszarze działalności sił zbrojnych. Zasadniczym celem tych działań jest utrzymanie żywotności systemu transportowego i zapewnienie uwarunkowań pozwalających na ciągłość realizacji przewozów. Warto zatem jednocześnie zwrócić uwagę na fakt, że poziom przygotowania zabezpieczenia komunikacyjnego jest koegzystencjalny z bieżącym poziomem rozwoju kraju, w szczególności rozbudowy infrastruktury komunikacyjnej. Zabezpieczenie komunikacyjne (ang. *communication support*) wg Kolek et al. (2012) nie należy traktować jako pojęcia synonimicznego z zabezpieczeniem transportowym. Zabezpieczenie logistyczne rozważane powyżej jest zagadnieniem szerszym od zagadnienia zabezpieczenia komunikacyjnego, tj. jest tematem hierarchicznie nadrzędnym od pojęcia zabezpieczenia komunikacyjnego wg Kolek et al. (2012). A jednocześnie pojęcie zagadnienia komunikacyjnego jest uznawane za temat powiązany relacją skojarzeniową z pojęciem służby komunikacji wojskowej.

O ile zabezpieczenie logistyczne rozumieć należałoby jako szeroko pojmowane zabezpieczenie potrzeb materiałowych, to zapotrzebowanie komunikacyjne jako zaspokojenie potrzeb związanych z przemieszczaniem zasobów materiałowych i materialnych oraz przemieszczaniem zasobów ludzkich. W takim rozumieniu zabezpieczenia te współistnieją ze sobą i wobec tego jedno nie powinno być rozważanym bez drugiego. Zasady zaopatrzenia materiałowego opierają się na ogólnych zasadach logistyki wojskowej, jak również na zasadach szczegółowych, takich jak: dostawy zaopatrzenia, elastyczność dostaw, wykorzystanie zasobów lokalnych, uzupełnianie zapasów, zaopatrzenie lokalne (Ligaj 2015) za DD/4 (2002).

Interesujące są spostrzeżenia zamieszczone w pracach Mroczko (2016, p. 254) i Nowak (2009, pp. 19-39), a mianowicie misją logistyki wojskowej jest zapewnienie wysokiej skuteczności zabezpieczenia logistycznego wojsk, co świadczy o fakcie, że tematyka podjęta w rozprawie jest istotna z gruntu rzeczy. Celem działania logistyki wojskowej jest zaspokojenie potrzeb logistycznych wojsk, a jest on osiągany poprzez koncentrację działań dotyczących integracji działań logistycznych, a przy tym wdrożenie odpowiednich zestawów zaopatrzenia i pakietów towarzyszących usług. Za główny sposób osiągnięcia celu autorzy ww. prac wskazali

stosowanie priorytetów dostaw i usług, a podział logistyki wojskowej ujęli jako: zaopatrzenie materiałowe, zabezpieczenie techniczne, zabezpieczenie transportowe, zabezpieczenia medyczne. Rozprawa doktorska dotyczy trzech obszarów, z pominięciem zabezpieczenia medycznego.

Według słownika Kolek et al. (2012) przemieszczenie wojsk w języku angielskim nosi nazwę „*military movement*”. Jest to termin nadrzędny wobec przemieszczenia operacyjnego (ang. *operational movement*), taktycznego (ang. *tactical movement*), strategicznego (ang. *strategic movement*). Terminy anglojęzyczne posłużyły do dokonania poszukiwań i sporządzenia przeglądu literatury źródłowej w publikacjach zagranicznych oraz w pracach polskich autorów publikujących w języku angielskim – z tego powodu terminy te zostają zasygnalizowane na początku rozdziału dotyczącego przeglądu literatury.

Kluczowe z punktu widzenia rozprawy doktorskiej są pewne pojęcia powiązane z przemieszczaniem wyposażenia wojsk. Charakterystykę przemieszczania należałoby rozpocząć od stwierdzenia, że przewozy wojskowe organizowane są według systemu wahadłowego i obejmują dwa podstawowe kierunki. Pierwszym z nich jest przemieszczanie ze strefy tyłowej do rejonu działań bojowych lub ćwiczebnych i obejmuje przemieszczanie stanów osobowych oraz dowóz sprzętu wojskowego i środków zaopatrzenia. Natomiast drugi z nich jest dokładnie odwrotny, tj. przemieszczanie następuje z rejonu działań bojowych lub ćwiczebnych do strefy tyłowej i obejmuje ewakuację medyczną rannych i chorych, ewakuację stanów osobowych, ewakuację techniczną uzbrojenia i sprzętu wojskowego, Krzyżiński (2008). Przemieszczanie znacznych sił jest cechą charakterystyczną współczesnego systemu sił zbrojnych. Przegrupowanie obejmuje przerzuty sił zbrojnych transportem lądowym, powietrznym i morskim, i realizowane jest na bazie infrastruktury oraz wyposażenia transportowego.

Przemieszczenie wyposażenia wojsk wg instrukcji DD/4.4.3 (2006) o przewozach wojsk przytoczonej w Benec i Smal (2007) to „zmiana lokalizacji stanu osobowego, uzbrojenia i sprzętu wojskowego oraz środków zaopatrzenia, powodowana potrzebami operacyjnymi, logistycznymi lub szkoleniowymi. Cel ten osiąga się poprzez przewóz środkami transportu lotniczego, morskiego lub lądowego oraz ruch (marsz) z wykorzystaniem etatowego sprzętu i uzbrojenia o własnym napędzie.”

Warto przy tym zauważyć, że przemieszczanie wyposażenia wojsk są to wszelkie ruchy wojsk (pododdziałów), niezależnie od przyjętych środków transportowych w tym celu wykorzystywanych. Przemieszczanie realizowane jest w celu utworzenia w innym rejonie

zamierzonego ugrupowania bojowego, ćwiczebnego lub koncentracji sił i środków. Przemieszczenie obejmuje zmiany położenia wojsk typu: marsze, przewozy lub przerzuty sił i środków. „Marsz to ruch pododdziałów po drogach i na przełaj do wyznaczonych rejonów lub rubieży. Pododdział wykonuje marsz na własnych środkach transportowych lub jest przewożony transportem kolejowym, wodnym (morskim, śródlądowym). Ponadto pododdział może być przewożony transportem powietrznym. Marsz wykonywany jest w kolumnach marszowych. Kolumna marszowa to ugrupowanie pododdziałów na jednej drodze pod jednym dowództwem”, Dakudowicz et al. (2000). Przewóz natomiast jest to „zorganizowane przemieszczanie pododdziałów za pomocą transportu kolejowego, wodnego (morskiego, śródlądowego) lub przyczep niskopodwoziowych”, Dakudowicz et al. (2000). Przerzut należy rozumieć jako „zorganizowane przemieszczanie pododdziałów (ładunków) drogą powietrzną za pomocą transportu powietrznego (samolotów i śmigłowców transportowych). Przerzut transportem powietrznym należałoby traktować jako formę przewozu realizowaną w nagłej sytuacji, w celu szybkiego przemieszczania pododdziału na polu walki”, Dakudowicz et al. (2000).

Inne ważne pojęcia, które dotyczą bezpośrednio lub pośrednio przemieszczania wyposażenia wojsk (i jednocześnie inny podział przemieszczania wyposażenia wojsk) to: przesunięcie, przegrupowanie i manewr pododdziałami. Przesunięcie jest „to każdy ruch wojsk bez względu na to, przy pomocy, jakich środków transportowych się odbywa”, Dakudowicz et al. (2000), Krzyziński (2008). Przegrupowanie natomiast rozumiane jest jako „zmiana istniejącego rozmieszczenia sił i środków na określonych kierunkach (w wybranych rejonach) drogą przesunięć wojsk (pododdziałów), z jednego rejonu (rubieży) w inne, w celu stworzenia nowego ugrupowania”, Dakudowicz et al. (2000), Krzyziński (2008). Przegrupowanie jest pojęciem, które podlega szczególnemu rozpatrywaniu w rozprawie doktorskiej. Natomiast manewr pododdziałami to „zorganizowane przemieszczanie na polu walki (przed walką lub w czasie jej trwania) w celu zajęcia dogodniejszego położenia w stosunku do przeciwnika oraz uzyskania i właściwego wykorzystania przewagi sytuacji”, Dakudowicz et al. (2000), Krzyziński (2008), a jako że dotyczy pola walki nie jest rozpatrywane w rozprawie doktorskiej.

Benec i Smal (2007) wskazali podstawowe trasy przemieszczania wyposażenia krajowych sił zbrojnych z jednoczesnym ujęciem kosztów ponoszonych w celu realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk, zaangażowania środków transportu, itp. W pracy Malinowski (2017) natomiast przedstawiono wpływ zastosowania nowych technologii na

zabezpieczenie logistyczne wojsk realizujących zadania w specyficznych środowiskach walki, którego istotą jest zapewnienie ciągłości zaopatrzenia w niezbędne asortymentowo i ilościowo zaopatrzenie oraz ewakuacji uszkodzonego zasadniczego sprzętu wojskowego. Autor poczynił studium w odniesieniu do różnego rodzaju terenów: lesisto-jeziornego, górzystego, aglomeracyjnego. Przedstawił także interesujące rozwiązania jak robot AlphaDog/Legged Squad Support System (LS3), wzorowany na żywym stworzeniu i przeznaczony do przenoszenia zaopatrzenia w trudnym do pokonania terenie, łązik Squad Mission Support System (SMSS) służący do przewożenia 45-kilogramowych plecaków, stanowiąc wsparcie niewielkich oddziałów, a także system transportowy Cargo Unmanned Ground Vehicle (UGV), bazę którego stanowią samochody Terra Max wyposażone w kamery, czujniki podczerwieni i czujniki laserowe (jak wskazał autor system ten może stanowić część konwoju sterowanego przez jednego kierowcę). W kolejnej pracy Paterak (2014), autor przedstawił źródła zagrożeń i problemów, z którymi może się mierzyć kontyngent wojskowy przy wycofywaniu z danego terytorium. Ostatnią z tej grupy prac jest Lewicki (2008). Autor rozpatrywał podstawowe funkcje wewnętrzne i zewnętrzne sił zbrojnych oraz wymogi cywilnej kontroli.

Autorzy pracy Barcik i Czech (2014) rozpatrywali aspekty formalne oraz organizacyjne dotyczące przemieszczania wyposażenia wojsk obcych na terenie kraju, szczególnie transportem drogowym. Zbliżoną tematykę podjęto w pracy Baran (2020), przy czym nie wyszczególniono w niej przemieszczania wyposażenia wojsk obcych. Autorka natomiast podjęła kluczową sprawę ładunków nienormatywnych (podjęła się próby odpowiedzi na pytanie badawcze „czy planowanie i organizowanie wojskowych przejazdów drogowych pojazdami nienormatywnymi można usprawnić?”). W pracy Puskiewicz i Piątkowski (2018) przedstawiono zasady formalne przemieszczania wyposażenia wojsk, oznakowanie pojazdów i infrastruktury (znaki drogowe). Autorzy uwzględnili ponadto aspekty bezpieczeństwa dotyczące przemieszczania sił zbrojnych – statystyki wypadków, stanów zagrożenia, na które trzeba zwrócić uwagę w planowaniu przemieszczania wyposażenia wojsk z wykorzystaniem transportu drogowego.

W pracy Malinowski (2017) przedstawiono różnego rodzaju rozwiązania z kręgu logistyki cywilnej, które znajdują zastosowania między innymi w przemieszczaniu wyposażenia wojsk w określonych relacjach przegrupowania. Podobny cel przyświecał autorom pracy Myszczyżyn et al. (2016), przy czym skupili się oni w głównej mierze na akcentach związanych z procesem zaopatrzenia wojsk w niezbędne środki w okresie prowadzenia działań taktycznych. W pracy Lewiński (2017), powołując się na Słowiński

(2008), przywołano jedną z historycznych ujęć logistyki, której jednym z zadań było oszacowanie obszaru działań wraz z obliczeniem przemieszczania wyposażenia wojsk, dodawszy, iż ruchy i rozmieszczenie swoich sił powinny być uregulowane i zorganizowane. W pracy Ryczyński i Smal (2017), autorzy nadmienili, że w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk funkcjonują podsystemy: zarządzania, transportu i sieci transportowych. Przemieszczanie wyposażenia wojsk charakteryzuje się nieprzewidywalnością wynikającą z potrzeb operacyjnych, koniecznością zachowania szczególnych warunków ostrożności oraz koniecznością przygotowania środków transportu do przewozu ładunków ciężkich, ponadgabarytowych i niebezpiecznych. Autorzy dodali również, powołując się na pracę Janasz i Smal (2013), że przy planowaniu przemieszczania wyposażenia wojsk należy przede wszystkim dążyć do osiągnięcia dwóch funkcji celu: zapewnienia terminowej realizacji zadań oraz minimalizacji kosztów przy akceptowalnym poziomie nakładów. W pracy Ryczyński i Nowakowska (2018), autorzy podjęli tematykę kulturalnych i antropologicznych rozważań dotyczących czynnika ludzkiego i związanego z nim ryzyka w przemieszczaniu wyposażenia wojsk poza granicami kraju. Autor pracy Byleń (2019) zauważył między innymi, że nastąpił wyraźny wzrost zarówno w zakresie uzgodnień pomiędzy organami transportu i siłami zbrojnymi organizującymi przemieszczanie wyposażenia wojsk, jak i liczby wydanych zezwoleń drogowych, a co za tym idzie również zwiększonego ruchu pojazdów wojskowych na drogach publicznych. W pracy Finkel (2020) natomiast podjęto temat elastycznej organizacji przemieszczania wyposażenia wojsk.

Problem planowania manewru, tj. zorganizowanego przemieszczanie zasobów osobowych i rzeczonych wojska w celu zajęcia dogodniejszego położenia w zakresie działań bojowych (Dakudowicz et al. 2000) jest jednym z zasadniczych elementów tych działań i jest związany z przemieszczaniem wyposażenia wojsk zarówno w czasie działań bojowych, jak i na etapie ich planowania. Pomimo definicji manewru, powiązanej z okresem działań bojowych, do przemieszczania wyposażenia wojska dochodzi również w czasie pokoju. Przemieszczanie wyposażenia sił zbrojnych jest z natury rzeczy rozpatrywane częściej przez autorów powiązanych z siłami zbrojnymi lub szkolnictwem wojskowym. Na przykład Kaźmierczak (2019) dokonał identyfikacji zasad oraz procedur przemieszczania wyposażenia wojsk Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej po drogach publicznych w czasie pokoju. Autor przedstawił proces planowania przemieszczania wyposażenia wojsk, przemieszczania kolumn pojazdów wojskowych po drogach publicznych, a przy tym dokonał charakterystyki

i przytoczył zasady wykorzystywania teleinformatycznego systemu monitorowania położenia wojsk, istotnego z punktu widzenia przepływu informacji. Natomiast Jałowiec (2018) dokonał analizy wykorzystania cywilnych środków transportu na potrzeby Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej, nadmieniając m.in., że współpraca wojskowo-cywilna w obszarze transportu to naturalny element realizacji zadań zabezpieczenia logistycznego wojsk w kraju i poza jego granicami.

Wg Herl et al. (2004) manewry wymagają wojskowej oceny terenu. Ocena ta obejmuje dwa komponenty: analizę terenu i analizę przeciwnika. Analiza terenu dotyczy szczegółowego rozpatrzenia nie tylko topografii terenu, ale także roślinności, pogody i ich łącznego wpływu na planowaną operację. W tym celu stosuje się specyficzną technikę zwaną zmodyfikowaną, połączoną nakładką na przeszkody (MCOO, ang. *modified combined obstacle overlay*). Podając za Gortney (2016), MCCO to „wspólne przygotowanie wywiadowcze produktu środowiska operacyjnego, wykorzystywane do przedstawiania istotnych z militarnego punktu widzenia aspektów środowiska operacyjnego, takich jak przeszkody ograniczające przemieszczanie wyposażenia wojsk, kluczowe elementy geograficzne oraz cele wojskowe.” Technika ta może być wykorzystywana przy użyciu metod ręcznych (np. folie octanowe i pióro) lub za pomocą procesów zautomatyzowanych (np. systemy informacji geograficznej). Obydwa te podejścia wykorzystują identyczne kryteria: rozpoznanie i klasyfikacja teren według nachylenia, rozstawu i pokrycia drzewami, identyfikacja i klasyfikacja obszarów zabudowanych, identyfikacja i klasyfikacja rzek i przeszkód wodnych, identyfikacja i klasyfikacja terenów kluczowych i krytycznych, rozpoznanie i klasyfikacja wszystkich przeszkód naturalnych i wzmacniających, identyfikacja i klasyfikacja korytarzy mobilności, identyfikacja i klasyfikacja dróg podejścia, opracowanie celów sojusznicznych i wrogich, integrowanie i analizę pogody, łączenie obszarów szczególnego zainteresowania lub punktów decyzyjnych. Kwestie tego typu rozbudowywane są także o inną problematykę. Dla przykładu celem pracy Scott i Christie (2003) było zidentyfikowanie „optymalnych” kombinacji prędkość-obciążenie, które zmniejszyłyby obciążenie fizyczne żołnierzy, a jednocześnie byłyby wystarczająco skuteczne, aby sprostać wymaganiom manewrów wojskowych.

Tematyka przedstawiona w niniejszej sekcji ujęta została w postaci jakościowego przeglądu literatury – natomiast ilościową analizę literatury przytoczono w załączniku 11.

1.2. Wybrane zagadnienia w zakresie wyboru dróg alternatywnych

Przemieszczanie wyposażenia wojsk musi zachodzić po określonych drogach transportowych. Na ogół w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk dochodzi do opracowania dróg w ujęciu wielowariantowym, wskazywane są drogi alternatywne zapewniające realizację funkcji transportowych. Zsynchronizowana realizacja funkcji transportowych wzmacnia zdolność do prowadzenia operacji wojskowych. Funkcje te to kontrola ruchu (czasami nazywana zarządzaniem ruchem), operacje terminalowe i operacje międzygałęziowe (między różnymi gałęziami transportu). W gestii kontroli organizacji przemieszczania wyposażenia wojsk leżą planowanie, wyznaczanie tras, harmonogramów, koordynacja i widoczność (transparentności) personelu, jednostek, sprzętu i zaopatrzenia przemieszczających się po drogach transportowych (liniach komunikacyjnych). Takie działania wiążą się z zaangażowaniem przydzielonych środków transportowych i nabyciem usług transportowych spoza sił zbrojnych w celu wsparcia operacji wojskowych. A celem takiej kontroli przemieszczania wyposażenia wojsk jest optymalizacja środków i terminali transportowych będących w powszechnym użyciu. Wspomniane funkcje zmierzają do zaspokojenia strategicznych, taktycznych i operacyjnych planów podejmowanych przez siły zbrojne (Headquarters Department of the Army 1995).

W zastosowaniach cywilnych, wybór dróg alternatywnych zachodzi w oparciu o specyficzne metody i modele decyzyjne. W pracy Żochowska (2012) podano szereg algorytmów i modeli stosowanych na rzecz takiego wyboru dróg w przypadku indywidualnego przemieszczania w ruchu miejskim. Na przykład jednym z nich jest deterministyczny model użyteczności będący szczególnym przypadkiem modelu stochastycznego, w którym zakłada się wartości oczekiwane parametrów losowych równą zero, a którego rozwiązania są użyteczne przy małym obciążeniu ruchem lub w przypadku sieci o specyficznej topologii. Większe obciążenie ruchem w przypadku autorki Żochowska (2012) wymaga zastosowania procedur iteracyjnych, a przy tym bardziej adekwatnych modeli, w tym m.in.: wielomianowych modeli logitowych (ang. *MNL - Multinomial Logit*), wielomianowych modeli probitowych (ang. *MNP - Multinomial Probit*), różnych odmian modeli logitowych, m.in. logitowych modeli zagnieżdżonych) (ang. *NL - Nested Logit*) i międzygniazdowych (ang. *CNL - Cross-Nested Logit*), logitowych modeli par kombinowanych (ang. *PCL - Paired Combinatorial Logit*), modeli logitowych typu C (ang. *C-Logit*), typu PS (ang. *Path-Size Logit*), Cascetta (2009), Ramming (2002). Autorka Żochowska (2012) dokonała zestawienia najczęściej

wykorzystywanych modeli wyboru drogi wraz z matematycznymi zależnościami rozkładów prawdopodobieństw stosowanych w ww. modelach. Zagadnienia alternatywnych dróg przemieszczania ładunków rozpatrywane były także przez Jacyna i Szczepański (2012), Jachimowski i Szczepański (2014), Ambroziak i Jachimowski (2012), Karkula (2018), Kulińska (2014), Marczuk (2009), Ambroziak (2005), natomiast zagadnienia alternatywnych dróg przemieszczania osób we wspomnianej już pracy Żochowska (2012), a także Halor (2013), Sierpiński (2012), Juszczyk i Tymińska (2010) i in.

Wybór alternatywnych dróg możliwy jest wówczas, kiedy drogi wraz z ich wszelkimi parametrami techniczno-eksploatacyjnymi są zdefiniowane, ujęte w postaci bazy danych, podobnie jak dokonano tego w przypadku modelu EMITRANSYS, który stosowany jest wobec planowania rozwoju systemu transportowego w kontekście zrównoważonego rozwoju takiego systemu, Jacyna-Gołda et al. (2014a), Jacyna-Gołda et al. (2014b), Jacyna-Gołda et al. (2015), Jacyna i Merkisz (2014c), Jacyna i Wasiak (2014). Tak skonstruowana baza danych może pozwolić na przeprowadzanie analiz scenariuszowych (tematykę objaśniono w rozdziale 1.3).

O wyborze optymalnej trasy na ogół, tj. w większości przytaczanych prac, decyduje optymalizacja kosztów przemieszczania ładunków lub osób. Z punktu widzenia modelu decyzyjnego przedstawionego w rozprawie doktorskiej koszty przemieszczania wyposażenia wojsk choć kluczowe nie są jedynym kryterium oceny alternatywnych dróg przemieszczania wyposażenia.

Należy zauważyć, że przemieszczanie wyposażenia wojsk lądowych, na obszarze kraju, zaspokajane jest przede wszystkim przez transport drogowy i kolejowy (Kowalski 2010). W okresie mobilizacyjnego i operacyjnego przemieszczania wyposażenia wojsk operacyjnych środkami transportu kolejowego w pełnym składzie organizacyjnym jest racjonalny na odległość powyżej 100 km (Kowalski 2010). W tej samej pracy nadmieniono, że w przypadku mniejszych odległości, przewóz wojsk dokonywany jest sposobem kombinowanym, tj. stan osobowy oraz pojazdy kołowe przemieszczają się po drogach kołowych, a sprzęt ciężki (gąsienicowy) przewożony jest transportem kolejowym.

Problemy planowania tras występują w wielu złożonych scenariuszach świata rzeczywistego, od gier komputerowych po planowanie ruchu wojsk. Takie bardziej złożone problemy planowania tras, nazwane następnie problemami taktycznego planowania ścieżek wielojednostkowych (Tactical Multi-Unit Pathplanning - TMPP) i były rozpatrywane w pracy Nareyek i Goenawan (2011).

Warto zauważyć, że liczne systemy planowania przemieszczania wyposażenia korzystają z implementacji algorytmu Dijkstry (ang. *Dijkstra's Continuous Algorithm*, Dijkstra 1959) zaproponowany w pracy Mitchell (1999). W pracy Tarapata (2011) przedstawiono automat decyzyjny w zastosowaniu do przemieszczania wyposażenia wojsk. Rozwiązanie to zostało zaimplementowane i przetestowane na wielu scenariuszach.

W artykule Kioumourtzis et al. (2012) przedstawiono pełną ocenę wydajności protokołów routingu *ad hoc* (w zakresie sieci mobilnych *Mobile ad hoc networks*, MANETs), które mogą być odpowiednie w komunikacji wojskowej, zatem dotyczą rozpatrywanego tematu niemniej nie w sposób bezpośredni. Ocena wydajności protokołów została oparta zarówno na metrykach jakościowych, jak i ilościowych zgodnie z zaleceniami RFC 2501 (Manet 1999). Temat tych sieci rozważano także w pracy Kannammal i Purusothaman (2011).

Do analiz przemieszczania wyposażenia zawartych w rozprawie doktorskiej został zatem wybrany transport szynowy, jako że charakteryzuje się najwyższym stanem zdolności przewozowej i gotowości do użycia przez siły zbrojne spośród wszystkich rodzajów transportu lądowego. Warto przy tym jednak zauważyć, że także transport drogowy zostanie ujęty w opracowaniu, przy czym efektywność tej gałęzi transportu zależy od gęstości i jakości sieci drogowej. Wspomniane w tym akapicie aspekty zostaną przedstawione w rozdziale 3 rozprawy. Warto przy tym zauważyć, że w związku z takimi operacjami utrzymanie sieci transportowej obejmuje ochronę obiektów kolejowych i innych komunikacyjnych, co jest realizowane przez jednostki obrony terytorialnej (Kowalski 2010). Autor nadmienia także, że w przypadku, gdy występują miejsca przecięcia linii transportowych (kolejowych) z przeszkodami wodnymi, tunelami, mostami lub na wypadek, gdy zniszczony jest dany obiekt, organizowane są tymczasowe rejony przeładunkowe, które mają za zadanie realizację przeładunku wojsk i zaopatrzenia z transportu kolejowego na inny rodzaj transportu (samochodowy lub wodny) (Kowalski 2010).

Kwestie te definiowane są w opracowaniu Dowództwo Wojsk Lądowych (2008), jak następuje:

- „[t]ransport kolejowy oznacza przewóz taborem kolejowym wojsk, uzbrojenia i sprzętu wojskowego pomiędzy stacjami załadowania i wyładowania”,
- „[t]ransport operacyjny, który dotyczy przewozu wojsk operacyjnych jest to całopociągowy skład lub grupa wagonów użyt[y] do przewozu oddziału lub pododdziału wojskowego wraz z wyposażeniem,”

- „[p]rzewóz wojsk operacyjnych w pełnym składzie organizacyjnym jest racjonalny na odległość powyżej 100 km. Na mniejsze odległości, przewóz wojsk wykonuje się z zasady sposobem kombinowanym. Stan osobowy oraz pojazdy kołowe przemieszcza się transportem drogowym, a sprzęt ciężki (gąsienicowy) przewożony jest transportem kolejowym,”
- „[z]a organizację załadowania (wyładowania) oraz dyscyplinę w czasie przemieszczenia odpowiada dowódca (wyznaczony dowódca) przewożonej jednostki wojskowej.” W czasie przemieszczania wyposażenia wojsk, wyposażenie to powinno być chronione siłami przewożonej jednostki wojskowej.

W pracy Kowalski (2010) nadmieniono także, że wojsko nie posiadają na wyposażeniu środków transportu kolejowego i w związku z tym nie dysponuje własnym potencjałem do utrzymania ruchu w zakresie tej gałęzi transportu. Do realizacji wojskowych przewozów kolejowych wykorzystywane są najczęściej wagony: kryte, platformy, cysterny, chłodnie, węglarki oraz osobowe. Warto przy tym zauważyć, że kwestia ta ulega zmianie. Wg Madrjas (2020) spółka PKP Intercity S.A. zamówiła na zlecenie Ministerstwa Obrony Narodowej (MON) wagony typu 175A3 (rys. 1), na potrzeby przewozu wojska, które nie będą dostępne dla ruchu pasażerskiego – przy czym będą oznakowane znakiem towarowym przewoźnika na burtach. Madrjas (2020) za wykonawcę podał firmę H. Cegielski – Fabryka Pojazdów Szynowych. Wykonanych ma być 8 wagonów osobowych specjalnych do przewozu osób na potrzeby Sił Zbrojnych RP, w tym 6 wagonów bezprzedziałowych specjalnych 2 klasy do przewozu osób i 2 wagony przedziałowe specjalne 2 klasy do przewozu konwoju.



Rys. 1. Wagon osobowy na zamówienie MON

Źródło: Kędzierski (2021)

1.3. Metody i narzędzia decyzyjne stosowane w badaniach naukowych

Wobec doboru dróg przemieszczania ładunków czy osób służyć mogą np. sieci Petriego (Jachimowski i Szczepański 2014), algorytmy metaheurystyczne (Jachimowski 2014) i wiele innych metod, technik oraz narzędzi. Interesujące w tym kontekście jest stosowanie metod symulacyjnych umożliwiających przeprowadzanie analiz typu *what-if*, które przez autorów prac Jacyna-Gołda et al. (2014a), Jacyna-Gołda et al. (2014b), Jacyna-Gołda et al. (2015) określane są mianem analiz scenariuszowych. Metoda scenariuszowa polega na holistycznym opisie badanego obiektu lub systemu, z wyszczególnieniem możliwie najbardziej pełnej liczby istotnych czynników oddziałujących na ten obiekt lub system, a w konsekwencji uzyskaniu realnych przebiegów sytuacji decyzyjnych i potencjalnych obrazów przyszłości (prognozowanie), Jacyna-Gołda et al. (2014a), Pisano (1994), Porter (2006), van der Heijden et al. (2009), Worthington et al. (2009). Jak wspomnieli autorzy Jacyna-Gołda et al. (2014a, p. 19), aby opracowanie analiz scenariuszowych było poprawne, konieczne jest zastosowanie narzędzia, które umożliwi przeprowadzanie symulacji przy różnych warunkach brzegowych i ustalonych kryteriach funkcjonowania analizowanego systemu transportowego. Warto zatem dokonać analizy literatury pod względem występowania takich narzędzi i modeli symulacyjnych w literaturze dotyczącej przemieszczania wyposażenia wojsk. W metodzie scenariuszowej przedstawionej w Jacyna-Gołda et al. (2014a, p. 27) wyróżniono scenariusze i warianty w zakresie analizy scenariuszy rozwoju. W rozprawie natomiast scenariusze określane są mianem wariantów, natomiast warianty scenariuszy mianem eksperymentów symulacyjnych, zgodnie z nomenklaturą przyjętą w modelowaniu z wykorzystaniem metod symulacyjnych (Kostrzewski 2018).

Rozpatrywanie zagadnień dotyczących przemieszczania wyposażenia wojsk są wspierane poprzez wykorzystywanie oprogramowania komputerowego. Planowanie i metody symulacyjne stosowane do przemieszczania wyposażenia wojsk są aplikowane m.in. jako elementarne problemy rozpatrywane w systemach typu CGF (ang. *Computer Generated Forces*), Petty (1995), Page and Oppen (2000), Evertsz et al. (2007), Toubman et al. (2016). W systemach tego typu aplikowane są moduły planowania tras przemieszczania, które poza odległościami pomiędzy konkretnymi punktami w przestrzeni danego rejonu zawierają także modele terenu, w tym przeszkód i punktów krytycznych na trasie, dzięki którym symulacja danej trasy jest wzbogacona o przetworzone z wykorzystaniem tych modeli informacje. Dla przykładu moduł tego typu stosowany w systemie ModSAF opisany został w publikacji

Longtin and Megherb (1995). W wielu istniejących systemach korzystających z metod symulacyjnych oraz systemach wspomagania decyzji aplikowane są różne moduły dotyczące omawianej tematyki, Tarapata (2003). W Benton et al. (1996) zastosowano taki moduł do obliczania tras terenowych o długości ponad 100 km, pokonywanych przez pojazdy zrobotyzowane. Autorzy pracy Campbell et al. (1995) przedstawili moduł planowania trasy w taktycznym symulatorze walki bezpośredniej Close Combat Tactical Trainer. Jak wspomniał Tarapata (2011) „[s]ystemy symulacyjne wspomagające ćwiczenia sztabowe lub zarządzanie kryzysowe powinny być wyposażone w moduły zarządzania przemieszczaniem wielu obiektów.”

W publikacji Benton et al. (1995) autorzy przedstawili system, który pozwala analizować przeszkody i określać miejsca, w których zastosowanie sprzętu do omijania przeszkód mogłoby znacząco zmniejszyć długość optymalnej trasy. Jest to zagadnienie istotne z punktu widzenia tematu rozprawy doktorskiej. Niezmiernie ważne w tym celu jest zapewnienie możliwości łatwego połączenia systemu planowania trasy z różnymi bazami danych i Systemami Informacji Geograficznej (ang. *Geographic Information Systems*, GIS) oraz zadawania złożonych zapytań, które wymagają jednocześnie identyfikacji GIS i danej bazy danych, jak również planisty trasy w celu uzyskania odpowiedzi (rozpoznania najbardziej korzystnej trasy).

James et al. (1999) przedstawił prace nad prototypem zestawu narzędzi Route PLanning Uncertainty Manager (RPLUM) do planowania operacji naziemnych, w skład którego wchodzi między innymi komponenty przybierające formę sieci inteligentnych agentów utrzymujących i przekazujących wspólną percepcję przestrzeni (terenu) wielu szczeblom połączonych sił zadaniowych z uwzględnieniem warunków niepewności. Zarządzanie niepewnością zastosowano także do analizy terenu i planowania tras jako działań wspierają planowanie manewrów. Inny system wykorzystujący mapy cyfrowe, zdjęcia satelitarne został opisany w Kreitzberg et al. (1990). System ten, czyli Tactical Movement Analyzer (TMA), został przedstawiony jako uwzględniający warunki pogodowe i rodzaj przemieszanych środków transportu służy do określenia przejezdność kwadratu terenu o długości boku ok. 0,5 km. W krajowych zastosowaniach odnaleźć można System Symulacyjnego Wspomagania Szkolenia Operacyjnego – Złocień, SSWSO Złocień (Salamon 2011). W systemie tym zaimplementowany jest dwuwymiarowy model terenu, który otrzymywany jest na podstawie informacji zawartych pod postacią map cyfrowych w formacie VPF (ang. *Vector Product Format*), Tarapata (2003). Model terenu został zaimplementowany w narzędziu w postaci siatki

kwadratów o regularnych bokach, a ponadto wzbogacony o sieć dróg kołowych i szynowych znajdujących się na terenie kraju, Tarapata (2004), Tarapata (2011). SSWSO Złocień jest systemem środkowym w hierarchii. Dane do niego dostarczane są z symulatora Virtual Battle Space 2 (VBS2), dokonującego analiz działań pojedynczych żołnierzy i środków transportu. VBS2 znajduje się najniżej w hierarchii systemu. Na szczycie hierarchii znajduje się symulator Joint Theater Level Simulation (JTLS), Najgebauer i Dyk (2011). Etap planowania manewru został przedstawiony także w Tarapata (2008a) z wykorzystaniem metod wyznaczania przepływu w sieciach, abstrahujący od wspomnianego Systemu Symulacyjnego Wspomagania Szkolenia Operacyjnego – Złocień. W pracy Kamrari et al. (2016), autorzy przedstawili platformę Data-Driven Behavior Modeling (DDBM) do modelowania zachowań w komercyjnym symulacyjnym wojskowym oprogramowaniu szkoleniowym VBS2 kolejnej generacji, czyli Virtual Battle Space 3 (VBS3). Rozważania na temat tego typu oprogramowań szkoleniowych zamieszczono np. w pracy Reece (2003).

W pracy Bala Subramanian et al. (2020) zastosowano sieci czujników, znajdujące zastosowanie w różnych obszarach komunikacji, takich jak wykrywanie akustyczne, monitoring medyczny, wykrywanie pożarów lasów i nadzór nad ruchami wojsk. Autorzy uznali, że nie są znane satysfakcjonujące metody optymalizacji trajektorii ruchomego punktu asekuracyjnego. W wyniku zastosowania metod symulacyjnych uzyskali w tym badaniu lepszą wydajności proponowanej metody planowania ścieżki niż istniejących metod.

Metody symulacyjne wykorzystywane są nie tylko do analiz przemieszczania wyposażenia wojsk, ale także np. wobec harmonogramowania rekultywacji zdegradowanych wojskowych terenów szkoleniowych, jako że intensywne użytkowanie pojazdów wojskowych na obiektach szkoleniowych może powodować pogorszenie jakości powierzchni ziemi (Önal et al. 2016). Warto przy tym zauważyć, że realizacja przemieszczania wyposażenia wojsk może „owocować” w podobne skutki. Tematyka zmian w terenie rozpatrywana była także przez Herl et al. (2005). Zbliżony kontekst podjęto także w kolejnej pracy.

Bardzo interesującą i odmienną od pozostałych prac badawczych jest Vennik et al. (2019), celem której było zbadanie zmian głębokości kolein i gęstości nasypowej po jednym i wielokrotnych przejazdach pojazdu wojskowego na różnych glebach i gruntach w zakresie przebiegu przemieszczania wyposażenia wojsk. Autorzy przy tym dokonali oceny zdolności analitycznego modelu zagęszczania gleby do przewidywania tych zmian.

Systemy stosowane przez wojsko zasadniczo znajdują się poza dostępem cywilnym, wobec czego dociekliwość naukowa nakazywałaby opracowanie systemu pozwalającego na dokonywanie analiz niezależnych od stopnia dostępności, a właściwie braku dostępności tego typu narzędzi stosowanych przez siły zbrojne. Wynik przeglądu literatury, w tym w tym również analizy bibliometryczne przedstawione w załączniku 11, ewidentnie wskazuje, że istnieje pewna niewielka ograniczona liczba publikacji dostępnych w istotnych bazach danych dotycząca wsparcia analiz przemieszczania wyposażenia wojsk z wykorzystaniem oprogramowania (w tym oprogramowania implementowanego z wykorzystaniem metod symulacyjnych). Dodawszy do tego rozeznania fakt, że systemy w użyciu sił zbrojnych na ogół nie są dostępne dla cywilnych analiz naukowych, autor rozprawy doktorskiej upatruje tu zatem lukę badawczą, z którą postanowił się zmierzyć. Zamiarem autora opracowania jest zatem zaproponowanie modelu przemieszczania wyposażenia sił zbrojnych w określonych relacjach przegrupowania tych sił oraz analiz danych pozyskanych z oprogramowania stanowiącego implementację modelu.

2. Cel, zakres oraz teza pracy

W efekcie analizy literatury naukowej zdefiniowano lukę badawczą dotyczącą wsparcia wobec planowania i przeprowadzania analiz przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych z wykorzystaniem oprogramowania, w szczególności pozwalającego na implementację metod i modeli symulacyjnych dla przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych jako narzędzi stanowiących wsparcie dla podejmowania decyzji w zakresie zabezpieczenia logistycznego wojsk lądowych. Celem rozprawy jest zatem opracowanie modelu przemieszczania wyposażenia sił zbrojnych (w szczególności wojsk lądowych) w określonych relacjach przegrupowania tych sił, jako narzędzia stanowiącego wspomaganie decyzji w zakresie zabezpieczenia logistycznego wojsk lądowych. Działanie to zrealizowane zostało w efekcie sformułowania zadania optymalizacyjnego (jest to sformułowanie zadania optymalizacyjnego przemieszczania wyposażenia wojsk, w zadanych relacjach przegrupowania) jako modelu decyzyjnego i opracowanie oprogramowania stanowiącego implementację tego modelu. Model decyzyjny zaimplementowany w oprogramowaniu uznano za istotne wsparcie dla doboru dróg i prowadzenia analiz przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych pomiędzy wybranymi miejscowościami w relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie. Dobór dróg transportowych w przypadku tej relacji stanowi ważny aspekt związany z przegrupowaniem wojsk z miejsca stałej dyslokacji na największy poligon w Polsce zlokalizowany w okolicach miejscowości Drawsko Pomorskie. Rzeszów jako drugi ze skrajnych wierzchołków relacji został wybrany ze względu na stacjonowanie dużego i różnorodnego pod względem wyposażenia związku taktycznego, jakim jest 21 Brygada Strzelców Podhalańskich (21 BSP); w szeregach 21 BSP służy około 4,5 tysiąca osób (Polska Zbrojna 2014). Zatem znaczenie badanej relacji przegrupowania Rzeszów – Drawsko Pomorskie w aspekcie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych uzasadnia podjęcie tematu.

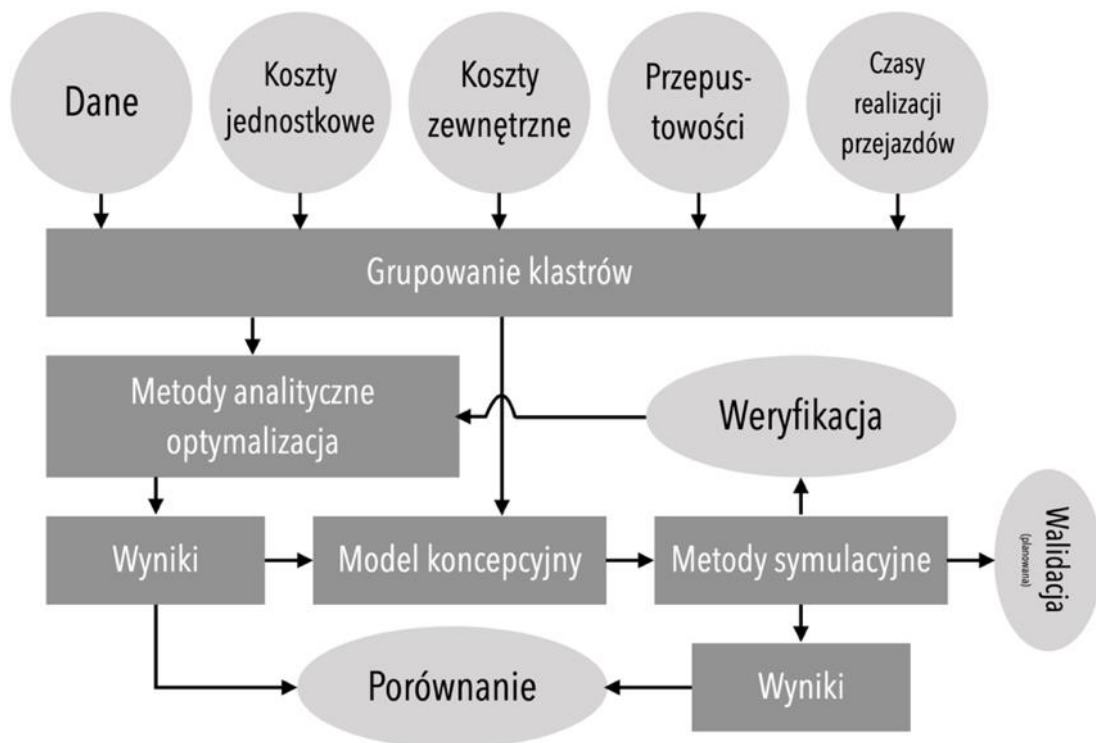
Dobór dróg i przeprowadzanie analiz przemieszczania wyposażenia wojsk wymaga oceny uzyskiwanych rozwiązań wobec określenia najbardziej korzystnego z nich. Wobec tego, warte uwagi jest zagadnienie wielokryterialnej optymalizacji systemów transportowych. Jak wiadomo z literatury (Jacyna et al. 2004), zagadnienie wielokryterialnej optymalizacji systemów transportowych może być różnorodne i dotyczyć wielu kwestii, „(...) w zależności od: sformułowanego celu – np., minimalizacja kosztów, minimalizacja czasu przewozu i kosztu przewozu itp., rodzaju ograniczeń nałożonych na sieć transportową, rodzaju ograniczeń techniczno-ekonomicznych nałożonych na infrastrukturę sieci transportowej”. Zagadnienie to

wykorzystano wobec realizacji celu rozprawy w zakresie formalizacji modelu decyzyjnego jako przedmiotu opracowania rozprawy doktorskiej.

W rozprawie przyjęto, że przemieszczanie wyposażenia wojsk warto rozpatrzyć z punktu widzenia dwóch gałęzi transportu: drogowego i kolejowego. Przedstawiona w rozdziale 1 analiza literatury polskojęzycznej i obcojęzycznej wykazała, że niewiele jest opracowań naukowo-badawczych poświęconych zagadnieniom przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych, w szczególności dotyczących realizacji tego przemieszczania w relacjach przegrupowania na terenie Polski. Ponadto, pomimo że zauważa się publikacje, w zakresie których zastosowane zostały metody symulacyjne, to jednak ich aplikowalność zasadniczo możliwa jest jedynie na użytek sił zbrojnych. Pewien niedobór rozważań naukowych dotyczy aplikacyjności przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w realizacjach dostępnych dla grona naukowego wywodzącego się ze środowiska cywilnego. Jednym z zamierzeń autora jest umożliwienie takich rozważań przy jednoczesnym wzięciu pod uwagę potencjalnych aspektów tajności operacji wojskowych. Przeanalizowanie wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, w obrębie istniejących połączeń kolejowych i drogowych krajowych sieci transportowych, wykonane zostało w oparciu o oprogramowanie stanowiące implementację modelu decyzyjnego. Dzięki obliczeniom komputerowym możliwe jest uzyskanie odpowiedzi na pytanie, w jak dużym stopniu istniejące obciążenie ruchem, będącym efektem przemieszczania wyposażenia wojsk po drogach publicznie dostępnej krajowej infrastruktury liniowej, różni się od optymalnego. Ponadto uzyskana może być odpowiedź na pytanie czy istniejąca infrastruktura transportowa jest odpowiednio dostosowana do realizowanych przez nią zadań przemieszczania wyposażenia sił zbrojnych, w tym przypadku wojsk lądowych, wzięwszy pod uwagę dodatkowe kryteria związane ze stanem infrastruktury, klimatem oraz innymi przewidzianymi w zewnętrznych opracowaniach, w tym np. Herl et al. (2004), czyli tych, które na ogół nie są rozpatrywane w zagadnieniach optymalizacyjnych. Ponadto zastosowanie metod symulacyjnych umożliwi przeprowadzanie analiz typu *what-if*, co jest istotne szczególnie w przypadku dokonania rozeznania i przewidywania scenariuszy (prowadzenia analiz scenariuszowych) na wypadek różnego rodzaju zakłóceń i perturbacji w zakresie realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych. Istotne jest zatem rozpatrzenie tzw. zmiennych subiektywnych jak określono w Kaddoussi et al. (2011), takich jak ryzyko, niepewność i podatność obok zmiennych obiektywnych, takich jak czas dostawy i straty finansowe, w celu określenia preferowanych kierunków działania. Jak zauważono przy okazji definiowania pojęcia wyposażenia wojsk, jego

integralną i nieodłączną częścią jest przemieszczenie osób (żołnierzy sił zbrojnych, personelu medycznego itp.), w związku z czym w rozprawie brane są pod uwagę zarówno rzeczowe jak i osobowe składniki wyposażenia wojsk.

Metodę postępowania w rozprawie zobrazowano schematycznie na rys. 2. Jej dokładnego przedstawienia należy spodziewać się w kilku kolejnych rozdziałach pracy, w szczególności 4.



Rys. 2. Metoda postępowania w rozprawie

W efekcie przedstawionych powyżej założeń opracowano tezę rozprawy w brzmieniu jak następuje:

Stosowanie aparatu programowania matematycznego oraz metody symulacji komputerowej, pozwala na opracowanie modelu przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w określonych relacjach przegrupowania tych sił, ze względu na predefiniowane funkcje celu, jako narzędzia wspomaganie decyzji w zakresie zabezpieczenia logistycznego wojsk lądowych.

Celem pracy jest zatem opracowanie modelu przemieszczania wyposażenia sił zbrojnych (w szczególności wojsk lądowych) w określonych relacjach przegrupowania tych sił

(modelu decyzyjnego), jako narzędzia stanowiącego wspomaganie decyzji w zakresie zabezpieczenia logistycznego wojsk lądowych. Model ten zaimplementowano pod postacią oprogramowania z wykorzystaniem metod symulacyjnych, bazą do którego są analityczne metody programowania matematycznego, a zatem pośród celów cząstkowych można wyróżnić:

- Opracowanie danych do modelu przemieszczenia wyposażenia wojsk lądowych w ustalonych relacjach przegrupowania, ustalenie zmiennych dla tego modelu decyzyjnego, ograniczeń nakładanych na wspomniane zmienne oraz dobór funkcji kryterium stosowny do planowanego przeznaczenia modelu,
- Opracowanie modelu koncepcyjnego (analitycznego) przemieszczenia wyposażenia wojsk lądowych w ustalonych relacjach przegrupowania,
- Opracowanie modelu symulacyjnego przemieszczenia wyposażenia wojsk lądowych w ustalonych relacjach przegrupowania tych wojsk,
- Weryfikacja danych modelu wobec porównania wyników uzyskanych w efekcie zastosowania modelu analitycznego i symulacyjnego.

Rozprawa doktorska składa się z kilku zasadniczych części, opracowanych w kolejnych rozdziałach. W pierwszej kolejności sformułowaniu podlegać będzie zadanie optymalizacyjne przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w ustalonych relacjach przegrupowania, a zatem ukonstytuowany zostanie model decyzyjny. Kolejno podjęta zostanie szczegółowa charakterystyka techniczno-ekonomiczna dróg analizowanej relacji przegrupowania zachodzącej pomiędzy terenami zasadniczymi i przylegającymi do Rzeszowa oraz okolicami Drawska Pomorskiego w celu przedstawienia przykładów obliczeniowych dla badanych dróg przemieszczania w wyżej wymienionej relacji. Zostanie w nich przedstawiona charakterystyka obiektu badań, rozumiana jako charakterystyka wybranych aspektów związanych z przemieszczaniem wojsk lądowych. Ostatecznie zaprezentowana zostanie implementacja komputerowa modelu decyzyjnego dla badanego przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w relacji przegrupowania Rzeszów – Drawsko Pomorskie i przedłożone zostaną efekty jej zastosowania. Rozprawę doktorską kończy podsumowanie, w którym określono aspekty poznawcze (teoretyczne), utylitarne (praktyczne) przedstawionych prac badawczych wraz ze wskazaniem potencjalnych kierunków dalszych prac badawczych w zakresie rozpatrywanego zagadnienia.

3. Sformułowanie modelu decyzyjnego przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania

3.1. Zdefiniowanie struktury sieci transportowej stosowanej w modelu decyzyjnym i inne założenia ogólne

Zadanie optymalizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w relacji przegrupowania w badanym fragmencie sieci transportowej dla kryterium równych kosztów średnich i innych kryteriów wskazanych w dalszej części rozprawy jest traktowane jako model decyzyjny. Model decyzyjny jest opracowany zgodnie z zasadami analitycznych metod programowania matematycznego. Dla takiego modelu należy wskazać dane, określić zmienne decyzyjne, ograniczenia nakładane na zmienne decyzyjne oraz zdefiniować funkcję (funkcje) kryterium.

Zakłada się, że sieć transportowa przedstawiona w modelu decyzyjnym opracowana jest w postaci grafu. Łuki grafu mają interpretację połączeń ścieżek (dróg), wierzchołki grafu mają interpretację lokalizacji. Połączenia wyróżnionej sieci transportowej charakteryzują się: długością, prędkością, z jaką mogą być pokonywane, przepustowością połączeń, natężeniem ruchu na połączeniach oraz kosztami poruszania się po połączeniach (Hall, 1996; Suvin i Mallikarjuna 2018; Basiewicz 1998; Datka et al. 1997). W oparciu o powyższe informacje sformułowano zadanie optymalizacyjne polegające na wyznaczeniu wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych we wskazanych relacjach przegrupowania. Przemieszczanie dużej liczby osób i sprzętu odbywa się kilka razy w roku w celu przeprowadzenia szkolenia na poligonie ważnym w działaniach Sił Zbrojnych RP (Kaszubowski et al. 1970; Tarapata 2000a; Tarapata 2001).

W pierwszej kolejności zdefiniowano założenia dotyczące przemieszczania wyposażenia wojsk w relacji przegrupowania, z wykorzystaniem dostępnych środków transportu (pojazdów). Ponadto sformułowano kryteria przemieszczania pojazdów w relacjach przegrupowania w sieci transportowej, a następnie zdefiniowano zadanie optymalizacyjne dla przemieszczania wyposażenia wojsk z wykorzystaniem pojazdów, uwzględniające trzy funkcje kryterium: kryterium kosztu średniego, kryterium kosztów zewnętrznych oraz kryterium czasu.

Model decyzyjny służący do rozpatrywania przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania w sieci transportowej przy określonym zapotrzebowaniu na przemieszczanie, skierowanym do tej sieci z otoczenia, jest statycznym

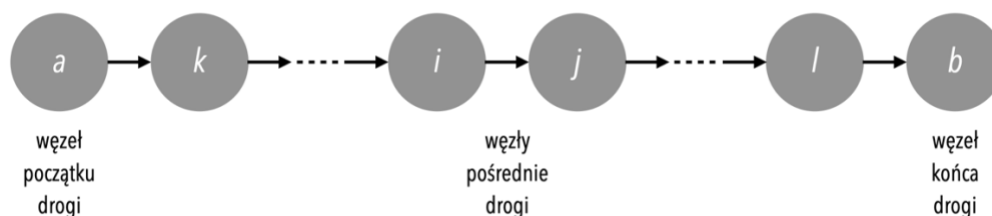
modelem organizacji przemieszczania ładunków i osób w systemie transportowym. Znaczący to, że jest modelem, w którym odwzorowany jest stan ustalony obciążenia węzłów i łuków sieci transportowej składowymi przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, wynikającymi z zapotrzebowania na transport (przemieszczenie). Modele takie nie zawierają odwzorowania upływu czasu – co oznacza, że nie są modelami dynamicznymi. Zasygnalizować tu warto, że model statyczny stanowić będzie zasadniczy trzon dla opracowanego, z myślą o rozprawie doktorskiej, oprogramowania w postaci modelu dynamicznego (w efekcie implementacji modelu statycznego w postaci oprogramowania, które skonstruowano w myśl zastosowań metody symulacyjnej).

Wynikiem rozwiązania optymalizacyjnego zadania przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania w sieci transportowej może być: rozwiązanie dopuszczalne, spełniające warunki realizacji zapotrzebowania na przewóz i ograniczenia sieci transportowej lub rozwiązanie optymalne, które dodatkowo minimalizuje koszt realizacji zapotrzebowania na przewóz.

Wzmiankując o przemieszczaniu wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania należy wyjaśnić takie pojęcia jak: droga, sieć transportowa, relacja przegrupowania.

„Drogą ze źródła (a) do ujścia (b) nazywamy ciąg $a, k, \dots, i, j, \dots, l, b$ taki, że $a, k, i, j, b, l \in W$ ” (Leszczyński 1999, p. 25), jak wskazano na rys. 3.

Opisem drogi w strukturze $\langle W, M \rangle$ (gdzie W jest zbiorem wierzchołków (węzłów) sieci transportowej zaś M to zbiór numerów łuków, o czym szczegółowo napisane będzie w dalszej części rozdziału) jest uporządkowany zbiór węzłów albo uporządkowany zbiór łuków tworzących drogę.



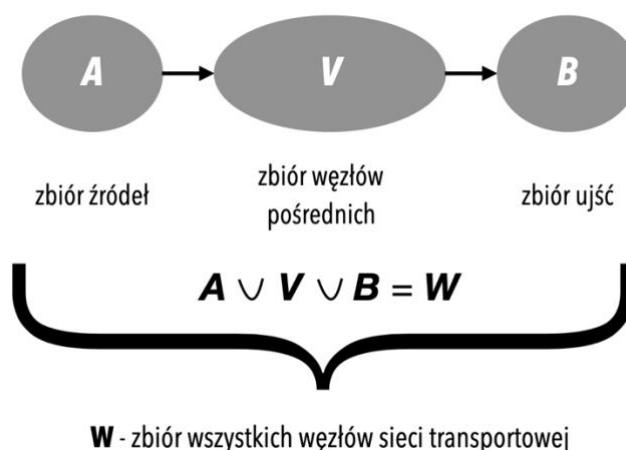
Rys. 3. Ilustracja definicji drogi

Źródło: opracowanie własne na podstawie Leszczyński (1999, p. 25)

Siecią transportową nazywa się sieć o strukturze: $\langle W, M \rangle$, w której wyróżniono trzy podzbiory węzłów $A, B, V \subset W$. Węzłom $a \in A$ nadano interpretację źródeł w modelu

decyzyjnym, węzłom $b \in B$ nadano interpretację ujęć w modelu decyzyjnym, zaś węzły $v \in V$ stanowią węzły pośrednie (Leszczyński 1999, p. 33).

Schematyczne przedstawienie węzłów sieci transportowej w modelu decyzyjnym, wraz ze wskazaniem kierunku przemieszczania wyposażenia wojsk, przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Graficzne przedstawienie węzłów sieci transportowej
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Jacyna (2001, p. 40)

„Relacją [przegrupowania – dop. autora] nazywamy uporządkowaną parę $\langle a, b \rangle$, której elementy są nazwami (numerami) węzłów sieci transportowej $a, b \in W$, przy czym $a \neq b$. Pierwszy element pary nazywamy początkiem relacji, a drugi element pary nazywamy końcem relacji przewozu” (Leszczyński 1999, p. 34). W odniesieniu do zagadnienia rozpatrywanego w rozprawie doktorskiej relacja przegrupowania rozumiana jest jako uporządkowana para $\langle a, b \rangle$, której elementy są nazwami (numerami) węzłów sieci transportowej $a, b \in W$, przy czym $a \neq b$, a pomiędzy tymi elementami zachodzi przemieszczanie wyposażenia wojsk lądowych rozumiane jako zmiana istniejącego rozmieszczenia sił i środków na określonych kierunkach (w wybranych rejonach) drogą przesunięć wojsk z jednego rejonu (rubieży) tj. a w inne tj. b , w celu stworzenia nowego ugrupowania sił i środków.

Sieć transportowa definiowana jest jako zespół czynników i punktów transportowych znajdujących się na danym obszarze, składa się z infrastruktury liniowej (jej odzwierciedleniem w grafach reprezentujących sieci transportowe są łuki) oraz punktowej (jej odzwierciedleniem w grafach reprezentujących sieci transportowe są wierzchołki). Wynika z tego, że elementy sieci transportowej są elementami układu zagospodarowania przestrzennego.

Należy założyć, że punkty transportowe utożsamiane są z węzłami transportowymi, odcinki zaś z drogami transportowymi. Dlatego strukturę badanego fragmentu sieci transportowej można przedstawić w postaci grafu.

Każdy wierzchołek i, j grafu G odpowiada węzłowi transportowemu funkcjonującemu w badanej sieci transportowej, natomiast łuk (i, j) – istniejącemu w rzeczywistej sieci transportowej „połączeniu” kolejowemu, drogowemu łączącemu dwa sąsiednie wierzchołki grafu (w przypadku rozprawy rozpatrywane są dwie gałęzie transportu, aczkolwiek naturalnie rzecz ujmując dla innych sieci transportowych mogą być uwzględniane także pozostałe gałęzie transportu).

Na podstawie wcześniejszych ustaleń przyjęto, że wyróżnione węzły w sieci transportowej są miejscowościami zawierającymi węzeł drogowy, kolejowy, w których w rzeczywistości istnieje możliwość wyboru drogi.

Graf, o którym mowa, charakteryzuje się tym, że;

- między dwoma wyróżnionymi wierzchołkami grafu istnieje, co najwyżej jedno połączenie,
- (i, j) oznacza, że początek łuku znajduje się w wierzchołku (węźle) i , natomiast koniec w wierzchołku (węźle) j , czyli wierzchołki i oraz j są węzłami sąsiednimi.

Na podstawie tych informacji warto zauważyć, że struktura sieci transportowej opracowana celem realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych będzie przedstawiona w postaci grafu Berge'a.

Warto przytoczyć za Korzan (1978, pp. 34-35) definicję grafu Berge'a, którym „nazywamy każdy taki graf, który jest jednocześnie *digrafem* (grafem skierowanym) i *unigrafem*. Takimi bowiem grafami zajmował się głównie C. Berge, [...] ze względu na bardzo szerokie zastosowania tych grafów w różnych zadaniach praktycznych. Każdy graf Berge'a jest w swojej istocie odpowiednią relacją dwuczłonową $R \subset W \times W$ i wobec tego może być określony jednoznacznie za pomocą binarnej macierzy przejść. Z tego względu macierz przejść grafu Berge'a jest często nazywana macierzą relacji tego grafu. Jedyne w tej macierzy określają bowiem te pary uporządkowane $\langle x_i, x_j \rangle$ wierzchołków grafu, które są elementami relacji R i są przedstawione graficznie jako łuki lub pętle.” Dodatkowo warto zauważyć, że „[g]rafem zorientowanym, inaczej skierowanym lub digrafem, nazywamy każdy taki graf, którego zbiór krawędzi jest z założenia pusty. Może on zawierać zatem jedynie łuki i pętle”, Korzan (1978, p. 32)

Natomiast unigraf to taki graf, którego krotność wynosi jeden, tzn. między dwoma dowolnymi wierzchołkami grafu może istnieć tylko jedno połączenie (jedna krawędź i/lub jeden łuk lub jedna pętla).

Połączenia wyróżnionej sieci transportowej scharakteryzowane są: długością, prędkością z jaką można je pokonywać, przepustowością połączeń, natężeniem ruchu na połączeniach oraz kosztami przemieszczania się po połączeniach. Drogi wchodzące w skład analizowanego fragmentu sieci transportowej podzielono na łuki (połączenia). W sieci wyróżniono dwa wierzchołki a oraz b . Wierzchołek a stanowi początek relacji przegrupowania natomiast wierzchołek b jej koniec, zaś para (a, b) stanowi relację przegrupowania. W dalszej części pracy parametry te przyjmują wartości liczbowe. Charakterystyki dróg oraz łuków wynikają bezpośrednio z charakterystyk połączeń tworzących drogę. Zakłada się zatem, że sieć drogowa przedstawiona jest w postaci grafu G (za Leszczyński 1999; Jacyna et al. 2004) przedstawionego w postaci zależności (1).

$$G = \langle W, M, W, \{c\}, \{d\}, \{x(ab)\} \rangle \quad (1)$$

przy czym:

- W jest zbiorem wierzchołków (węzłów) sieci transportowej (na zbiorze wierzchołków wyróżniono dwa wierzchołki, jeden $i = a$, w którym rozpoczyna się przemieszczenie wyposażenia oraz drugi wierzchołek $j = b$, inny od pierwszego wyróżnionego tj. $a \neq b$, w którym ma miejsce zakończenie przemieszczenia wyposażenia;
- M jest zbiorem numerów łuków sieci transportowej (połączeń między wyróżnionymi węzłami); warto zatem przez $M(i, j)$ oznaczyć zbiór numerów połączeń (łuków) między wierzchołkami i oraz j , jak w zależności (2).

$$M(i, j) = \{m(i, j): (i, j) \in W \times W; i \in W; j \in W; m \in M\} \quad (2)$$

Pozostałe oznaczenia objaśniono poniżej.

Między dwoma wierzchołkami i oraz j może istnieć wiele połączeń (między dwoma miejscowościami może istnieć wiele dróg je łączących). Ważnym problemem w zagadnieniach optymalizacji jest wskazanie dróg, po których należy dokonywać przemieszczania, aby optymalne założenia zostały spełnione.

Oczywiście, zachodzi przy tym zależność (3).

$$M = \bigcup_{(i,j) \in W \times W} M(i,j) \quad (3)$$

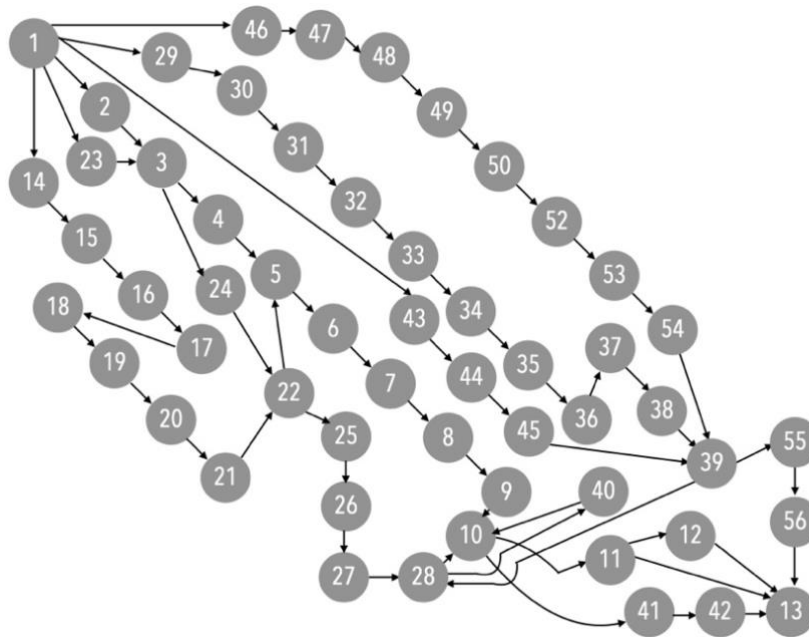
Optymalizacja rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w zakresie przegrupowania wojsk lądowych, będzie przeprowadzona dla fragmentu istniejącej sieci transportowej zawierającej połączenie (relację) Rzeszów – Drawsko Pomorskie oraz jego najbliższe otoczenie. Węzeł transportowy Rzeszów jest węzłem początkowym, natomiast węzeł transportowy Drawsko Pomorskie jest węzłem końcowym badanego połączenia (relacji). Analiza tras pomiędzy wymienionymi miejscowościami pozwoliła na określenie 6 rozsądnych wariantów (dróg) przejazdu na trasie Rzeszów – Drawsko Pomorskie:

- droga wiodąca przez autostradę A4 (droga nr 1; tabela Z.1.1., rys. Z.1.1.);
- droga wiodąca przez autostradę A1 (droga nr 2; tabela Z.1.2., rys. Z.1.2.);
- droga wiodąca przez autostrady A4 i A2 (droga nr 3; Z.1.3., rys. Z.1.3.);
- droga wiodąca przez drogi krajowe 11 i 12 (droga nr 4; Z.1.4., rys. Z.1.4.);
- droga wiodąca przez autostradę A4 i drogę krajową 11 (droga nr 5; Z.1.5., rys. Z.1.5.);
- droga wiodąca wzdłuż linii kolejowych (droga nr 6; Z.1.11., rys. Z.1.6.).

Wierzchołki nadania i odbioru zapotrzebowania na przemieszczenie, nie leżące w danym węźle, połączone z wierzchołkami za pomocą dodatkowego łuku. Łuki takie odwzorowują połączenia punktów powstawania oraz zanikania przemieszczania wyposażenia wojsk w rejonie ciężenia dla Rzeszowa i Drawska Pomorskiego. Są to zatem lokalne połączenia, po których odbywa się przemieszczanie pojazdów między wierzchołkami nadania lub odbioru, a węzłem początkowym lub końcowym. Warto nadmienić, że węzły, które stanowią jedynie początek poprzedniego łuku i następnik kolejnego łuku pozostawiono w taki sposób celowo, bowiem łuki poprzedni i następny charakteryzowane są różnymi parametrami, co ma wpływ na wyniki końcowe obliczeń. Łuki tego typu zatem nie będą podlegały połączeniom.

Strukturę analizowanej sieci transportowej wraz z jej otoczeniem oraz z opisanymi połączeniami drogowymi i kolejowymi przedstawiono na rys. 5.

W otoczeniu badanego korytarza wyróżniono wierzchołki, które są źródłami oraz ujściami w modelu decyzyjnym. Wierzchołek, który jest źródłem wielkości wyposażenia przemieszczanego wojsk oznaczono cyfrą 1 (Rzeszów), natomiast wierzchołek będący ujściem oznaczono liczbą 13 (Drawsko Pomorskie).



Rys. 5. Odzworowanie struktury połączenia Rzeszów – Drawsko Pomorskie

Źródło: Opracowanie własne

Przyjętą strukturę sieci transportowej przedstawiono w postaci grafu Berge'a, w którym interpretacja wierzchołków i łuków jest podana w załączniku 1 (wierzchołkom odpowiadają nazwy miejscowości podane w tabelach Z.1.1.-Z.1.6., przy czym warto mieć na uwadze, że w tabelach Z.1.12.-Z.1.16. podano bardziej dokładne lokalizacje w związku z przedstawianiem szczegółowych alokacji wierzchołków).

Jak wskazuje postać analizowanej sieci transportowej, między wyróżnionymi wierzchołkami a , b w sieci transportowej może istnieć wiele dróg. Przez $P(a,b)$ oznaczono zbiór numerów dróg między wyróżnionymi wierzchołkami a oraz b . Drogi numerowane będą przy uwzględnieniu zmiennej p . Zbiór numerów dróg przyjmuje zatem postać (4).

$$P(a,b) = \{p: p = \overline{1, P(a,b)}\} \quad (4)$$

gdzie przez $P(a,b)$ oznaczono liczbę różnych dróg między wierzchołkami a oraz b (najkrótsze ścieżki są opisane np. w pracy Tarapata 2007). Przez drogę w grafie o numerze p , tj. $p((a,b),r)$, rozumieć należy ciąg łuków postaci zależności (5).

$$p((\mathbf{a}, \mathbf{b}), r) = \left\langle \left((i(1), m(1), j(1)), r \right), \left((i(2), m(2), j(2)), r \right), \dots, \left((i(I(\mathbf{a})), m(S((\mathbf{a}, \mathbf{b}), r)), j(J(\mathbf{b}))), r \right) \right\rangle \quad (5)$$

Elementy wskazane w zależności (5) spełniają następujące warunki:

- $i(1) \equiv \mathbf{a}$, tzn. wierzchołek o numerze 1 winien być wierzchołkiem początkowym wyznaczonej drogi;
- $i(I(\mathbf{b})) \equiv \mathbf{b}$, tzn. wierzchołek o numerze $I(\mathbf{b})$ winien być wierzchołkiem końcowym wyznaczonej drogi;
- $\forall r \in P(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \quad \forall \left((i(s), m(s), j(s)), r \right) \in d((\mathbf{a}, \mathbf{b}), r)$, tzn. każda uporządkowana trójka: wierzchołek-łuk-wierzchołek stanowi element opisu rzeczywistej sieci transportowej, po której odbywa się przemieszczanie wyposażenia wojsk;
 $R\left((i(s), m(s), j(s)), r \right) = I; \quad s = \overline{I, P((\mathbf{a}, \mathbf{b}), r)}$
- $i(s+1) = j(s)$, tzn. wierzchołek początkowy kolejnej trójki definiującej drogę przemieszczania wyposażenia wojsk winien być tym samym wierzchołkiem, który jest końcowym w poprzedniej trójce definiującej drogę; zakres zmienności parametru s to $s = \overline{I, (P((\mathbf{a}, \mathbf{b}), r) - 1)}$;
- $i(s) \neq i(s')$, tzn. wierzchołki początkowe w każdej trójce definiującej drogę są różne, $s \neq s', \quad s, s' = \overline{I, P((\mathbf{a}, \mathbf{b}), r)}$;
- $j(s) \neq j(s')$, tzn. wierzchołki końcowe w każdej trójce definiującej drogę są różne, $s \neq s', \quad s, s' = \overline{I, P((\mathbf{a}, \mathbf{b}), r)}$;
- $m(s) \neq m(s')$ tzn. łuki (połączenia) w każdej trójce definiującej drogę są różne, $s \neq s', \quad s, s' = \overline{I, P((\mathbf{a}, \mathbf{b}), r)}$.

Dla zadanej sieci transportowej może istnieć wiele relacji przegrupowania tzn. wiele par (\mathbf{a}, \mathbf{b}) . Przez \mathbf{R} oznaczono zbiór relacji przegrupowania, tj. zbiór postaci wskazanej w zależności (6).

$$\mathbf{R} = \left\{ (a(n), b(n)) : n = \overline{1, N} \right\} \quad (6)$$

Oznacza to, że na sieci transportowej dysponuje się przegrupowaniami w liczbie N . Dla każdego przegrupowania mogą być powtórzone, przeprowadzone w tej sekcji rozważania. Niemniej jednak w zakresie rozpatrywanego zagadnienia występuje tylko jedna relacja przegrupowania.

Zakłada się, że dla ustalonej relacji przegrupowania $(a(n), b(n))$, $n = \overline{1, N}$ zadana jest wielkość przemieszczania wyposażenia wojsk tj. liczba środków transportu, która będzie podlegać przemieszczaniu. Oznaczono tę liczbę przez $\alpha(a(n), b(n))$.

Zgodnie z wcześniejszymi ustaleniami, relacja przegrupowania jest parą symboli, z których pierwszy określa punkt początku przemieszczania w zakresie przegrupowania (relacji), natomiast drugi określa punkt końca przemieszczania w zakresie przegrupowania (relacji). Ustalono jedną relację przegrupowania realizowaną pomiędzy początkiem przegrupowania w punkcie 1 oraz końcem przegrupowania w punkcie 13.

Wstępne analizy pozwoliły na dobór sześciu dróg przewozu dla wskazanej relacji przegrupowania (1 – 13):

$$P^{1/13} = \{p^{1,1/13}, p^{2,1/13}, p^{3,1/13}, p^{4,1/13}, p^{5,1/13}, p^{6,1/13}\}$$

Są one przedstawione poniżej.

Pierwsza droga przewozu w relacji przegrupowania (1 – 13):

$$p^{1,1/13} = \langle (1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 5), (5, 6), (6, 7), (7, 8), (8, 9), (9, 10), (10, 11), (11, 13) \rangle$$

Druga droga przewozu w relacji przegrupowania (1 – 13):

$$p^{2,1/13} = \langle (1, 14), (14, 15), (15, 16), (16, 17), (17, 18), (18, 19), (19, 20), (20, 21), (21, 22), (22, 5), (5, 6), (6, 7), (7, 8), (8, 9), (9, 10), (10, 11), (11, 12), (12, 13) \rangle$$

Trzecia droga przewozu w relacji przegrupowania (1 – 13):

$$p^{3,1/13} = \langle (1, 23), (23, 3), (3, 24), (24, 22), (22, 25), (25, 26), (26, 27), (27, 28), (28, 10), (10, 11), (11, 13) \rangle$$

Czwarta droga przewozu w relacji przegrupowania (1 – 13):

$$p^{4,1/13} = \langle (1, 29), (29, 30), (30, 31), (31, 32), (32, 33), (33, 34), (34, 35), (35, 36), (36, 37), (37, 38), (38, 39), (39, 28), (28, 40), (40, 10), (10, 41), (41, 42), (42, 13) \rangle$$

Piąta droga przewozu w relacji przegrupowania (1 – 13):

$$p^{5,1/13} = \langle (1, 43), (43, 44), (44, 45), (45, 39), (39, 28), (28, 40), (40, 10), (10, 11), (11, 12), (12, 13) \rangle$$

Szósta droga przewozu w relacji przegrupowania (1 – 13):

$p^{6,1/13} = \langle (1, 46), (46, 47), (47, 48), (48, 49), (49, 50), (50, 51), (51, 52), (52, 53), (53, 54), (54, 39), (39, 55), (55, 56), (56, 13) \rangle$

Z uwagi na specyficzny przypadek przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych, zbiór relacji jest jednoelementowy i stanowi go para wierzchołków 1 i 13. Zbiór par relacji przewozu w sieci transportowej modelu rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób), w ustalonych relacjach przegrupowania, możemy zapisać w poniższy sposób: $\mathbf{R} = \{(1 - 13)\}$.

Przyjęto, że na iloczynie kartezjańskim $\mathbf{W} \times \mathbf{M}$ zadane jest odwzorowanie w postaci (7).

$$c : \mathbf{W} \times \mathbf{M} \rightarrow \mathfrak{R}^+ \quad (7)$$

przy czym wielkość $c((i, j), m) \in \mathfrak{R}^+$ ma interpretację kosztu przemieszczania wyposażenia wojsk po łuku połączenia drogowego lub kolejowego o numerze m , łączącym miejscowości o numerach i oraz j . W dalszej części rozprawy stosowana będzie notacja $c((i, j), m) \equiv c(i, m, j) \equiv c(i, j)$ przy zachowaniu wcześniej ustalonej interpretacji.

Założono, że na iloczynie kartezjańskim $\mathbf{W} \times \mathbf{M}$ zadane jest odwzorowanie d , w postaci zależności (8).

$$d : \mathbf{W} \times \mathbf{M} \rightarrow \mathfrak{R}^+ \quad (8)$$

przy czym wielkość $d((i, j), m) \in \mathfrak{R}^+$ ma interpretację przepustowości w przypadku połączenia drogowego (łuku) o numerze m , łączącego miejscowości o numerach i oraz j . Dalej w rozprawie stosowana będzie notacja $d((i, j), m) \equiv d(i, m, j) \equiv d(i, j)$, zachowując ustaloną interpretację.

Strukturę sieci transportowej, adekwatnie do (1) można przedstawić jako sieć S odwzorowującą jego charakterystyki. Sieć S zadana będzie jako uporządkowana para (\mathbf{G}, \mathbf{F}) wg zależności (9).

$$\mathbf{S} = (\mathbf{G}, \mathbf{F}) \quad (9)$$

gdzie:

\mathbf{G} – graf struktury korytarza transportowego $\mathbf{G} = \langle \mathbf{W}, \mathbf{M}, \mathbf{W} \rangle$,

F – suma zbioru funkcji określonych na łukach oraz wierzchołkach grafu struktury sieci transportowej.

Zbiór funkcji określonych na wierzchołkach grafu jest zbiorem pustym, dlatego też zbiór F można zapisać w następujący sposób:

$$F = \{f_k(i, j): (i, j) \in W \times W, i \neq j, k = 1, \dots, K\} \quad (10)$$

gdzie:

F – zbiór funkcji określonych na łukach grafu struktury ($[c(i,j)]$, $[d(i,j)]$), funkcja kosztów zewnętrznych określona na zbiorze łuków grafu w modelu decyzyjnym $[z(i,j)]$, funkcja aproksymowanych czasów przemieszczania określona na zbiorze łuków grafu w modelu decyzyjnym $[t(i,j)]$, $[x^{ab}]$,

K – liczba różnych funkcji (o różnej interpretacji) określonych na zbiorze łuków grafu, $f_k(i, j) \equiv f_{ij}^k \in \mathfrak{R}^+$ – to k -ta funkcja określona na łuku (i, j) , o ustalonej interpretacji wartości tej funkcji, dla $i = 1, \dots, K$.

Charakterystyka dróg obejmuje wyznaczenie: długości, prędkości z jaką można ją przebyć, przepustowości, natężenia ruchu oraz charakterystyki (jednostkowych) kosztów przemieszczania, Paszkowski i Kucharski (2017). Drogi wchodzące w skład analizowanego fragmentu sieci transportowej podzielono na łuki, które stanowią połączenia pomiędzy wyróżnionymi węzłami. Nazewnictwo łuków wprowadzone zostało w załączniku 1. Istotną pośród charakterystyk drogowych jest przepustowość łuku, którą definiuje się jako najmniejszą wartość ze zbioru, którego elementami są przepustowości odcinków wchodzących w jego skład. Zatem przepustowość łuku jest minimalną wartością ze zbioru wartości wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk obciążających poszczególne odcinki wchodzące w skład tego łuku. W przypadku transportu szynowego Gajda (1978) zdefiniował zdolność przepustowości linii kolejowej jako „największą liczbę pociągów lub wagonów o ustalonej masie, które można przepuścić przez dany odcinek w ustalonej jednostce czasu” (przytoczono za Kosicki 2015). Obciążenie ruchem poszczególnych odcinków dróg 1-6 wskazano w tabelach Z.1.12-Z.1.16.

Czas pokonania danego łuku to suma czasów pokonania jego kolejnych odcinków. Szczegóły dotyczące czasu przemieszczania na łukach dróg 1-6 podano w tabelach Z.6.1.-Z.6.6.

Prędkość pokonania łuku to iloraz jego długości i czasu w jakim zostanie on pokonany. Jest to w warunkach rzeczywistych prędkość operacyjna. W National Research Council (U.S.). Transportation Research Board (1989), powiązanej z Highway Capacity Manual (HCM-85), zdefiniowano ją jako „najwyższą prędkość podróży, z którą można jechać na danej drodze w korzystnych warunkach atmosferycznych i przy danych czynnikach ruchowych bez przekraczania prędkości bezpiecznej, określonej przez prędkość projektową poszczególnych odcinków drogi”.

Interesującym spostrzeżeniem są idealne warunki drogowo-ruchowe dla dróg dwupasowych dwukierunkowych, które zostaną wzięte pod uwagę przy ocenie rozwiązań poprzez dążenie do wyznaczenia trasy dla zbliżonych wartości tych parametrów. Zdefiniowano je następująco: prędkość projektowa $v_p \geq 100$ km/h, szerokość pasów ruchu 3,75 m, pobocza o szerokości co najmniej 1,80 m, wolne od przeszkód, brak odcinków, na których nie ma możliwości wyprzedzania, w ruchu występują jedynie samochody osobowe, równomierność kierunkowa ruchu (50/50%), ruch wzdłuż drogi nie jest zakłócony ruchem skręcających pojazdów lub sterowaniem ruchem, teren jest płaski (Gondek i Ostrowski 2017). Szczegóły dotyczące prędkości na łukach dróg 1-6 podano w tabelach Z.6.1.-Z.6.6.

Szczegółowe dane zostały zamieszczone w załączniku 1, w tym: charakterystyki odcinków dróg 1-6, wskazanie utrudnień na poszczególnych drogach, sposoby obliczania obciążenie ruchem dróg kołowych i szynowych wraz z wartościami obciążeń pasażerskich i towarowych dla dróg 1-6. Wykaz wyposażenia wojskowego przedstawiono w załączniku 5. W załączniku 2 natomiast przedstawiono przepustowości poszczególnych łuków analizowanych dróg. Dane te zostały wprowadzone do modelu decyzyjnego. Zgromadzone dane posłużą także do implementacji modelu decyzyjnego w opracowanym narzędziu komputerowym do poszukiwania rozwiązań metodami symulacyjnymi. Odległość drogowa między miejscowościami Rzeszów – Drawsko Pomorskie zależy od wybranego wariantu przejazdu.

3.2. Określenie zmiennych decyzyjnych

Zakłada się, że na iloczynie kartezjańskim $\mathbf{W} \times \mathbf{M}$ zadane jest odwzorowanie x , postaci wskazanej w zależności (11).

$$x : \mathbf{W} \times \mathbf{M} \rightarrow \mathfrak{R}^+ \quad (11)$$

przy czym wielkość $x((i,m,j),(\mathbf{a},\mathbf{b})) \in \mathfrak{R}^+$ ma interpretację liczby pojazdów przemieszczających wyposażenie wojsk po łuku o numerze m , łączącym miejscowości o numerach i oraz j . W dalszej części rozprawy stosowana będzie notacja $x((i,j),m) \equiv x(i,m,j)$ o ustalonej wcześniej interpretacji. Wielkość ta stanowi zmienną decyzyjną w modelu decyzyjnym.

Wartości liczbowe wielkości $x((i,m,j),(\mathbf{a},\mathbf{b})) \equiv x_{i|j,m}^{p,ab} \equiv x_{ij}^{p,ab}$ będą znane dopiero po rozwiązaniu formułowanego zadania optymalizacyjnego dotyczącego przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w ustalonych relacjach przegrupowania (m pominięto zgodnie z wcześniejszym objaśnieniem).

Przyjmuje się, że zbiór numerów wariantów modelu decyzyjnego oznaczony jest jako \mathbf{WR} . Wartościami tego zbioru są wskazane w zależności (12).

$$\mathbf{WR} = \{I, \dots, wr, \dots, WR\} \quad (12)$$

gdzie:

- wr – to zmienna określająca warianty modelu przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania w sieci transportowej,
- WR – to liczba wariantów modelu decyzyjnego.

Zakłada się, że na iloczynie kartezyjskim $\mathbf{XL} \times \mathbf{WR}$ zadane jest odwzorowanie przeprowadzające elementy iloczynu w zbiór liczb rzeczywistych nieujemnych – zależność (13).

$$\varphi : \mathbf{XL} \times \mathbf{WR} \rightarrow \mathfrak{R} \quad (13)$$

gdzie:

- φ – należy interpretować jako wielkość wyposażenia przemieszczanego w relacji przegrupowania (a, b) , p -tą drogą zawierającą łuk (i, j) w wr -tym wariantcie alternatywnego przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych: $\varphi(x((a, b), p, (i, j), wr)) \in \mathfrak{R}$;

- XL – zbiór o elementach postaci $x_{ij,m}^{p,ab}$ będących wielkościami w modelu przemieszczania wyposażenia wojsk, w ustalonych relacjach przegrupowania, po m -tym łuku pomiędzy wierzchołkami (i, j) , należącym do p -tej drogi w relacji przegrupowania (a, b) (w części obliczeniowej pracy pominięto oznaczenie m jako identyfikowalne na podstawie (i, j));
- WR – zbiór numerów wariantów alternatywnego przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania w sieci transportowej.

Kolejnym krokiem jest założenie, że odwzorowanie $\varphi(x((a, b), p, (i, j), r))$ jest odwzorowaniem jednostkowym, jak wskazało w zależności (14).

$$\begin{aligned} \varphi(x((a, b), p, (i, j), m, wr)) &= x((a, b), p, (i, j), m, wr) \\ x((a, b), p, (i, j), m, wr) &\equiv x(wr)_{ij,m}^{p,ab} \end{aligned} \quad (14)$$

Zatem zbiór XLR można zdefiniować jako zależność (15).

$$XLR = \left\{ x((a, b), p, (i, j), m, wr) \equiv x(wr)_{ij,m}^{p,ab}; (a, b) \in R; p \in P; (i, j) \in W \times W; m \in M; wr \in WR \right\} \quad (15)$$

Następnie dla ustalonych liczebności zbiorów R, P, W, M i WR , elementy zbioru XLR można zapisać w postaci macierzy wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, dla wr -tego wariantu realizacji przemieszczania wg zapisu (16).

$$X(wr) = \left[x(wr)_{ij,m}^{p,ab} \right] \quad (16)$$

gdzie:

- XLR – to zbiór o elementach postaci $x(wr)_{ij,m}^{p,ab}$ (patrz niżej),
- $X(wr)$ – to macierz wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, dla wr -tego wariantu realizacji przemieszczania,

- $x(wr)_{ij,m}^{p,ab}$ – wielkość przemieszczania wyposażenia wojsk p -tą drogą w relacji (a, b) , realizowana po m -tym łuku pomiędzy wierzchołkami (i, j) dla wr -tego wariantu realizacji przemieszczania,
- R – to zbiór par relacji przemieszczania wyposażenia wojsk w danej sieci transportowej, $R = \{(a, b): e(a, b) = 1; (a, b) \in A \times B\}$,
- W – to zbiór numerów węzłów, $W = \{1, \dots, i, \dots, j, \dots, W\}$,
- P – zbiór dróg wiążących początek relacji przegrupowania z jej końcem,
- WR – zbiór numerów wariantów alternatywnego przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania w sieci transportowej.

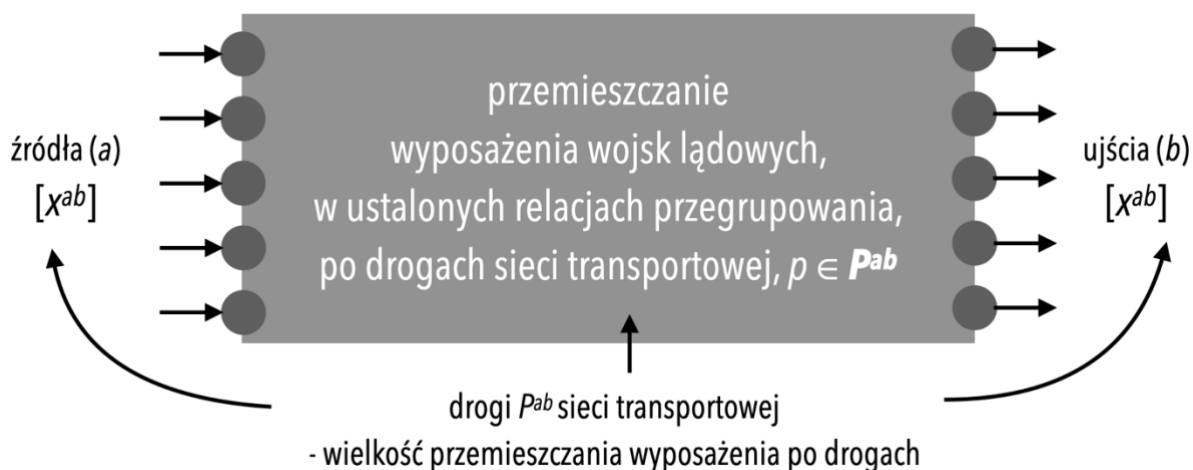
Dla potrzeb pracy przyjęto, że przemieszczanie wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, jest podstawą do optymalnej organizacji przemieszczenia. Istnieje również określone i stałe w określonych przedziałach czasowych zapotrzebowanie na takie przemieszczanie.

Za ustalony przedział czasowy w rozprawie doktorskiej przyjęto realizację jednego przebiegu przemieszczenia wyposażenia wojsk lądowych. Z założenia tego wynika, że w czasie przyjętego przedziału czasowego wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk, w ustalonych relacjach przegrupowania po poszczególnych drogach, są stałe.

Graficzna interpretacja przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych, w ustalonych relacjach przegrupowania, w modelu decyzyjnym została przedstawiona na rys. 6.

Sformułowanie zadania optymalizacyjnego przegrupowania wojsk lądowych, w analizowanych problemach, można ogólnie przedstawić w poniższy sposób.

Dla danej struktury multimodalnej sieci transportowej odwzorowanej grafem $G = \langle W, M \rangle$ w postaci macierzy incydencji oraz zbioru funkcji określonego na elementach tej struktury o interpretacji kosztu przemieszczenia, czasu przemieszczenia oraz przepustowości tras i dla zadanego w postaci macierzy relacji $[x^{ab}]$, zapotrzebowania na przemieszczanie wyznaczyć takie rozłożenie wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk na drogi, w ustalonych relacjach przegrupowania $[x(wr)_{ij,m}^{p,ab}]$, spełniające warunki i ograniczenia zadania optymalizacyjnego, dla którego funkcje kryterium przedstawione zależnościami (29), (37), (44) będą osiągać wartość minimalną dla poszukiwanej macierzy rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób), w ustalonych relacjach przegrupowania, w multimodalnym korytarzu transportowym $XL = [x(wr)_{ij,m}^{p,ab}]$.



Rys. 6. Ilustracja graficzna przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych, w ustalonych relacjach przegrupowania, w modelu decyzyjnym

Źródło: na podstawie Jacyna (2000, p. 61)

3.3. Określenie ograniczeń w modelu decyzyjnym

Przyjęto, że zbiór V jest zbiorem wierzchołków (węzłów) sieci transportowej znajdujących się wewnątrz tej sieci. Zbiór A jest zbiorem wierzchołków początkowych tej sieci, natomiast B jest zbiorem wierzchołków końcowych tej sieci.

Wierzchołek o numerze $x(i)$ jest wierzchołkiem znajdującym się wewnątrz sieci transportowej tzn. $x(i) \in V$, jeśli dla niego spełniony jest warunek $\Gamma x(i) \neq \emptyset \wedge \Gamma^{-1} x(i) \neq \emptyset$, tj. do wierzchołka o numerze $x(i)$ zachodzą inne łuki tej sieci, a także z tego wierzchołka wychodzą łuki do innych wierzchołków sieci transportowej.

Wierzchołek o numerze $x(i)$ jest wierzchołkiem początkowym sieci transportowej tzn. $x(i) \in A$, jeśli dla niego spełniony jest warunek $\Gamma x(i) = \emptyset \wedge \Gamma^{-1} x(i) \neq \emptyset$, tj. do wierzchołka o numerze $x(i)$ nie zachodzą inne łuki tej sieci, ale z tego wierzchołka wychodzą łuki do innych wierzchołków sieci transportowej.

Wierzchołek o numerze $x(i)$ jest wierzchołkiem końcowym sieci transportowej tzn. $x(i) \in B$, jeśli dla niego spełniony jest warunek: $\Gamma x(i) \neq \emptyset \wedge \Gamma^{-1} x(i) = \emptyset$, tj. do

wierzchołka o numerze $x(i)$ zachodzą inne łuki tej sieci, ale z tego wierzchołka nie wychodzą łuki do innych wierzchołków sieci transportowej.

Ograniczenie na nieujemność wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk, w ustalonej relacji przegrupowania w sieci transportowej wskazane zostało w postaci zależności (17).

$$\begin{aligned} \forall r \in P(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \quad \forall m \in \mathbf{M} \quad \forall (i, j) \in \mathbf{W} \times \mathbf{W} \\ x\left(\overline{(i(s), m(s), j(s)), r}\right) R\left(\overline{(i(s), m(s), j(s)), r}\right) \geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$s = \overline{1, P(\mathbf{a}, \mathbf{b}), r}$$

Warunki rozpoczęcia realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk, dla drogi o ustalonym początku w węźle $i(s) = \mathbf{a}$ wskazane zostało w postaci zależności (18).

$$\begin{aligned} \sum_{r \in P(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \sum_{j(1) \in \Gamma \mathbf{a}} \sum_{m(s) \in d(\mathbf{a}, \mathbf{b}, r)} \\ x\left(\overline{(i(s), m(s), j(s)), r}\right) R\left(\overline{(i(s), m(s), j(s)), r}\right) \leq \alpha(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \end{aligned} \quad (18)$$

Warunki nieprzekroczenia przepustowości drogi s , $s = \overline{1, P(\mathbf{a}, \mathbf{b}), r}$ wskazane zostały w postaci zależności (19).

$$\begin{aligned} \sum_{(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \in E} \sum_{r \in P(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \sum_{j(s) \in \Gamma i(s)} \sum_{m(s) \in d(\mathbf{a}, \mathbf{b}, r)} \\ x\left(\overline{(i(s), m(s), j(s)), r}\right) R\left(\overline{(i(s), m(s), j(s)), r}\right) \leq d\left(\overline{(i(s), m(s), j(s))}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

Warunek addytywności strumienia przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, wskazany został w postaci zależności (20).

$$\begin{aligned} \sum_{(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \in E} \sum_{r \in P(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \sum_{j(s) \in \Gamma i(s)} \sum_{m(s) \in d(\mathbf{a}, \mathbf{b}, r)} \\ x\left(\overline{(i(s), m(s), j(s)), r}\right) R\left(\overline{(i(s), m(s), j(s)), r}\right) = x\left(\overline{(i(s), m(s), j(s))}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

Warunek zachowania strumienia przemieszczania wyposażenia wojsk w przypadku wierzchołków $x(i) \in V$ znajdujących się wewnątrz sieci transportowej wskazany został w postaci zależności (21).

$$\begin{aligned} & \sum_{(a,b) \in E} \sum_{r \in P(a,b)} \sum_{j(s) \in \Gamma^{-1}i(s)} \sum_{m(s) \in d(a,b,r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) - \\ & + \sum_{(a,b) \in E} \sum_{r \in P(a,b)} \sum_{j(s) \in \Gamma i(s)} \sum_{m(s) \in d(a,b,r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Warunek zachowania strumienia przemieszczania wyposażenia wojsk dla wierzchołków $x(i) \in A$ stanowiących źródło strumienia opisany został zależnością (22).

$$\begin{aligned} & \sum_{(a,b) \in E} \sum_{r \in P(a,b)} \sum_{j(s) \in \Gamma^{-1}i(s)} \sum_{m(s) \in d(a,b,r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) - \\ & + \sum_{(a,b) \in E} \sum_{r \in P(a,b)} \sum_{j(s) \in \Gamma i(s)} \sum_{m(s) \in d(a,b,r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) = \\ & = -\alpha(a, b) \end{aligned} \quad (22)$$

Warunek zachowania strumienia pojazdów przemieszczających wyposażenie wojsk dla wierzchołków $x(i) \in B$ stanowiących ujście strumienia opisany został zależnością (23).

$$\begin{aligned} & \sum_{(a,b) \in E} \sum_{r \in P(a,b)} \sum_{j(s) \in \Gamma^{-1}i(s)} \sum_{m(s) \in d(a,b,r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) - \\ & + \sum_{(a,b) \in E} \sum_{r \in P(a,b)} \sum_{j(s) \in \Gamma i(s)} \sum_{m(s) \in d(a,b,r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) = \\ & = \alpha(a, b) \end{aligned} \quad (23)$$

Przemieszczanie wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania polega na wyborze takich dróg, aby zostały spełnione ich ograniczenia techniczne oraz ekonomiczne. Podstawowym ograniczeniem technicznym jest przepustowość drogi, wynikająca bezpośrednio z przepustowości poszczególnych jej odcinków, a ekonomicznym opłacalność kosztowa oraz wzmiankowane w kolejnych akapitach aspekty.

„Przepustowością elementu (składnika) sieci transportowej nazywamy największą intensywność (...) [przemieszczenia – dop. autora] ładunków (osób), którą możemy ten element obciążyć. Miarą przepustowości jest miara intensywności (...) [przemieszczenia – dop. autora] ładunków (osób), to znaczy liczba pojazdów, które mogą przejść przez przekrój drogi w jednostce czasu (...), która może przejść przez element sieci w jednostce czasu”, Leszczyński (1999, p. 57, 58). Zatem przepustowość danej drogi ograniczona jest od góry przepustowością należącym do niej odcinka o najmniejszej jej wartości.

Ograniczeniem ekonomicznym jest natomiast niewłaściwe wykorzystanie przepustowości, a mianowicie minimalne jej wykorzystanie pociąga za sobą wysokie jednostkowe koszty przemieszczania. Z drugiej strony, przekroczenie przepustowości drogi pociąga za sobą duże koszty przemieszczania spowodowane kosztami związanymi z kongestią ruchu.

Kongestia ruchu to „sytuacje prowadzące do strat czasu wynikających ze wspólnego użytkowania drogi (ogólnie elementu, składnika sieci transportowej) przez wiele pojazdów” uczestniczących w przemieszczeniu, Leszczyński (1999, p. 52). W pojęciu ogólnym kongestię nazywamy „sytuacje prowadzące do strat czasu wynikających ze wspólnego użytkowania urządzeń lub jednoczesnego zgłoszenia potrzeby obsługi ...”, Leszczyński (1999, p. 52).

Wielkość Δ oznacza miarę kongestii ruchu charakterystyczną dla wspólnego użytkowania drogi przez wiele pojazdów biorących udział w przemieszczaniu wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania (Jacyna-Gołda et al. 2014a).

$$\Delta = \tau_s - \tau_m \quad (24)$$

gdzie:

- Δ – wielkość kongestii ruchu,
- τ_s – czas średni konieczny na pokonanie drogi przez przeciętny pojazd,
- τ_m – czas minimalny konieczny na pokonanie drogi.

Przyjęto zatem, że dla każdego odcinka drogi są zadane ograniczenia techniczne i ekonomiczne, które określają uzasadnioną wielkość przemieszczania wyposażenia wojsk na każdym odcinku danej drogi.

Szczegółowe ograniczenia dotyczące parametrów techniczno-eksploatacyjnych i finansowych w zakresie zarówno infrastruktury rozpatrywanej sieci transportowej jak

i suprastruktury zostaną przedstawione w zakresie weryfikacji modelu decyzyjnego (rozdział 4).

3.4. Kryteria optymalizacyjne w modelu decyzyjnym

W rozprawie rozważane są trzy warianty rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych, w ustalonych relacjach przegrupowania ($WR = \{W1, W2, W3\}$) na drogi w badanej sieci transportowej:

- $W1$ – wariant pierwszy powstał w oparciu o stan obecny, tzn. dotyczy rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w zakresie realizacji przegrupowania na istniejące drogi;
- $W2$ – wariant drugi zakłada półtorakrotny wzrost wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w zakresie realizacji przegrupowania na istniejące drogi;
- $W3$ – wariant trzeci zakłada zastosowanie nieprzewidywalnych, nieoczekiwanych zdarzeń w trakcie realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk (bez przyrostu wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk).

Wariant $W1$ został rozpatrzony przy zastosowaniu metod analitycznych (w modelu decyzyjnym) oraz symulacyjnych (wobec ich porównania). Pozostałe dwa warianty zostaną rozpatrzone przy wykorzystaniu modelu symulacyjnego opisanego w dalszej części rozprawy. Analizy dokonane w oparciu o wariant $W1$ posłużą jako podstawa do przeprowadzenia weryfikacji modelu symulacyjnego. Przeprowadzona zostanie analiza dla ruchu w transporcie drogowym i szynowym, a każdy wariant poddawany będzie ocenie z punktu widzenia kosztów średnich, kosztów zewnętrznych, czasu realizacji przemieszczania. Przyjęto, że kryteriami cząstkowymi rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk XL w każdym wariantcie wr , $wr \in WR$, będą:

- $F(XL)$ – koszt średni;
- $F_2(XL)$ – koszt zewnętrzny;
- $F_3(XL)$ – czas przebiegu przegrupowania.

3.4.1. Założenia ogólne i charakterystyka kryteriów optymalizacji

Racjonalne przemieszczenie wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, możliwe jest poprzez sformułowanie zadania optymalizacyjnego. Na ogół

istnieje wiele wariantów rozwiązań dopuszczalnych dla zadania optymalizacji wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania. Celem uzyskania optymalnego rozłożenia należy opracować kryteria rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk na drogi przemieszczania.

Jak ustalono, rozłożenie przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania polega na wyborze takich dróg, aby zostały uwzględnione ich ograniczenia techniczne oraz ekonomiczne. Przez pojęcie rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, rozumie się wyznaczenie wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w sieci transportowej, które polega na takim przydzieleniu wielkości partii wyposażenia $x(wr)_{ij,m}^{p,ab}$ poszczególnym połączeniom sieci transportowej (i, j) , $(i, j) \in L$, (L jest zbiorem łuków (i, j) grafu struktury sieci transportowej), aby techniczne i technologiczne ograniczenia zostały spełnione, $x(wr)_{ij,m}^{p,ab} \in XL$. Dla przypomnienia XL to zbiór o elementach postaci $x(wr)_{ij,m}^{p,ab}$, będących wielkościami wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, przemieszczanego po tym m -tym łuku pomiędzy wierzchołkami (i, j) , należącym do p -tej drogi w relacji przegrupowania (a, b) . Rozkładanie przemieszczania wyposażenia wojsk na sieci transportowej jest zatem zadaniem polegającym na znalezieniu rozwiązania dopuszczalnego rozłożenia, przy jednoczesnym nieodstępowaniu od globalnie (tj. dla wszystkich rozwiązań) przyjętych ograniczeń.

Poprawne rozłożenie wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w rozpatrywanej relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie powinno być przeprowadzone takimi działaniami, aby doprowadzić do pełnej obsługi potrzeb przewozowych w zakresie przemieszczania przy możliwie najniższych kosztach lub możliwie najkrótszym czasie realizacji, analogicznie do rozłożenia potoku ruchu (Jacyna 2001, p. 64). Dlatego też jednym z kryteriów rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w sieci transportowej jest kryterium minimalnych kosztów ponoszonych przez potencjalnego nabywcę usług transportowych, w tym przypadku przez wojska lądowe (rozprawa nie jest zlecona na rzecz Wojska Polskiego, wobec czego pada określenie „potencjalny nabywca”). Przy czym koszty mogą być interpretowane w sposób niejednoznaczny, tj. różni nabywcy i uczestnicy rynku transportowego, będący interesariuszami systemu transportowego, mogą inaczej pojmować koszty.

Za rozwiązaniem zadania optymalizacyjnego dotyczącego rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania w sieci

transportowej uważa się wartość liczbową ładunków (osób) przemieszczanych w badanej relacji (czyli po węzłach i łukach określonej sieci transportowej), dla którego przyjęte kryterium oceny rozwiązania (np. minimalny koszt, maksymalna wielkość przemieszczenia itp.) osiąga wartość ekstremalną, przy spełnieniu warunków (warunki te są dokładniej przedstawione w dalszej części pracy jako zależności (30)-(36)):

- ograniczeń sieci transportowej (np. koszt przewozu uwzględniający wielkość przewozu na danym połączeniu lub węźle czy przepustowość węzła lub połączenia),
- warunków wynikających z realizacji zapotrzebowania na przemieszczenie,
- warunków dotyczący fizycznej interpretacji wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania (nieujemności, addytywności oraz zachowania wielkości przemieszczanego wyposażenia).

Najbardziej klasyczną miarodajną formą określania funkcji kryterium są koszty, które związane są z przemieszczaniem pojazdów (służących do przewozu wyposażenia wojsk) w systemie transportowym. Są one nazywane kosztami przemieszczania. Jednostki jakimi należy się posługiwać w przypadku tego typu kalkulacji to jednostki czasu, odległości albo jednostki pieniężne, Leszczyński (1999, p. 46). Ponadto koszt ten może być rozpatrywany w różnych kategoriach, a mianowicie: w kategorii handlowej (z punktu widzenia nabywcy usług transportowych; funkcja kryterium przyjmuje postać minimalnego kosztu), ekonomicznej (z punktu widzenia dostawcy usług transportowych; funkcja kryterium przyjmuje postać maksymalnego zysku) i technicznej (dla celów modelowania potrzeb systemów transportowych; funkcja kryterium przyjmuje postać wskaźnika oceny jakości usług), Jacyna (2001, p. 56). Warto zwrócić uwagę na fakt, że wyznaczając koszt transportu w kategoriach technicznych należy brać pod uwagę koszt całego procesu przewozowego, w tym koszt przemieszczania wyposażenia oraz koszt związany z pobytem wyposażenia w węźle transportowym (uważa się zatem, że warte rozpatrzenia są tzw. koszty zewnętrzne, o których wzmiankowane będzie w dalszej części pracy).

Ponadto koszt przemieszczenia uzależniony jest od intensywności przemieszczania wyposażenia wojsk, którym obciążony jest dany element systemu transportowego.

Koszt przemieszczania wyposażenia wojsk p -tą drogą w relacji (a, b) jest wskazany w postaci zależności (25).

$$c(wr)^{p,ab} = \sum_{(i,j) \in L} c(wr)_{ij}^{p,ab} \quad (25)$$

gdzie:

- $c(wr)_{ij}^{p,ab}$ – koszt przemieszczania wyposażenia wojsk, po tym m -tym łuku pomiędzy wierzchołkami (i, j) , należącym do p -tej drogi w relacji przegrupowania (a, b) , przy założeniu, że po tym łuku przemieszczane jest wyposażenie wojsk o wielkości $x(wr)_{i|j,m}^{p,ab}$,
- $c(wr)^{p,ab}$ – koszt przemieszczania wyposażenia wojsk p -tą drogą w relacji przegrupowania (a, b) .

Przy ustalaniu kosztów w modelu decyzyjnym wzięto pod uwagę średnie ceny kilometra w ruchu pasażerskim oraz transporcie towarowym. Procent pojazdów umownych (sposób translacji pojazdów rzeczywistych do postaci pojazdów umownych poddano szczegółowemu przedstawieniu w załączniku 1.) stanowiących pojazdy przewożące pasażerów wynosi odpowiednio – droga 1: 73%, droga 2: 70%, droga 3: 77%, droga 4: 71%, droga 5: 75%. Pozostałe to pojazdy przewożące ładunki. Przyjmując koszt przewozu pasażera środkami transportu publicznego na poziomie 0,20 [zł] oraz samochodem osobowym na poziomie 0,66 [zł] (poniżej przedstawiono dokładniejsze wytyczne), a także koszt przewozu ładunku na poziomie 3,74 [zł/km], można obliczyć średni koszt przypadający na kilometr w ruchu drogowym. Przyjmując powyższe założenia ustalono koszt realizacji przejazdu na długości jednego kilometra na poziomie 1,32 [zł/km].

Koszt przewozu pasażera samochodem osobowym określono na podstawie strony internetowej: <http://paliwo.ulewa.com/koszt-na-1-km> (dostęp on-line 12 sierpnia 2021 r.). Przy średnim spalaniu na poziomie 11,0 litrów na 100 kilometrów koszt w przeliczeniu na 1 [km] wyniósłby 0,63 [zł]. Koszt podróży uwzględnia dodatkowy ciężar kierowcy (przyjęto 86 [kg]): 0,66 [zł] zatem przyjęto, że pasażerowie generują koszt rzędu 0,03 [zł] dodatkowych kosztów za osobę. Koszt na 1 osobę wyniósłby zatem 0,66 [zł]. Warto zauważyć, że oszacowanie nie obejmuje takich zmiennych jak zużycie oleju i innych płynów eksploatacyjnych, wymiana opon, naprawa samochodu, regeneracja klimatyzacji, zniżenie wartości samochodu przy zwiększonym przebiegu, itp. Wartość dodatkowych kosztów zmieniałaby się tylko o części ułamkowe grosza, zatem w ww. źródle zaproponowano dodawanie od dwóch do dziesięciu groszy (jeśli samochód jest drogi w utrzymaniu) do wzmiankowanego kosztu. Koszt przemieszczenia 1 pasażera na odcinku 1 [km] tj. 0,20 [zł] podano po dokonaniu uśrednienia wartości wskazanych w artykule Ignaciuk et al. (2016) – (0,0155; 0,0210; 0,0255) [zł].

W przypadku kosztów przewozu ładunków informacje pozyskane zostały w oparciu o stronę internetową: <https://firetms.com/pl/blog/jak-wyznaczyc-stawke-za-km-zlecenia-transportowego/> (dostęp on-line 12 sierpnia 2021 r.). Koszty uwzględniają koszty paliwa, opłaty drogowe, podatki, wynagrodzenie kierowcy (w tym ZUS), diety, delegacje, ryczałt, amortyzację auta, koszty materiałów eksploatacyjnych, opon, koszty pustych przebiegów.

Warto przy tym mieć na uwadze, że w przypadku wojsk lądowych „w celu skorzystania z bezpłatnego przejazdu autostradami, dysponenci pojazdów są zobowiązani do uprzedniego zgłoszenia przejazdu, potwierdzonego przez osobę odpowiedzialną za prowadzenie gospodarki samochodowej w jednostce wojskowej lub jego przełożonego (...) najpóźniej na dwa dni robocze przed planowanym przejazdem, odpowiednio do: Szefa Oddziału Transportu i Ruchu Wojsk Logistyki Pomorskiego Okręgu Wojskowego, w przypadku przejazdu autostradą A1 i A2; Szefa Oddziału Transportu i Ruchu Wojsk Logistyki Śląskiego Okręgu Wojskowego, w przypadku przejazdu autostradą A4”, Brykowski et al. (2008).

W przypadku transportu szynowego, koszt przemieszczania dla przewozów na trasie Rzeszów – Drawsko Pomorskie ustalono na podstawie realizowanych transportów kolejowych przez 21 BSP. Cena jednostkowa przewozu jednego pojazdu umownego wynosi średnio 0,45 [zł/km].

Do niedawna transport ładunkowy wojsk lądowych nie odbywał się w dużej mierze transportem szynowym. Jak zauważono w rozdziale 1.2., do tej pory przemieszczanie wyposażenia wojsk realizowany był sposobem kombinowanym – żołnierze oraz pojazdy kołowe przemieszczały się po drogach kołowych, zaś ciężki sprzęt podlegał transportowi po drogach szynowych (Kowalski 2010). Jednakże Madrjas (2021) poinformował, że PKP Cargo jako gwarantem ciągłości towarowych przewozów kolejowych dla realizacji procesów związanych z krajowymi siłami zbrojnymi (natomiast w przypadku przewozów osobowych jest to PKP Intercity, o czym wzmiankowano we wcześniejszych fragmentach pracy w rozdziale 1.2.) i jako takie, przedsiębiorstwo podjęło się realizacji zamówienia na świadczenie usług przemieszczania transportem kolejowym sprzętu wojskowego na potrzeby jednostek organizacyjnych resortu obrony narodowej, w komunikacji krajowej i międzynarodowej.

Występujące w rozprawie doktorskiej trzy warianty rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania będą różniły się zbiorem danych.

Łuki występujące w odwzorowaniu struktury (rys. 5) zostaną opisane przez przepustowość, jednostkowy koszt jego przejścia oraz koszt zewnętrzny. Zatem $k = 1, 2, 3$, zaś

charakterystyka $d(i, j)$ odpowiada – przepustowości, $c(i, j)$ – jednostkowemu kosztowi przejścia przez ten łuk, a $z(i, j)$, – zewnętrznemu kosztowi przejścia przez ten łuk.

Charakterystyki te zostaną sporządzone dla przewozów pasażerskich i przemieszczania sprzętu wojskowego), i ustalone zostaną na podstawie źródeł wskazanych w dalszej części pracy. Łuki w węzłach głównych odwzorowują jedynie możliwość wyboru danego połączenia między wyróżnionymi węzłami. Ich koszty przejścia są równe zeru, a ich przepustowość nie ogranicza przepustowości całej drogi (nie wpływają na wybór wariantu rozwiązania). Pozostałe łuki w węzłach głównych, które w rzeczywistości odwzorowują połączenia między danym węzłem a początkiem lub końcem danego połączenia między węzłami będą opisane rzeczywistą charakterystyką techniczno–ekonomiczną połączeń.

Charakterystyki łuków relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie dla przewozów pasażerskich i ładunkowych przedstawiono odpowiednio w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyki łuków relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie

Łuk	$d(i, j)$ – przepustowość [pojazdy umowne/h]		$c(i, j)$ – jednostkowy koszt przejścia (średni) – dla 1 pojazdu umownego		$z(i, j)$ – jednostkowy koszt przejścia – dla 1 pojazdu umownego
	[poc./ godz.]	[poj. umown./ godz.]	0,66 zł/km dla osób	3,74 zł/km dla ładunków (0,45 zł/km – tr. szyn.)	
<i>i</i>	2A	2B	3A	3B	4
1 (1, 2)	-	571,2	153,78	871,42	2961,55
2 (2, 3)	-	571,2	12,54	71,06	241,50
3 (3, 4)	-	571,2	43,30	245,34	833,81
4 (4, 5)	-	504	199,32	1129,48	3838,58
5 (5, 6)	-	504	30,49	172,79	587,23
6 (6, 7)	-	504	21,58	122,30	415,63
7 (7, 8)	-	504	31,55	178,77	607,56
8 (8, 9)	-	504	14,59	82,65	280,90
9 (9, 10)	-	504	42,90	243,10	826,18
10 (10, 11)	-	504	25,15	142,49	484,27
11 (11, 13)	-	504	20,92	118,56	402,92
12 (1, 14)	-	504	5,02	28,42	96,60
13 (14, 15)	-	504	17,09	96,87	329,20
14 (15, 16)	-	504	0,73	4,11	13,98
15 (16, 17)	-	504	148,50	841,50	2859,87
16 (17, 18)	-	504	102,30	579,70	1970,13
17 (18, 19)	-	504	90,42	512,38	1741,34

Tabela 1. Charakterystyki łuków relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie

Łuk	$d(i, j)$ – przepustowość [pojazdy umowne/h]		$c(i, j)$ – jednostkowy koszt przejścia (średni) – dla 1 pojazdu umownego		$z(i, j)$ – jednostkowy koszt przejścia – dla 1 pojazdu umownego
	[poc./ godz.]	[poj. umown./ godz.]	0,66 zł/km dla osób	3,74 zł/km dla ładunków (0,45 zł/km – tr. szyn.)	
<i>l</i>	2A	2B	3A	3B	4
18 (19, 20)	-	504	39,01	221,03	751,19
19 (20, 21)	-	504	77,88	441,32	1499,84
20 (21, 22)	-	504	21,71	123,05	418,18
21 (22, 5)	-	504	117,48	665,72	2262,47
22 (1, 23)	-	504	140,58	796,62	2707,34
23 (23, 3)	-	672	28,578	161,94	550,37
24 (3, 24)	-	672	11,88	67,32	228,79
25 (24, 22)	-	672	102,30	579,70	1970,13
26 (22, 25)	-	672	33,20	188,12	639,34
27 (25, 26)	-	672	152,46	863,94	2936,13
28 (26, 27)	-	571,2	31,88	180,64	613,92
29 (27, 28)	-	571,2	10,30	58,34	198,28
30 (28, 10)	-	571,2	58,67	332,47	1129,97
31 (1, 29)	-	504	35,38	200,46	681,28
32 (29, 30)	-	504	37,42	212,06	720,69
33 (30, 31)	-	504	41,18	233,38	793,14
34 (31, 32)	-	504	64,81	367,27	1248,17
35 (32, 33)	-	624,96	30,89	175,03	594,85
36 (33, 34)	-	624,96	9,44	53,48	181,76
37 (34, 35)	-	624,96	9,97	56,47	191,93
38 (35, 36)	-	624,96	33,66	190,74	648,24
39 (36, 37)	-	624,96	18,48	104,72	355,89
40 (37, 38)	-	571,2	15,38	87,14	296,16
41 (38, 39)	-	571,2	48,05	272,27	925,33
42 (39, 28)	-	571,2	20,13	114,07	387,67
43 (28, 40)	-	504	47,09	266,66	906,26
44 (40, 10)	-	504	18,68	105,84	359,71
45 (10, 41)	-	504	18,94	107,34	364,79
46 (41, 42)	-	504	9,83	55,73	189,39
47 (42, 13)	-	504	20,13	114,07	387,67
48 (1, 43)	-	571,2	36,56	207,20	704,16
49 (43, 44)	-	571,2	25,48	144,36	490,63
50 (44, 45)	-	672	240,24	1361,36	4626,63

Tabela 1. Charakterystyki łuków relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie

Łuk	$d(i, j)$ – przepustowość [pojazdy umowne/h]		$c(i, j)$ – jednostkowy koszt przejścia (średni) – dla 1 pojazdu umownego		$z(i, j)$ – jednostkowy koszt przejścia – dla 1 pojazdu umownego
	[poc./ godz.]	[poj. umown./ godz.]	0,66 zł/km dla osób	3,74 zł/km dla ładunków (0,45 zł/km – tr. szyn.)	
<i>l</i>	2A	2B	3A	3B	4
51 (45, 39)	-	624,96	120,12	680,68	2313,32
52 (11, 12)	-	504	11,02	62,458	212,27
53 (12, 13)	-	504	7,92	44,88	152,53
54 (1, 46)	0,66666667	18,13333333	60,06	40,95	1156,66
55 (46, 47)	0,66666667	18,13333333	44,88	30,60	864,32
56 (47, 48)	0,16666667	4,53333333	48,84	33,30	940,58
57 (48, 49)	0,16666667	4,53333333	51,48	35,10	991,42
58 (49, 50)	0,625	17	16,50	11,25	317,76
59 (50, 51)	0,66666667	18,13333333	5,28	3,60	101,68
60 (51, 52)	0,66666667	18,13333333	14,52	9,90	279,63
61 (52, 53)	0,66666667	18,13333333	16,50	11,25	317,76
62 (53, 54)	0,66666667	18,13333333	9,24	6,30	177,95
63 (54, 39)	0,54166667	14,73333333	179,52	122,40	3457,26
64 (39, 55)	0,58333333	15,86666667	231,66	157,95	4461,39
65 (55, 56)	0,58333333	15,86666667	133,32	90,90	2567,53
66 (56, 13)	0,58333333	15,86666667	138,60	94,50	2669,21

Źródło: opracowanie własne na podstawie tabel Z.2.1.-Z.2.6.

Uwaga do tabeli 1 – w tabelach podanych jako źródłowe nazwy miejscowości nie odzwierciedlają sensu stricto nazw z tabel tożsamyh, wskazanych w źródłach (Z.2.1.-Z.2.6.) – zależy to od stopnia dokładności pozyskanych danych, przy czym dane były odpowiednio weryfikowane w okresie pozyskiwania ich dla modelu decyzyjnego przedstawionego w rozprawie. W przypadku transportu szynowego dokonano przeliczenia zamieszczonych w tabeli Z.2.6. liczb pociągów na dobę (tabela 1, kolumna 2A) na liczbę pojazdów umownych na godzinę (tabela 1, kolumna 2B). Przeliczenie liczby pociągów na pojazdy umowne przebiegało według następującego toku myślenia. Przyjęto, że średnio w autokarze znajduje 55 miejsc siedzących, a zatem przyjęto, że wypełnieniu osobami dwóch autokarów odpowiada wypełnienie jednego wagonu (dla ułatwienia obliczeń pominięto przewozy ładunków), a przy tym przyjęto, że pociąg składa się średnio z 8 wagonów, zatem ta liczba odpowiadałaby 16 autokarom. Po uwzględnieniu wartości współczynnika przeliczeniowego dla samochodów

dostawczych i autobusów $w_{sda} = 1,7$ liczba pociągów wyrażona w pojazdach umownych/godzinę wskazano w kolumnie 2B tabeli 1.

W przypadku obliczeń dotyczących kosztów zewnętrznych policzono je z myślą o pełnej liczbie osób podlegających przegrupowaniu. Wziąwszy pod uwagę zawartości tabeli 4 i 5 rozpatrzono następujące składowe kosztów zewnętrznych: wypadki drogowo-transportowe, zatory drogowe, zanieczyszczenie atmosfery, hałas, zmiany klimatyczne, pośrednie koszty działalności transportowej, defragmentacja terenu, straty bioróżnorodności, zanieczyszczenie wód i gleby, i koszty dotyczące efektu urbanizacji. Jak nadmieniono uprzednio, koszty zewnętrzne są trudne do oszacowania, z tego też powodu na podstawie kilometrażu poszczególnych łuków oraz przyjętej liczby osób podlegających przemieszczaniu wyznaczono wartości pracy przewozowej. Wartości te następnie zostały porównane i podzielone przez wartości wyrażone w $[zł/10^6 \text{ pas. km}]$ – wartość pracy przewozowej dla danego łuku podzielono przez 10^6 , a następnie pomnożono przez kurs euro z dnia 23 sierpnia 2021 r., aby otrzymać wartości w złotych – w ten sposób potraktowano cztery pierwsze pozycje w powyżej nadmienionym katalogu kosztów zewnętrznych tj. wypadki drogowo-transportowe, zatory drogowe, zanieczyszczenie atmosfery, hałas. Z uwagi na fakt występowania większej liczby składowych kosztów zewnętrznych postanowiono porównać zawartości tabel 4 i 5. W tabelach tych występują składowe wypadki drogowo-transportowe, zanieczyszczenie atmosfery, hałas. Zliczono zatem sumę tych trzech kategorii i potraktowano jako 58% łącznych kosztów zewnętrznych dla danego łuku. Na podstawie tabeli 5 określono procenty przypadające na pozostałe kategorie kosztów zewnętrznych i tak kolejno zmiany klimatyczne – 29%, pośrednie koszty działalności transportowej – 9%, defragmentacja terenu – 1%, straty bioróżnorodności – 1% (wartość zaokrąglono do pełnego procenta, aby wszystkie koszty stanowiły 100%), zanieczyszczenie wód i gleby – 1% i koszty dotyczące efektu urbanizacji – 1%. Autor pracy naturalnie ma świadomość, że nie są to wszystkie koszty zewnętrzne ponoszone w efekcie działalności transportowej, niemniej jednak ukazują one efekt skali. W tabeli 1 zamieszczono zliczone koszty zewnętrzne dla poszczególnych łuków, natomiast w tabeli Z.4.1. zamieszczono dokładne wartości przypadające na poszczególne kategorie kosztów zewnętrznych w przypadku przewozów pasażerskich. W przypadku transportu szynowego kalkulacji dokonano w oparciu o informację, iż jednostkowe koszty zewnętrzne w przypadku transportu szynowego są do około 5 razy mniejsze niż w przypadku transportu samochodowego, Rydzyński (2004, p. 20), stąd też w przypadku łuków 53-65 uzyskane wartości podzielono przez 5 celem uproszczenia obliczeń.

W załączniku 3. przedstawiono macierz incydencji pomiędzy poszczególnymi łukami. Z uwagi na rozmiary macierzy i czasochłonność jej wypełniania, pozostałe z macierzy nie zostają przedstawione w postaci matematycznej, natomiast zestawienie danych zamieszczono w tabeli Z.4.1., a implementacji dokonano w oprogramowaniu. Koszt krańcowy drogi obliczono sumując koszty jednostkowe wszystkich łuków wchodzących w skład danej drogi. W ten sposób otrzymano koszty transportu dla każdej drogi przewozu. Zgodnie z analizami przedstawionymi powyżej ustalono koszt jednego kilometra na poziomie 0,66 [zł/km] w przypadku osób i 3,74 [zł/km] w przypadku ładunków przewożonych środkami transportu drogowego. Natomiast w przypadku ładunków przewożonych środkami transportu szynowego koszt ten wynosi 0,45 [zł/km], a w przypadku osób przyjęto identyczny jak w przypadku transportu drogowego. Takie koszty jednostkowe zostały wykorzystane do obliczeń przedstawionych w tabelach 1 i Z.4.1.

Jak wskazano w celu pracy, w szeregach 21 BSP służy około 4,5 tysiąca osób (Polska Zbrojna 2014). Przyjęto zatem, że tyle osób podlegać będzie przemieszczaniu w modelu decyzyjnym. W tabelach 1 i Z.4.1. rozpatrzono pojazdy umowne w związku z czym dokonano aproksymacji liczby osób na liczbę pojazdów umownych. Dokonano założenia, że przejazd autokarem (w ostatnim czasie zakupionym przez wojsko), na podstawie strony internetowej <http://www.bptour.pl/autokar-irizar-ilosc-miejsc-67-1-1-,81.html> (dostęp online 19 sierpnia 2021 r.), dotyczyć może 67 osób, zatem $4500/67 = 62$ pojazdów co oznacza 115 pojazdów umownych.

W przypadku przemieszczania wyposażenia wojsk wobec określenia liczby pojazdów umownych posłużono się innymi współczynnikami przeliczeniowymi niż w przypadku załącznika 1. Mianowicie zastosowano wartości współczynników przeliczeniowych dla pojazdów ciężarowych i rekreacyjnych na pojazdy umowne podając za Gaca et al. (2008), jako że nie stwierdzono występowania w literaturze współczynników przeliczeniowych dla pojazdów wojskowych. Potraktowano pojazdy wojskowe jako pojazdy ciężarowe (ze wskazanymi wyjątkami), zakres natężeń ruchu w przekroju przyjęto jako 0-600, a teren jako falisty, wzięto pod uwagę przypadek obliczania pojazdów w kolumnie, zatem współczynnik wynosi 1,8, chyba że wskazano inaczej. Efekty przeliczania pojazdów wyposażenia wojsk lądowych na pojazdy umowne przedstawiono w tabeli Z.5.1. Tabela ta została opracowana na podstawie stanu faktycznego wyposażenia wojsk rozpatrywanej brygady, przy czym z uwagi na tajność dokumentacji liczby środków transportu zostały zmodyfikowane.

3.4.2. Kryterium kosztów średnich

„Kryterium kosztów średnich, stosowane przy ocenie rozłożenia potoku ładunków (osób) w multimodalnym korytarzu transportowym, traktować można jako ocenę kosztów przewozu z punktu widzenia nabywców usług transportowych”, Jacyna (2004, p. 13), w tym przypadku można je rozpatrzyć z punktu widzenia wojsk lądowych w modelu przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania.

Wybór drogi jest dokonywany tak, by przynosił największe możliwe korzyści w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk, a przy tym minimalizował straty wynikłe z przemieszczania.

W dowolnej relacji (a, b) , istnieje wiele dróg łączących wierzchołki a i b . Wybór konkretnej drogi przez każdego z uczestników (kierujących pojazdami) jest rezultatem wielu decyzji. Niemniej jednak od wyboru drogi nie jest uzależniony ich zysk – żaden decydent nie może zwiększyć swojej korzyści (zmniejszyć strat) zmieniając wybraną drogę na inną. Takie rozłożenie wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk (ładunków, osób), w ustalonych relacjach przegrupowania jest rozłożeniem równowagi, zapisuje się jako zależność (26).

$$c^{p,ab}(XL) = c^{p',ab}(XL) = \min c^{p,ab}(XL) \quad (26)$$

gdzie:

- $c^{p,ab}(XL)$ – interpretowane jest jako wartość kosztów średnich dla wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk realizowanego p -tą drogą w relacji (a,b) ;
- $c^{p',ab}(XL)$ – interpretowane jako wartość kosztów średnich dla wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk realizowanego p' -tą drogą w relacji (a,b) ;
- XL – jest wektorem o elementach $x(i(s),j(s)) \equiv x_{ij}$, które interpretuje się jako wielkość przemieszczanych po $m(s)$ zawartym między wierzchołkami $i(s)$ i $j(s)$ sieci transportowej.

Powyższe wyrażenie osiąga wartość minimalną dla każdej relacji (a, b) oraz dla różnych dróg p i p' tej relacji. Oznacza to również, że średni koszt przejazdu po każdej z wykorzystywanych dróg w tej relacji jest jednakowy.

Wobec tego zgodnie z warunkami równowagi minimalna wartości kosztu średniego jest jednocześnie średnim kosztem przemieszczania wyposażenia wojsk każdą z dróg relacji przegrupowania. Należy również zauważyć, że wielkość ta jest charakterystyczna dla danego układu sieci transportowej i dla danej wielkości zapotrzebowania na przemieszczenie $[x^{ab}]$, Jacyna (2004, p. 14).

Optymalizacja rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania według kryterium kosztu średniego pozwala na odpowiedni dobór przedsiębiorstw świadczących usługi transportowe.

Optymalizacja rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, według kryterium kosztu średniego, pozwoli na dobór najbardziej korzystnej oferty spośród dostępnych na rynku przewozowym.

W modelowaniu systemów transportowych na potrzeby przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych konieczna jest znajomość średniego kosztu przemieszczenia wyposażenia wojsk po łuku (i, j) . Wartość tą można obliczyć według zależności (27).

$$c(wr)_{ij}^{p,ab} = \frac{K(wr)_{ij}^{p,ab}}{x(wr)_{ij,m}^{p,ab}} \quad (27)$$

gdzie:

- $c(wr)_{ij}^{p,ab}$ – koszt przemieszczania wyposażenia wojsk, po tym m -tym łuku pomiędzy wierzchołkami (i, j) , należącym do p -tej drogi w relacji przegrupowania (a, b) , przy założeniu, że po tym łuku przemieszczane jest wyposażenie wojsk o wielkości $x(wr)_{ij,m}^{p,ab}$,
- $K(wr)_{ij}^{p,ab}$ – całkowity koszt przemieszczania wyposażenia wojsk, o wielkości $x(wr)_{ij,m}^{p,ab}$ p -tą drogą w relacji (a, b) , pomiędzy wierzchołkami (i, j) dla wr -tego wariantu realizacyjnego,
- $x(wr)_{ij,m}^{p,ab}$ – wielkość wyposażenia wojsk (ładunków, osób), przemieszczanego p -tą drogą w relacji (a, b) , po tym m -tym łuku pomiędzy wierzchołkami (i, j) dla wr -tego wariantu realizacyjnego.

Koszt średni przemieszczania jednostki wyposażenia wojsk po łuku (i, j) to iloraz kosztu całkowitego $K(wr)_{ij}^{p,ab}$ do wielkości potrzeb przewozowych dotyczących wyposażenia $x(wr)_{ij,m}^{p,ab}$, przemieszczających się po danym elemencie struktury sieci transportowej.

Średni koszt jednostki przemieszczenia w relacji będzie zatem tożsamy z zależnością (28).

$$c(wr)^{p,ab} = \frac{K(wr)^{p,ab}}{x(wr)^{p,ab}} \quad (28)$$

gdzie:

- $c(wr)^{p,ab}$ – koszt średni jednostki przemieszczenia w relacji (a, b) ,
- $K(wr)^{p,ab}$ – koszt całkowity realizacji przemieszczenia w relacji (a, b) ,
- $x(wr)^{p,ab}$ – wielkość potrzeb w zakresie przemieszczenia w relacji (a, b) .

W zadaniu rozłożenia przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, istnieje wiele rozwiązań i dopiero wprowadzenie dodatkowych kryteriów pozwala uzyskać jedno rozwiązanie.

Do oceny rozłożenia ładunków w badanej relacji przyjęto kryteria ekonomiczne, czyli kryterium kosztów średnich, ale również kosztów zewnętrznych. Powyższe kryteria cząstkowe składają się bowiem na społeczny koszt transportu, który podlega szerszemu opisowi w kolejnej sekcji pracy.

Przedmiotem zadania optymalizacyjnego rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk z kryterium kosztów średnich jest minimalizacja funkcji kryterium postaci (29).

$$F(\mathbf{XL}) = c^{p,ab}(\mathbf{XL}) = c^{p',ab}(\mathbf{XL}) \wedge \min c^{p,ab}(\mathbf{XL}) \quad (29)$$

przy spełnieniu poniższych ograniczeń (30)-(36).

Pierwszym z ograniczeń jest ograniczenie na nieujemność rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania na połączenia sieci transportowej (30).

$$\begin{aligned} \forall r \in \mathbf{P}(a,b) \quad \forall m \in \mathbf{M} \quad \forall (i,j) \in \mathbf{W} \times \mathbf{W} \\ x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) \geq 0 \end{aligned} \quad (30)$$

$$s, s = \overline{1, P((\mathbf{a}, \mathbf{b}), r)}$$

Drugim z ograniczeń jest warunek rozpoczęcia realizacji zadania przemieszczania wyposażenia wojsk, dla połączenia dróg o ustalonym początku w węźle $i(s) = \mathbf{a}$, (31).

$$\sum_{r \in P(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \sum_{j(s) \in \Gamma \mathbf{a}} \sum_{m(s) \in d(\mathbf{a}, \mathbf{b}, r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) \leq \alpha(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \quad (31)$$

Kolejnym z ograniczeń jest warunek nieprzekroczenia przepustowości połączenia s , $s = \overline{1, P((\mathbf{a}, \mathbf{b}), r)}$ (32).

$$\sum_{(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \in E} \sum_{r \in P(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \sum_{j(s) \in \Gamma i(s)} \sum_{m(s) \in d(\mathbf{a}, \mathbf{b}, r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) \leq d((i(s), m(s), j(s))) \quad (32)$$

Następnym z ograniczeń jest warunek addytywności wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk (33).

$$\sum_{(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \in E} \sum_{r \in P(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \sum_{j(s) \in \Gamma i(s)} \sum_{m(s) \in d(\mathbf{a}, \mathbf{b}, r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) = x((i(s), m(s), j(s))) \quad (33)$$

Ostatnim z ograniczeń jest warunek zachowania wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk dla $x(i) \in V$ składający się z trzech części tj. (34) dla $x(i) \in A$, (35) dla $x(i) \in B$ oraz (36) dla $x(i) \in V$.

$$\sum_{(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \in E} \sum_{r \in P(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \sum_{j(s) \in \Gamma^{-1} i(s)} \sum_{m(s) \in d(\mathbf{a}, \mathbf{b}, r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) - \quad (34)$$

$$+ \sum_{(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \in E} \sum_{r \in P(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \sum_{j(s) \in \Gamma i(s)} \sum_{m(s) \in d(\mathbf{a}, \mathbf{b}, r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) = 0$$

dla $x(i) \in A$

$$\begin{aligned} & \sum_{(a,b) \in E} \sum_{r \in P(a,b)} \sum_{j(s) \in \Gamma^{-1}i(s)} \sum_{m(s) \in d(a,b,r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) - \\ & + \sum_{(a,b) \in E} \sum_{r \in P(a,b)} \sum_{j(s) \in \Gamma i(s)} \sum_{m(s) \in d(a,b,r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) = \\ & = -\alpha(a, b) \end{aligned} \quad (35)$$

dla $x(i) \in B$

$$\begin{aligned} & \sum_{(a,b) \in E} \sum_{r \in P(a,b)} \sum_{j(s) \in \Gamma^{-1}i(s)} \sum_{m(s) \in d(a,b,r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) - \\ & + \sum_{(a,b) \in E} \sum_{r \in P(a,b)} \sum_{j(s) \in \Gamma i(s)} \sum_{m(s) \in d(a,b,r)} x((i(s), m(s), j(s)), r) R((i(s), m(s), j(s)), r) = \\ & = \alpha(a, b) \end{aligned} \quad (36)$$

Wynikiem wyznaczenia $XL^* = [x^*((i(s), m(s), j(s)), r)]$ rozwiązania spełniającego ograniczenia nakładane na wielkości wyposażenia wojsk jest rozwiązanie dopuszczalne.

Rozwiązaniem optymalnym zadania jest natomiast rozłożenie wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania z uwzględnieniem kryterium jakości rozwiązania.

Uzyskane koszty średnie dla poszczególnych dróg wskazano w tabeli 2. Wykres kosztów średnich w funkcji drogi przedstawiono na rys. 7.

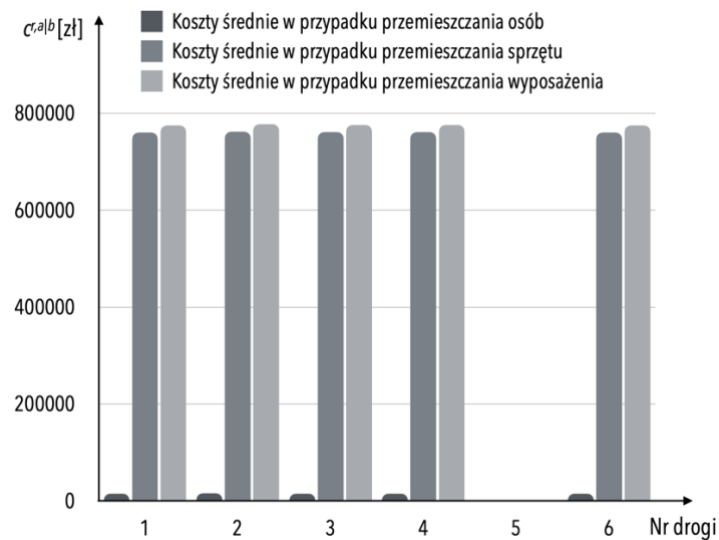
Na etapie rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk droga nr 5 została wykluczona (załącznik 6). Jak wynika z rys. 7 i z założeń w zagadnieniu, koszt średni w przypadku każdej drogi, z wyjątkiem drogi nr 5, jest praktycznie identyczny.

Tabela 2. Koszty średnie w funkcji drogi

Nr drogi	Koszty średnie w przypadku przemieszczania osób [zł]	Koszty średnie w przypadku przemieszczania sprzętu [zł]	Koszty średnie w przypadku przemieszczania wyposażenia [zł]
1	14902,80	760042,80	774945,60
2	15301,31	762112,52	777413,80
3	14781,89	760856,62	775638,50
4	14862,14	760686,08	775548,20
5	0,00	0,00	0,00
6	15206,40	760104,00	775310,40

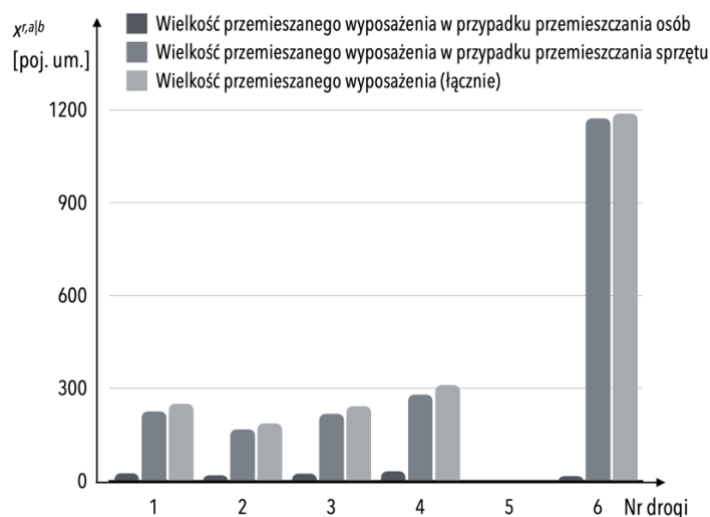
Źródło: opracowanie własne.

Wykres wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w funkcji drogi przedstawiono na rys. 8. Na okazję obserwacji i wnioskowania na podstawie tego rysunku należy wziąć pod uwagę, że w przypadku transportu szynowego liczba wagonów również podana zostaje poprzez liczbę pojazdów umownych, co „wizualnie” wprowadza znaczne dysproporcje pomiędzy drogami nr 1-4 oraz drogą nr 6.



Rys. 7. Koszty średnie w funkcji drogi

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania Key



Rys. 8. Rozłożone wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w funkcji drogi

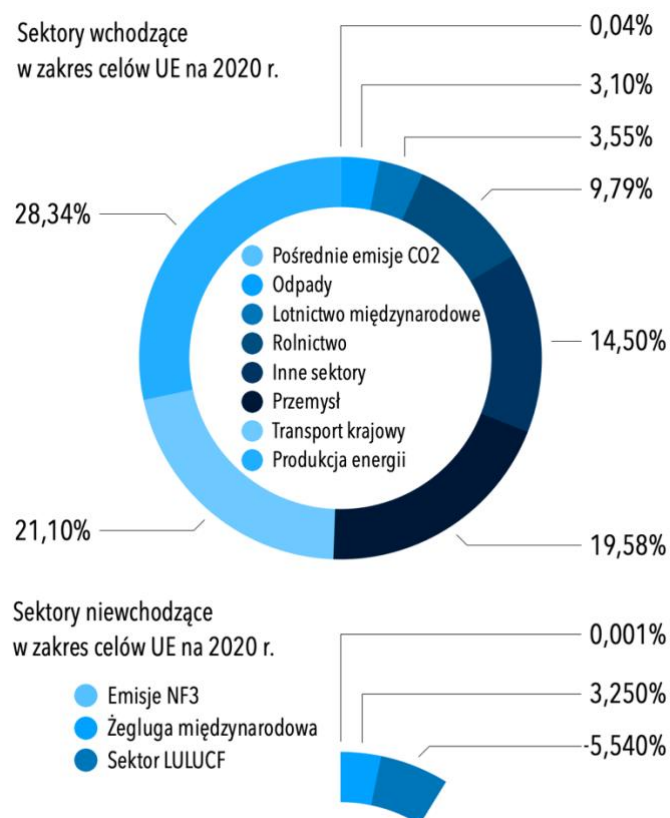
Źródło: opracowanie własne

3.4.3. Kryterium kosztów zewnętrznych

Bardzo istotnym pod względem ekonomicznym (kompleksowym) kryterium optymalizacji rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, jest kryterium społecznego kosztu transportu. Kryterium to obejmuje całokształt kosztów ponoszonych przez społeczeństwo (czyli również przez osoby nie biorące bezpośrednio udziału w procesach transportowych) w związku z wszechobecną działalnością transportową. W kosztach tych niezwykle ważną składową są koszty zewnętrzne uwzględniające skutki działalności transportowej dla środowiska naturalnego i życia człowieka (m.in. hałas, zanieczyszczenia, wypadki), Jacyna et al. (2014).

„Z jednej strony efektywny system transportowy jest elementem warunkującym rozwój gospodarczy oraz umożliwiającym prowadzenie aktywnego życia społecznego poprzez zaspokojenie potrzeb w zakresie przemieszczania ludności. Z drugiej jednak strony transport to również sprawca wielu istotnych problemów ekologicznych, w szczególności: zmian klimatycznych, kwaśnych deszczów, zanieczyszczeń w skali lokalnej, pogorszenia klimatu akustycznego, zajmowania terenów pod infrastrukturę czy też zakłóceń w naturalnych ekosystemach”, Miecznikowski (2001, p. 58). Świadomość tego typu zagrożeń, w szczególności dotyczących emisji szkodliwych związków spalin spowodowana rozwojem motoryzacji, jest coraz większa, a przy tym wzrasta chęć stosowania innowacyjnych technologii, np. instalowanie reaktorów katalitycznych, obniżenie zużycia paliwa itp., Jacyna i Pyza (2019). Jednocześnie jednak bez wątpienia emisja zanieczyszczeń jest nadal istotnym problemem, Jacyna i Pyza (2019).

Transport uznawany jest za jeden z „(...) najbardziej uciążliwych ekologicznie sektorów gospodarki (obok przemysłu i energetyki). Należy zauważyć, iż sektor transportu jest głównym konsumentem energii pochodzących z paliw kopalnych oraz emitentem istotnych zanieczyszczeń atmosferycznych. Jeśli dodamy do tego skutki wypadków w transporcie drogowym w postaci kosztów wypadków śmiertelnych, kosztów leczenia osób poszkodowanych czy też strat materialnych, to otrzymamy nie tylko sektor gospodarczy uciążliwy ekologicznie, ale również przynoszący poważne straty ekonomiczne”, Miecznikowski (2001, p. 58). Emisje zanieczyszczeń pochodzące od transportu w Polsce to ok. 21,1% ogółu zanieczyszczeń (rys. 9).



Rys. 9. Zanieczyszczenie powietrza związkami toksycznym; sektor LULUCF (ang. *Land use, land use change and forestry*)

Źródło: opracowanie własne na podst.: <https://bit.ly/3ICthds>, dostęp on-line 8 marca 2021 r.

Prawidłowe zaspokajanie potrzeb transportowych, bez względu na to czy dotyczy transportu cywilnego czy wojskowego, generuje szereg kosztów, z których część jest ponoszona przez bezpośrednich interesariuszy systemu transportowego, jednak pozostałe ponoszone są przez wszystkich członków społeczeństwa. Koszty ponoszone przez podmioty go nie wytwarzające (znajdujące się poza systemem transportowym) nazywane są kosztami zewnętrznymi. Przy czym mianem kosztu zewnętrznego oznacza się wpływ zjawisk i konsekwencji mierzalnych (należy jednak zauważyć, że miarodajność owa jest często dyskusyjna i niebanalna w zakresie prób oszacowania tych kosztów), natomiast niemierzalne to tzw. efekty zewnętrzne, Trela (2012), Pawłowska (2018).

Badaniu zewnętrznych kosztów transportu poświęca się coraz więcej uwagi. W przypadku każdej gałęzi transportu należy ocenić skalę i wszystkie finansowe konsekwencje powodowane przez dany rodzaj transportu, przy czym bardzo często koszty te nie są łatwe do

oszacowania. Dotyczą one m.in. (Jacyna i Merkisz 2014a; Jacyna i Merkisz 2014a; Jacyna i Merkisz 2014c; Gronowicz 2003, p. 38; Zowada 2016, pp. 643-658):

- ryzyka wypadków spowodowanych w procesie użytkowania technicznych środków transportu, wypadków komunikacyjnych generujących koszty tylko w części pokrywane przez ubezpieczenia (w pracy Poliński (2012) wskazano, że „koszty zewnętrzne wypadków transportowych stanowią koszty, które nie są pokrywane ani przez sprawcę, ani przez ubezpieczyciela”, a zatem na koszty zewnętrzne wypadków składają się: koszty medyczne nie będące zwracanymi przez sprawców wypadków i ich ubezpieczycieli, koszty resocjalizacji dotyczące zmiany miejsc pracy osób z niepełnosprawnościami do innych miejsc pracy, koszty zakładów pracy związane z rekrutacją nowych pracowników w miejsce tych, którzy ulegli wypadkom i nie mogący wypełniać dotychczasowych obowiązków zawodowych);
- zanieczyszczeń powietrza w szczególności w efekcie emisji pyłów (resuspensacji pyłu drogowego), tlenku węgla, ołowiu, lotnych związków organicznych, tlenków azotu i dwutlenku siarki, fluorowęglowodorów, wszystkich substancji szkodliwych dla zdrowia ludzi, środowiska naturalnego, a przy tym mających także destrukcyjny wpływ na infrastrukturę (zanieczyszczenie powietrza niektórymi związkami toksycznymi w efekcie działalności transportu na tle innych działalności gospodarczych przedstawiono na rys. 10, z kolei w tabeli 3 podano uzupełnienie tych informacji dla transportu drogowego na podstawie efektów prac w projekcie EMITRANSYS w oparciu o artykuły Jacyna i Merkisz (2014a; 2014b) – niezwykle interesujące są efekty przedstawione w tych pracach, a mianowicie najmniejsze emisje w krajowym drogowym systemie transportowym zanieczyszczeń występuje w efekcie minimalizacji kosztów transportu, a największe w przypadku minimalizacji czasu przejazdu/przemieszczenia);
- zmian klimatycznych związanych z masową emisją gazów cieplarnianych (głównie dwutlenku węgla, tlenków siarki);
- kongestii, tzn. zatłoczenia, zmniejszenia przepustowości i efektywności systemów transportowych, powodujących znaczne straty zarówno dla osób prywatnych, jak i dla całej gospodarki (koszty straconego czasu itp.);
- hałasu powodującego nie tylko stres, lecz także poważne problemy zdrowotne u ludzi, a przy tym szkodliwego dla środowiska naturalnego (emisja hałasu, dotyczy szczególnie

transportu drogowego, lotniczego na terenach gęsto zaludnionych – dokuczliwa szczególnie nocą);

- przekształceń przyrody i krajobrazu, tj. zmian (często szpecących krajobraz i doprowadzających do degradacji przyrody) spowodowanych rozbudową systemów transportowych, zajmowaniem coraz większej powierzchni pod infrastrukturę transportową (drogi, zaplecze techniczne, stacje paliw, stacje postojowe i inne);
- zanieczyszczenia związanego z eksploatacją technicznych środków transportu i kasacją całych obiektów, zespołów, części i materiałów eksploatacyjnych (wraki samochodów, zużyte opony i akumulatory itp.);
- ryzykiem związanym z transportem niebezpiecznych ładunków (w przypadku awarii lub katastrofy skala zagrożeń do biosfery może być bardzo duża; na rys. 11 przedstawiono mapę alokacji miejsc obsługi podróżnych z parkingami przewidzianymi dla środków transportu przewożących ładunki niebezpieczne lub bez uwzględnienia takich parkingów – mapa ta powinna być uwzględniana i aktualizowana, a w kontekście przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych warto rozważyć czy przemieszczanie powinno być przeprowadzane wzdłuż tych dróg czy też drogami pobocznymi);
- relatywnie dużego zużycia energii przez sektor transportu, który obecnie jest głównie uzależniony od paliw nieodnawialnych;
- znacznego zużycia surowców naturalnych, w tym w głównej mierze metali, w procesie konstruowania, budowy i eksploatacji technicznych urządzeń i środków transportu oraz infrastruktury transportowej;
- utrudnionego dostępu dla osób z niepełnosprawnościami;
- terroryzmu.

Finansową konsekwencją zdefiniowanych powyżej negatywnych oddziaływań transportu na jego otoczenie gospodarcze, społeczne i środowisko naturalne są zewnętrzne koszty transportu. Skala tych kosztów „(...) jest znaczna, a wobec niskiej świadomości społecznej (...) oraz trudności w ilościowym oszacowaniu takich kosztów nie znajdują one adekwatnego odzwierciedlenia w cenach usług transportowych”, Rydzyński (2004, p. 14).

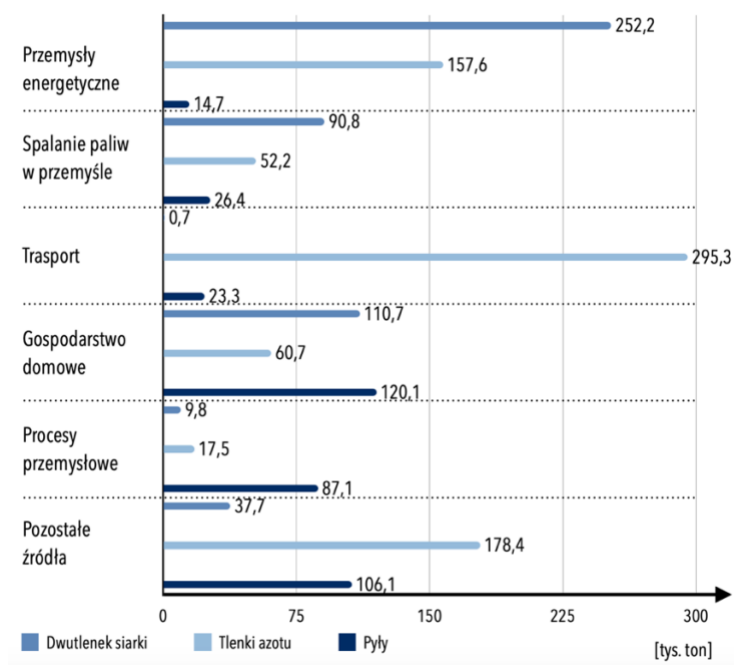
W opinii autorów pracy Merkisz-Guranowska et al. (2017), 71% kosztów zewnętrznych w Polsce jest efektem wypadków transportowych, natomiast spośród pozostałych kosztów destrukcyjnego oddziaływania transportu na środowisko autorzy wyróżniają koszty zanieczyszczenia powietrza na poziomie 11%, koszty związane ze zmianami klimatycznymi na

poziomie 5%, koszty dotyczące hałasu w wielkości 11% oraz inne koszty środowiskowe szacowane na poziomie 2%. Wartości te można porównać z zamieszczonymi w Pawłowska (2018) – w obydwu pracach zamieszczono informacje w postaci uogólnionej i dla różnych okresów, przy czym warto przede wszystkim zauważyć jak skomplikowane i w pewnych przypadkach niemal niemożliwe jest oszacowanie kosztów zewnętrznych.

Tabela 3. Poziom zanieczyszczenia szkodliwymi związkami spalin pochodzącymi z drogowego transportu towarowego

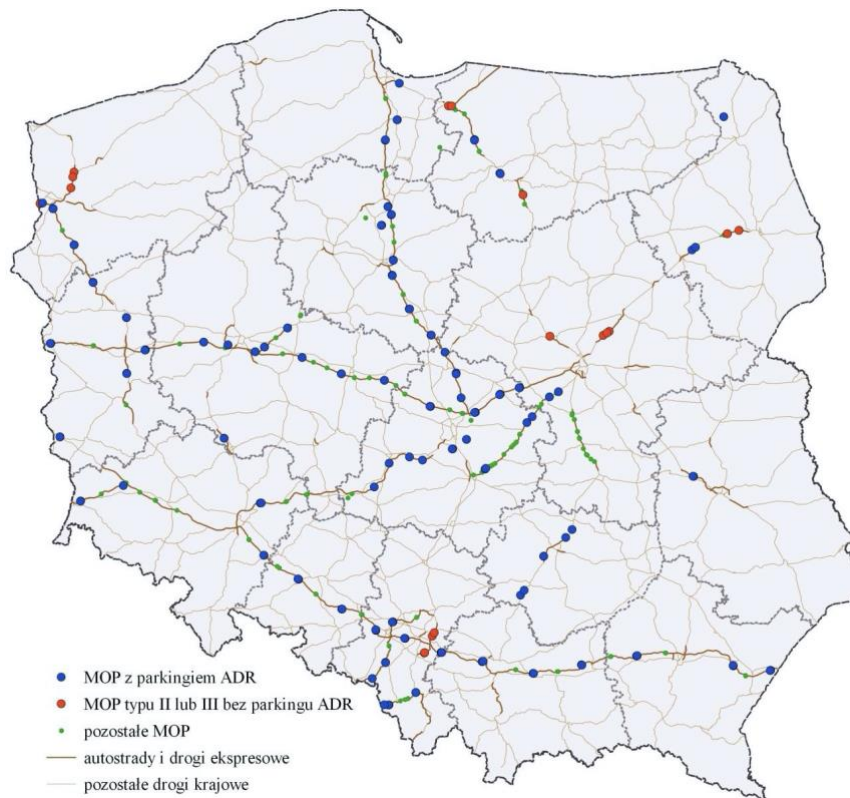
Substancja zanieczyszczająca	Poziom zanieczyszczeń [g]		
	W efekcie minimalizacji czasu przemieszczania	W efekcie minimalizacji pokonywanych odległości	W efekcie minimalizacji kosztów transportu
1	2	3	4
CO ₂ – dwutlenek węgla	5 644 560 017	4 705 146 216	4 442 068 514
CO – tlenek węgla	81 141 408	67 576 488	63 600 631
HC	6 775 942	5 616 097	5 251 553
NO _x – tlenki azotu	25 611 104	21 314 996	20 194 327
pyły	2 089 668	1 745 207	1 646 830

Źródło: Jacyna i Merkiś (2014a; 2014b)



Rys. 10. Zanieczyszczenie powietrza związkami toksycznymi, GUS 2020 r.

Źródło: opracowanie własne na podst. <https://bit.ly/3iQBKPX>, dostęp on-line 8 marca 2021 r.



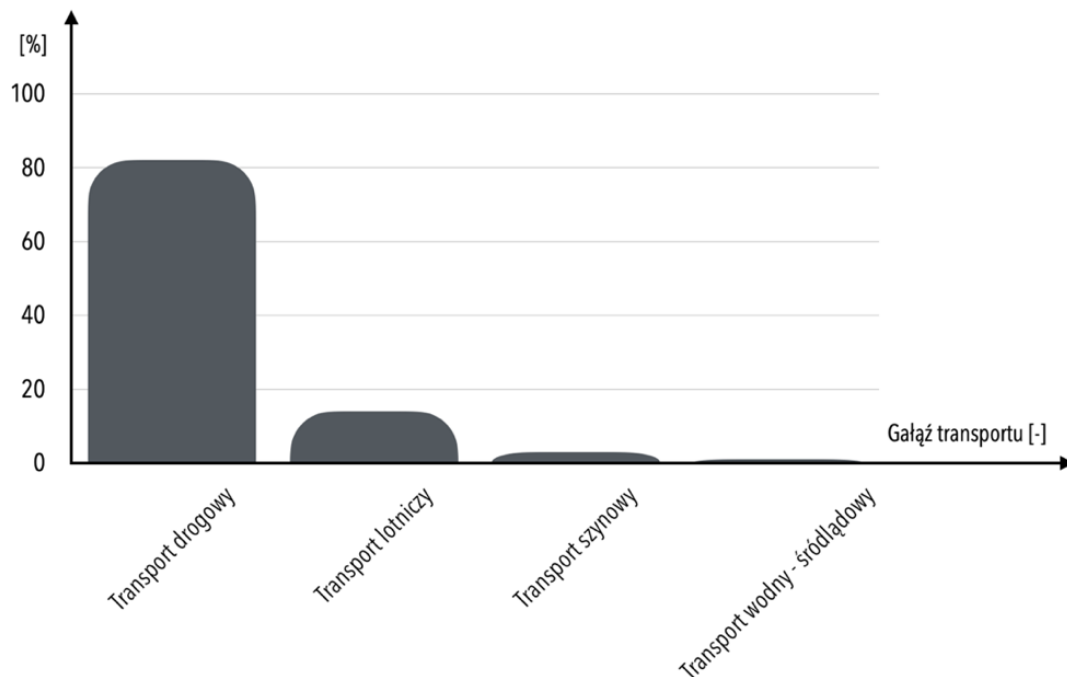
Rys. 11. Lokalizacje miejsc obsługi podróżnych MOP z uwzględnieniem potrzeb parkowania pojazdów dla ładunków niebezpiecznych, uwzględnionych w konwencji ADR

Źródło: Pająk (2019, p. 20)

Proporcje procentowe kosztów zewnętrznych zostały przedstawione na rys. 12. Proporcje te związane z globalnym poziomem kosztów wynikają nie tylko z obiektywnej uciążliwości lub szkodliwości danego rodzaju transportu, ale także z wykonywanej przez ten rodzaj pracy przewozowej. Choć źródło danych nie jest aktualne, wartości podane na rys. 12 unaoczniają skalę problemu, szczególnie w przypadku transportu drogowego. Wartości te w pewnym stopniu pokrywają się z wielkościami emisji zanieczyszczeń przedstawionymi w pracy Jacyna i Wasiak (2014, p. 82) tzn. transport lotniczy: 12,30%, transport drogowy: 71,70%, transport szynowy: 0,60%, transport morski 14,60%.

W opinii autora Rydzyński (2004, p. 20) ok. 57% ponoszonych kosztów zewnętrznych wywołanych jest przez samochody osobowe, autobusy i motocykle, natomiast za ok. 35% całości zewnętrznych kosztów transportu odpowiadają samochody ciężarowe. Bez względu na wielkość przewozów, jednostkowe koszty zewnętrzne w przypadku transportu szynowego są około dwukrotnie w porównaniu z autobusami do około 5 razy mniejsze niż w przypadku transportu samochodowego. Poza tym warto zauważyć „fakt, że transport [drogowy – dop.

autora] nie płaci pełnych kosztów społecznych, w tym kosztów degradacji środowiska, prowadzi do istotnych zakłóceń w konkurencji na rynku transportowym. Oznacza to, że na skutek zniekształconego mechanizmu cenowego zdecydowana przewaga transportu kolejowego, (...) nad transportem drogowym wyrażająca się mniejszym degradacyjnym wpływem na środowisko nie ma uznania na rynku transportowym”, Wronka (2002, p. 156).



Rys. 12. Procentowy udział poszczególnych gałęzi transportu w tworzeniu kosztów zewnętrznych ogółem

Źródło: opracowanie własne na podstawie Poliński (2012)

Pewne punkty odniesienia dotyczące kosztów zewnętrznych przedstawiono w tabelach 8-10. Mogą one zostać uwzględnione w obliczeniach przedstawionych w rozprawie.

W tabeli 7 przedstawiono instrumenty internalizacji kosztów zewnętrznych (określenie ich w obrębie danego kraju). Mogą one być rozpatrywane z punktu widzenia gałęziowej i międzygałęziowej polityki transportowej.

W opinii autorów Jacyna et al. (2004, p. 10) bardzo dobrym „(...) przykładem instrumentu polityki międzygałęziowej jest podatek od paliwa (energii). Opłata ta jest szczególnie efektywnym czynnikiem wpływu na skutki zmian klimatu oraz wydajność zużycia energii, a pośrednio przyczynia się redukcji innych następstw (wypadki, skażenie powietrza)”.

Tabela 4. Kalkulowane koszty ekologiczne uwzględniające estymowaną wartość szkód wywołanych przez dany środek transportowy

Rodzaj przewozów	Nazwa środka transportowego	Wartość szkód [zł / 10 ⁶ t km] [zł / 10 ⁶ pas. km]	Nazwa środka transportowego	Wartość szkód [zł / 10 ⁶ t km] [zł / 10 ⁶ pas. km]
Przewozy ładunków	Samochody ciężarowe z silnikiem ZS	413 818	Żegluga śródlądowa	43 709
	Samochody ciężarowe z silnikiem Zł	1 606 933	Rurociągi ropy naftowej	3 441
	Transport kolejowy - trakcja spalinowa	78 857	Rurociągi produktów naftowych	11 728
	Transport kolejowy - trakcja elektryczna	19 459		
Przewozy pasażerskie	Autobusy podmiejskie	79 932	Transport kolejowy - trakcja elektryczna: trakcje dalekobieżne i lokalne obsługa aglomeracji i konurbacji:	43 162
	Autobusy miejskie	33 631	Tramwaje	22 839
	Trolejbusy	28 787		71 637
	Samochody osobowe	1 209 066	Transport lotniczy - krajowy	203 594
	Motocykle	4 413 124	Transport lotniczy - międzynarodowy	235 290
	Transport kolejowy - trakcja spalinowa	192 951	Żegluga śródlądowa	19 317

Tabela 5. Kalkulowane koszty ekologiczne uwzględniające estymowaną wartość szkód wywołanych przez dany środek transportowy na 10⁶ pas. km i 10⁶ tkm wyrażone w ECU (European Currency Unit; 1 stycznia 1999 r. zastąpiona przez euro w relacji 1 ECU = 1 EUR)

Rodzaj kosztów ekologicznych	Przewozy pasażerskie [zł / 10 ⁶ pas. km]		Przewozy ładunków [zł / 10 ⁶ tkm]	
	Transport drogowy	Transport szynowy	Transport drogowy	Transport szynowy
Wypadki drogowo-transportowe	22 400	50	8 200	20
Zatory drogowe	2 700	-	8 100	-
Zanieczyszczenia atmosfery	4 000	900	7 800	400
Hałas	1 300	700	600	700
Razem	30 400	1 650	24 700	1 120

Źródło: opracowanie własne na podstawie Gronowicz (2005)

Tabela 6. Koszty zewnętrzne transportu w Polsce szacowane na 2014 r. przy uwzględnieniu kategorii kosztów, z wyłączenie kosztów kongestii

Kategoria kosztów	Transport pasażerski		Transport ładunków	
	Udział w kosztach [%]	Wielkość kosztów w mln [EUR]	Udział w kosztach [%]	Wielkość kosztów w mln [EUR]
Wypadki	47	6617,1	32	2375,3
Zanieczyszczenia powietrza	8	1186,5	17	1258,6
Zmiany klimatyczne	5-29	684,5-4015,9	5-29	377,2-2144,9
Hałas	3	433,5	5	377,2
Pośrednie koszty działalności transportowej	5-9	753,0-1300,6	6-11	443,2-780,0
Defragmentacja terenu	1	136,9	1	106,4
Straty bioróżnorodności	0,3	45,6	1	70,9
Zanieczyszczenie wód i gleby	1	91,3	2	142,8
Efekt urbanizacji	1	182,5	2	124,1

Źródło: opracowanie własne na podstawie Pawłowska (2018)

W sektorowej polityce transportowej (transport drogowy) należałoby rozważyć przekształcenie zasad, w oparciu o które działa system określania cen ponoszonych na rzecz korzystania z dróg, w szczególności miejskich i tranzytowych. Za przykłady zmierzające w stronę tego typu zmian można by podać koszty wypadków w całości pokrywane przez system składek ubezpieczeniowych, natomiast standardy emisji, opłaty za hałas i taryfy drogowe wydają się być wystarczające dla internalizacji, ale dla obszarów miejskich należałoby uwzględnić dodatkowe środki (strefy z niską prędkością, czy zarządzanie zdolnością przepustową dróg). Uznaje się, że przynajmniej jeden postulat gałęziowej polityki transportowej został wdrożony w codziennej eksploatacji infrastruktury transportu szynowego, a mianowicie ich rozdzielenie. Kolejną sprawą wartą analizy byłoby wskazanie podatku od emisji hałasu nakładanego na przewoźników kolejowych analogicznie wobec kosztów zewnętrznych wytwarzania energii, Jacyna et al. (2004), Gnap et al. (2018), Gnap et al. (2021).

Przechodząc bezpośrednio do kryterium kosztów zewnętrznych, pozwala ono na dokonywanie analizy rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania, w przypadku, gdy istnieją konkurencyjne technologie przewozu o zróżnicowanym wpływie na środowisko naturalne, tak jak w przypadku przegrupowania wojsk w grę wchodzi zarówno transport drogowy jak i kolejowy. Poza tym koszty te są istotnym kryterium branym pod uwagę przy wyborze lokalizacji inwestycji transportowych.

Tabela 7. Instrumenty internalizacji kosztów zewnętrznych

Rodzaje skutków zewnętrznych	Instrumenty		
	Transport drogowy		Transport kolejowy
	Ciężkie pojazdy i autobusy	Samochody osobowe	
Infrastruktura:			
Koszy zmienne (utrzymanie)	<ul style="list-style-type: none"> • podatek od paliwa • kilometrażowy podatek zależny od dystansu (zróżnicowanie na ciężar i osie) 	<ul style="list-style-type: none"> • podatek od paliwa 	<ul style="list-style-type: none"> • dostosowanie opłat za usługi od dnia tygodnia i pory dnia • wzrost taryf w ślad za wzrostem opłat drogowych • opłaty infrastrukturalne
Koszy stałe (zdolność przepustowa)	<ul style="list-style-type: none"> • regularny podatek od pojazdu • podatek od paliwa • kilometrażowy podatek od dystansu • taryfy drogowe 		
Wypadki	<ul style="list-style-type: none"> • zróżnicowanie stawek ubezpieczenia i pokrycie pełnych kosztów • ograniczenia prędkości • standardy bezpieczeństwa 		<ul style="list-style-type: none"> • pełna i obowiązkowa odpowiedzialność • programy bezpieczeństwa i monitoring • standardy bezpieczeństwa dla pojazdów i infrastruktury
Hałas	<ul style="list-style-type: none"> • opłaty emisyjne: <ul style="list-style-type: none"> – przy zakupie pojazdu – regularny podatek od pojazdu • taryfy drogowe • standardy emisji • strefy z niską prędkością • pasywna kontrola hałasu • parkingowe zarządzanie przestrzenią • pasy jezdni o wysokiej zajętości 		<ul style="list-style-type: none"> • standardy emisji i aktywna kontrola hałasu (ulepszanie taboru) • pasywna kontrola hałasu • opłaty od hałasu dla operatorów
Skażenie powietrza	<ul style="list-style-type: none"> • podatek od paliwa/energii • podatek od paliwa/energii zróżnicowany w zależności od emisji 		
	<ul style="list-style-type: none"> • podatek od rejestracji pojazdu uzależniony od emisji • taryfy drogowe • standardy emisji 		<ul style="list-style-type: none"> • standardy emisji dla lokomotyw z silnikiem diesel
	<ul style="list-style-type: none"> • podatek kilometrażowy zależny od emisji 	<ul style="list-style-type: none"> • używanie pojazdów o niskiej emisji 	

Źródło: Jacyna et al. (2004, p. 13).

Wartości przedstawione w tabelach 4-6 są podstawą w ustalaniu kosztów zewnętrznych jako kryterium wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania w sieci transportowej w przypadku rozprawy doktorskiej.

Kryterium kosztów zewnętrznych dla pierwotnego i wtórnego $p, p' \in P$ rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania opisane jest w postaci zależności (37).

$$z^{p,ab}(\mathbf{XL}) = z^{p',ab}(\mathbf{XL}) \wedge \min z^{p,ab}(\mathbf{XL}) \quad (37)$$

gdzie:

- $z^{p,ab}(\mathbf{XL})$ – interpretowane jest jako wartość kosztów zewnętrznych dla wyposażenia wojsk przemieszczanego p -tą drogą w relacji (a,b) ;
- $z^{p',ab}(\mathbf{XL})$ – interpretowane jako wartość kosztów zewnętrznych dla wielkości wyposażenia wojsk przemieszczanego p' -tą drogą w relacji (a,b) ;
- \mathbf{XL} – jest wektorem o elementach $x(i(s),j(s)) \equiv x_{ij}$, które interpretuje się jako wielkość wyposażenia wojsk, przemieszczanego po $m(s)$ zawartym między wierzchołkami $i(s)$ i $j(s)$, w ustalonych relacjach przegrupowania sieci transportowej.

Wobec obliczania kosztów zewnętrznych warto przytoczyć kilka wskazanych w literaturze zależności.

Wzór do obliczania kosztu zanieczyszczenia powietrza spowodowanego ruchem drogowym przedstawiono w postaci zależności (38), Maibach et al. (2007), Puławska (2008), Poliński (2012, p. 39).

$$z_{zp,i,dr}^{p,ab}(\mathbf{XL}) = \sum_k EF_{ik} \cdot PC_{drk} \quad (38)$$

gdzie:

- $z_{zp,i,dr}^{p,ab}(\mathbf{XL})$ – koszt zanieczyszczenia powietrza przez pojazd i -tej klasy i na drodze typu dr w przypadku przemieszczania wyposażenia wojsk p -tą drogą w relacji (a,b) , [EUR/pojazdokilometr];
- EF_{ik} – czynnik emisji zanieczyszczeń k -tego typu i pojazdu i -tej klasy w przypadku przemieszczania wyposażenia wojsk, [g/kilometr];
- PC_{dk} – pieniężny koszt zanieczyszczenia k -tego typu na drodze typu dr w przypadku przemieszczania wyposażenia wojsk, [EUR/g].

W przypadku uwzględniania składnika związanego z hałasem wywołanym przez ciężarowe pojazdy drogowe lub szynowe spośród kosztów zewnętrznych, można skorzystać z zależności (39) dla pory dziennej oraz (40) dla pory nocnej, Maibach et al. (2007), Puławska (2008), Poliński (2012, pp. 39-40).

$$z_{h,i,dr}^{p,ab}(\mathbf{XL}) = \sum_k NC_{drpz} \cdot POP_{pz} / ADT \quad (39)$$

$$z_{h,i,dr,\theta}^{p,ab}(\mathbf{XL}) = n \cdot z_{h,i,dr}^{r,ab}(\mathbf{XL}) \quad (40)$$

gdzie:

- $z_{h,i,dr}^{p,ab}(\mathbf{XL})$ – koszt hałasu powodowanego w porze dziennej przez pojazd i -tej klasy i na drodze typu dr dla pojazdów przemieszczających wyposażenie wojsk p -tą drogą w relacji (a,b) , [EUR/pojazdokilometr];
- $z_{h,i,dr,\theta}^{p,ab}(\mathbf{XL})$ – koszt hałasu powodowanego w porze nocnej przez pojazd i -tej klasy i na drodze typu dr w przypadku przemieszczania wyposażenia wojsk p -tą drogą w relacji (a,b) , [EUR/pojazdokilometr];
- NC_{drpz} – koszt hałasu na osobę narażoną na drodze typu dr na poziom hałasu pz , [EUR/osobę];
- POP_{pz} – liczba ludności narażonej na dzienny poziom hałasu pz na kilometr na podstawie tzw. strategicznych map hałasu, które sporządza się zgodnie z art. 7 Dyrektywy 2002/49/WE, dotyczącej oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku, [osoba/km];
- ADT – średniodobowy ruch, [liczba pojazdów],
- n – współczynnik korygujący dla nocy.

Koszt hałasu powodowanego przez ciężarowe pojazdy drogowe [EUR/pojazdokilometr] określono jako 0,011 [EUR/pojazdokilometr] dla pory dziennej i 0,020 [EUR/pojazdokilometr] dla pory nocnej w przypadku dróg podmiejskich oraz jako 0,0013 [EUR/pojazdokilometr] dla pory dziennej i 0,0023 [EUR/pojazdokilometr] dla pory nocnej w przypadku dróg międzymiastowych (Poliński 2012, p. 41) według wartości w EUR z 2000 roku KOM (2008, tabl. 2). Biorąc pod uwagę obecne ceny waluty (2021 r.), koszt hałasu powodowanego przez ciężarowe pojazdy drogowe [EUR/pojazdokilometr] określono (samodzielnie poprzez zastosowanie uproszczonej metody na podstawie analizy proporcji) jako 0,031 [EUR/pojazdokilometr] dla pory dziennej i 0,0236 [EUR/pojazdokilometr] dla pory nocnej w przypadku dróg podmiejskich oraz jako 0,00153 [EUR/pojazdokilometr] dla pory dziennej i 0,0027 [EUR/pojazdokilometr] dla pory nocnej w przypadku dróg międzymiastowych.

W tabeli 8 zamieszczono wybrane wartości kosztów dotyczące hałasu emitowanego przez transport drogowy i kolejowy.

Tabela 8. Roczny koszt przypadający na osobę narażoną na poziom hałasu p_z [EUR]

Poziom hałasu p [dB]	Transport drogowy	Transport kolejowy	Poziom hałasu p [dB]	Transport drogowy	Transport kolejowy
≥51	9	0	≥67	149	106
≥52	18	0	≥68	158	114
≥53	26	0	≥69	167	123
≥54	35	0	≥70	175	132
≥55	44	0	≥71	233	189
≥56	53	9	≥72	247	204
≥57	61	18	≥73	262	218
≥58	70	26	≥74	277	233
≥59	79	36	≥75	291	248
≥60	88	44	≥76	306	262
≥61	96	53	≥77	321	277
≥62	105	61	≥78	335	292
≥63	114	70	≥79	350	306
≥64	123	79	≥80	365	321
≥65	132	88	≥81	379	336
≥66	140	96			

Źródło: Maibach et al. (2007, p. 71), Poliński (2012, pp. 40-41), wg wartości EUR z 2002 r.

Koszt kongestii, zatoru w opłacie z tytułu kosztów zewnętrznych można obliczyć z zależności (41), (42), Maibach et al. (2007), Puławska (2008), Poliński (2012, p. 53).

$$z_{k,i,dr}^{p,ab}(\mathbf{X}) = MEC(Q_0) - IDC \quad (41)$$

$$MEC(Q) = \frac{VOT \cdot Q}{v(Q)^2} \cdot \frac{v(Q) - v(Q - \Delta Q)}{\Delta Q} \quad (42)$$

gdzie:

- $z_{k,i,dr}^{p,ab}(\mathbf{X})$ – należny koszt zatłoczenia, [EUR/pojazdokilometr];
- IDC – koszt rozwoju infrastruktury objęty już opłatą, [EUR/pojazdokilometr];
- Q_0 – optymalny godzinowy ruch drogowy, [pojazdy/godzinę];
- $MEC(Q)$ – krańcowy koszt zewnętrzny zatłoczenia, [EUR/pojazdokilometr] (na ogół stosunek między $z_{k,i,dr}^{r,ab}(\mathbf{X})$ a $MEC(Q)$ wynosi 0,5, Poliński (2012, p. 53));
- VOT – wartość czasu, [EUR/godzinopojazd];

- Q – średniogodzinowy ruch drogowy, [liczba pojazdów];
- ΔQ – niewielkie zmiany w godzinowym ruchu drogowym;
- $v(Q)$ – średnia prędkość ruchu drogowego, [km/h].

W tabeli 9 przytoczono za Polińskim (2012) oraz Maibach et al. (2007) dynamikę zmian kosztów zewnętrznych transportu w Polsce dla lat 1995-2006, pozostałe lata zostały oszacowane przez autora pracy.

Tabela 9. Dynamika zmian kosztów zewnętrznych transportu drogowego i szynowego w Polsce

Wyszczególnienie	1995 r.	2001 r.	2006 r.	2011 r.*	2016 r.*	2021 r.*
<i>l</i>	2	3	4	5	6	7
Wskaźnik jednostkowy kosztów zewnętrznych na jednostkę pracy przewozowej [zł/1000 tkm], [zł/1000 paskm]						
– przewozy drogowe ładunków	156,00	179,00	185,00	202,33	216,83	231,33
– przewozy kolejowe ładunków	63,00	65,00	66,00	55,67	54,17	52,67
– przewozy autobusowe	70,00	89,00	98,00	113,67	127,67	141,67
– przewozy kolejowe osób	45,00	47,00	48,00	49,67	51,17	52,67
– motoryzacja indywidualna	154,00	170,00	178,00	191,33	203,33	215,33
Stosunek jednostkowych kosztów zewnętrznych do wartości jednostki usług transportowych:						
– transport drogowy i motoryzacja indywidualna	49,50	51,80	53,00	50,67	52,42	54,17
– transport kolejowy	40,20	48,50	52,70	59,63	65,88	72,13
Koszty zewnętrzne w tys. zł na 1 km sieci transportowej:						
– transport drogowy i motoryzacja indywidualna	91,60	171,30	211,00	277,37	337,07	396,77
– transport kolejowy	288,20	197,30	152,00	152,30	198,20	289,70
Udział kosztów wypadków w kosztach zewnętrznych [%]						
– transport drogowy i motoryzacja indywidualna	25,90	26,60	27,00	27,60	28,15	28,70
– transport kolejowy	1,10	0,90	0,80	0,63	0,48	0,33
Udział zanieczyszczenia powietrza (zmiany klimatu) w kosztach zewnętrznych:						
– transport drogowy i motoryzacja indywidualna	18,70	17,70	17,20	16,37	15,62	14,87
– transport kolejowy	15,20	15,60	15,80	16,13	16,43	16,73
Udział kosztów zewnętrznych transportu w PKB w % w tym:						
– transport drogowy i motoryzacja indywidualna	3,91	5,77	6,47	7,94	9,22	10,50
– transport kolejowy	1,47	0,56	0,28	16,63	26,61	39,22

Źródło: lata 1995, 2001, 2006: Poliński (2012) oraz Maibach et al. (2007); pozostałe lata: opracowanie własne (* - oszacowanie)

Przedmiotem zadania optymalizacyjnego rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk z kryterium kosztów zewnętrznych jest minimalizacja funkcji kryterium postaci (43) przy jednoczesnym spełnieniu ograniczeń (30)-(36).

$$F_2(\mathbf{XL}) = z^{p,ab}(\mathbf{XL}) = z^{p',ab}(\mathbf{XL}) = \min z^{p,ab}(\mathbf{XL}) \quad (43)$$

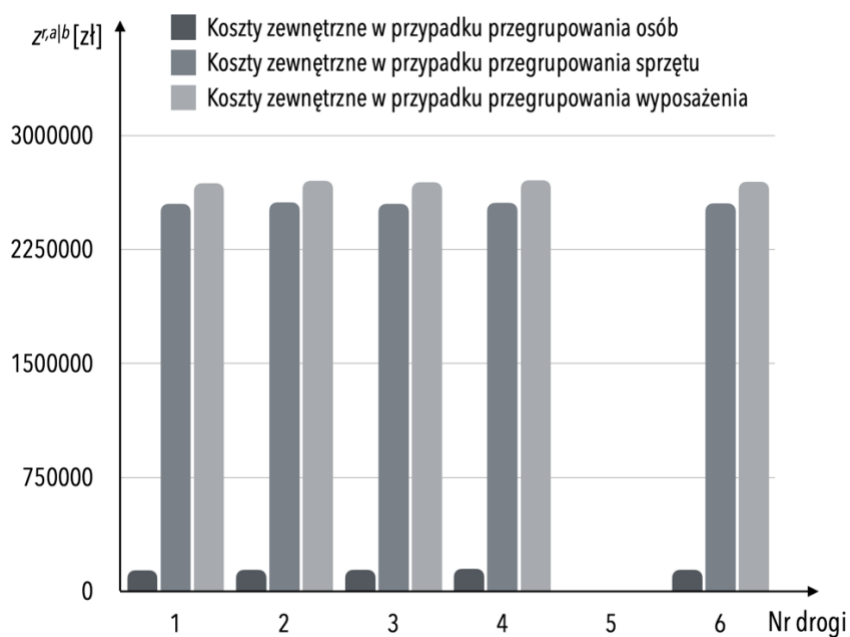
osiągające dla każdej relacji przewozu (a, b) oraz dla różnych dróg p oraz p' tej relacji $p, p' \in P^{ab}$ wartość minimalną.

Wynikiem wyznaczenia $\mathbf{XL}_z^* = \mathbf{XL}^* = [x^*((i(s), m(s), j(s)), r)]$ rozwiązania spełniającego ograniczenia nakładane na wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk jest rozwiązanie dopuszczalne. Rozwiązaniem optymalnym zadania jest natomiast rozłożenie wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk z uwzględnieniem wskazanego kryterium jakości rozwiązania.

Uzyskane koszty zewnętrzne dla poszczególnych dróg wskazano w tabeli 10. Wykres kosztów zewnętrznych w funkcji drogi przedstawiono na rys. 13. Na etapie rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk droga nr 5 została wykluczona (załącznik 6). Jak wynika z rys. 13 koszt zewnętrzny w przypadku każdej drogi, z wyjątkiem drogi nr 5, jest praktycznie identyczny, co wynika z założeń dotyczących równych kosztów zewnętrznych. Wykres wielkość przemieszczanego wyposażenia wojsk w funkcji drogi przedstawiono na rys. 14.

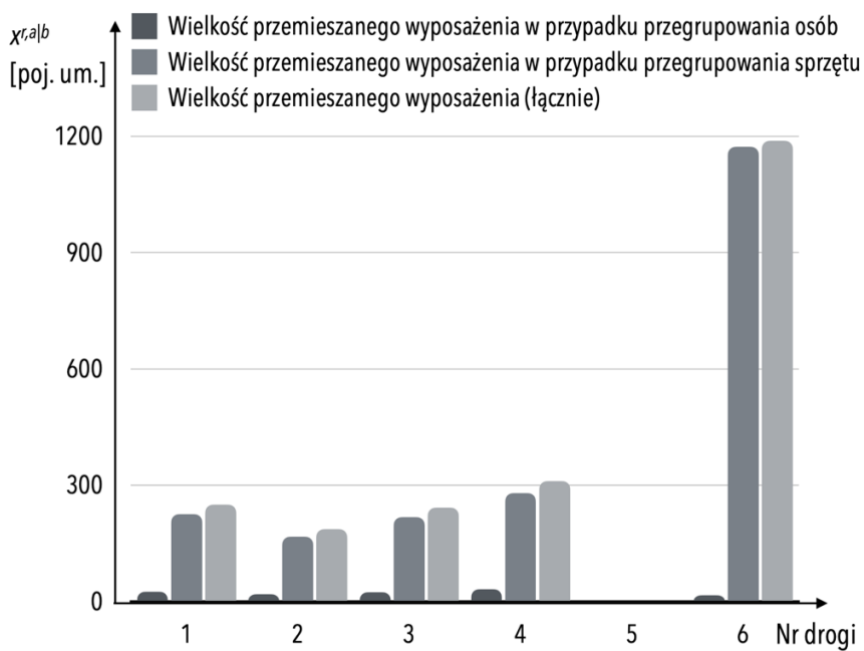
Tabela 10. Koszty zewnętrzne w funkcji drogi

Nr drogi	Koszty zewnętrzne w przypadku przemieszczania osób [zł]	Koszty zewnętrzne w przypadku przemieszczania sprzętu [zł]	Koszty zewnętrzne w przypadku przemieszczania wyposażenia [zł]
1	137761,80	2548593,00	2686355,00
2	142914,80	2559474,00	2702389,00
3	142337,60	2550215,00	2692552,00
4	147726,80	2557521,00	2705247,00
5	0,00	0,00	0,00
6	141892,90	2554072,00	2695965,00



Rys. 13. Koszty zewnętrzne w funkcji drogi w przypadku kryterium kosztów zewnętrznych

Źródło: opracowanie własne



Rys. 14. Rozłożone wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w funkcji drogi w przypadku kryterium kosztów zewnętrznych

Źródło: opracowanie własne

3.4.4. Kryterium czasu przemieszczania jako kosztu

W zakresie rozważanego problemu, można rozpatrzyć kryterium czasu przemieszczania w relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie, którego minimalizacja stanowi najbardziej korzystne rozwiązanie w ujęciu przemieszczania, a tym samym charakteryzowana jest najmniejszym kosztem. Czas przemieszczania uzależniony jest wprost od wartości prędkości jazdy na danym odcinku (średnich prędkości, które można wyznaczyć albo w postaci wzorów empirycznych albo na podstawie danych na temat ruchu na danych odcinkach, w zależności od różnych parametrów ruchu, drogi i pojazdu oraz domniemanego sposobu jazdy, Datka et al. 1997, p. 161). W szczególności czas przejazdu jest zależny od elementów przekroju poprzecznego drogi, pośród których wyróżnić można: pasy ruchu, jezdnie, ich szerokości, dodatkowe pasy ruchu, pasy postojowe, pasy dzielące, pasy zieleni, opaski, pobocza, chodniki, ścieżki rowerowe, torowiska, krętość drogi, pochylenia niwelety, skrajnia drogi.

W zagadnieniu tym istotna jest prędkość pojazdów. Ponadto oprócz czynników drogowych wpływ na prędkość przejazdu, a co za tym idzie na czas przejazdu mają: natężenie ruchu, charakterystyka pojazdu (moc silnika, rodzaj przekładni), warunki atmosferyczne, przepisy ruchu drogowego, umiejętności kierowcy, dyscyplina jazdy.

Problemem ustalenia metod obliczania prędkości pojazdów zajmowało się wielu fachowców zarówno krajowych jak i zagranicznych, np. Gondek i Ostrowski (2017), Kempa (1983). Opracowane metody różnią się, jednakże większość z nich została oparta na badaniach rzeczywistego ruchu pojazdów. W literaturze podawane są różne wzory na średnie prędkości. Kempa (1983) na podstawie pomiarów wykonanych w Polsce przedstawił wzory na wyznaczenie średnich prędkości dla samochodów osobowych i ciężarowych dla dróg jednojezdniowych, dwupasmowych z ruchem dwukierunkowym (tabela 11).

W literaturze można znaleźć wiele wzorów na wyliczenie średniej prędkości. W zależności od parametrów drogi stosowane są wzorce niemieckie, amerykańskie, angielskie, według których wartość średniej prędkości obliczana jest przy uwzględnieniu parametrów takich jak: krętość drogi, falistość niwelety, prędkość wyjściowa, natężenie ruchu, szerokość jezdni, szerokość poboczy, widoczność, liczba skrzyżowań, procentowy udział samochodów ciężarowych. Nie przytacza się tu ich w szczególności, jako że narzędzie do przeprowadzania analiz symulacyjnych (docelowo opracowane na potrzeby rozprawy i przedstawione w rozdziale 4.) pozwala na szybkie zmiany prędkości i przeprowadzanie kolejnych eksperymentów symulacyjnych.

Tabela 11. Średnie prędkości lokalne w ruchu swobodnym

Samochody	Szerokość jezdni [m]	Postać funkcyjna v_s [km/h]
Osobowe	6,00	$v_s = 75,26 - 0,8011 \cdot 1,0068^{-R \cdot \gamma}$
	7,00	$v_s = 78,61 - 0,552 \cdot 1,005^{-R \cdot \gamma}$
Ciężarowe	6,00	$v_s = 63,01 - 0,5949 \cdot 1,0068^{-R \cdot \gamma}$
	7,00	$v_s = 65,07 - 0,4095 \cdot 1,005^{-R \cdot \gamma}$

gdzie: R – promień krzywizny poziomej [m]; w przypadku odcinków prostych $R = \infty$; γ – kąt zwrotu kierunków trasy [°]

Źródło: Kempa (1983)

Wstępnie, w rozprawie do obliczenia średniej prędkości wykorzystano empiryczne dane opracowane przez Johna Glena Wardropa (Wardrop i Whitehead 1952, Wardrop 1952), który prędkość przedstawił jako funkcję natężenia ruchu oraz gęstość ruchu. Natężenie ruchu zostało zdefiniowane przez badacza jako liczba pojazdów w jednostce czasu, natomiast gęstość to liczba pojazdów w przeliczeniu na jednostkę drogi. Wardrop dokonał obliczeń średniej prędkości zdefiniowanej jako arytmetycznej średniej prędkości pojazdów obliczonej dla całej długości drogi. Prędkość ta wyniosła 53,5 km/h, Ashton (1966). Uwzględniając powyższą wartość, mając odległość możemy obliczyć czas jaki na zajmie przemieszczenie wyposażenie wojsk transportem drogowym.

W transporcie szynowym czas przejazdu można natomiast obliczyć na podstawie tzw. prędkości handlowej. Prędkość handlowa (komunikacyjna) jest określona jako iloraz odległości dzielącej punkt początkowy i końcowy trasy pokonywanej przez środek transportu i czasu, w jakim ta trasa została przebyta (Towpik 2017). Prędkość handlowa jest zależna od prędkości, z jaką porusza się środek transportu, jak również od czasu postoju na przystankach pośrednich, warunków ruchu itp. Jest parametrem pozwalającym realnie ocenić szybkość zapewnianą przez dany środek transportu. W Polsce średnia prędkość handlowa pociągów towarowych licencjonowanych przewoźników kolejowych w 2012 roku według Urzędu Transportu Kolejowego wyniosła 25,75 km/h (Wikipedia 2021). Średnia prędkość handlowa pociągów towarowych, wg danych PKP PLK SA w rozkładzie jazdy na rok 2018/2019, wynosiła 29,6 km/h (Ministerstwo Infrastruktury 2020). Wg Massel (2015) prędkość handlowa dla ruchu pasażerskiego, obliczona dla pięciu relacji wskazanych w źródle, wynosiła 111,5 km/h. Dla porównania podano, że średnia prędkość pojazdu drogowego na autostradzie A4 w 2013 r. wynosiła 90 km/h, natomiast na drogach krajowych – 65 km/h (Moto WP 2013).

Przedmiotem zadania optymalizacyjnego rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania z kryterium czasu przejazdu jest minimalizacja funkcji kryterium postaci (43) przy jednoczesnym spełnieniu ograniczeń (39)-(36).

$$F_3(\mathbf{XL}) = t^{p,ab}(\mathbf{XL}) = t^{p',ab}(\mathbf{XL}) = \min t^{p,ab}(\mathbf{XL}) \quad (44)$$

osiągające dla każdej relacji przewozu (a, b) oraz dla różnych dróg p oraz p' tej relacji $p, p' \in P^{ab}$ wartość minimalną.

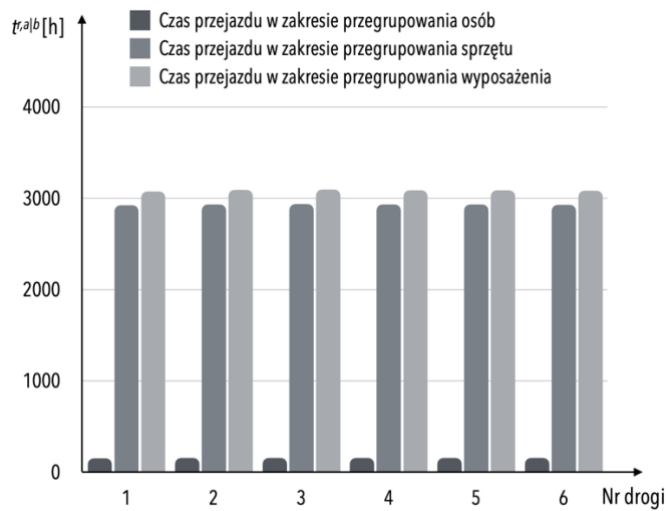
Wynikiem wyznaczenia $\mathbf{XL}_t^* = \mathbf{XL}^* = [x^*((i(s), m(s), j(s)), r))]$ rozwiązania spełniającego ograniczenia nakładane na wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk jest rozwiązanie dopuszczalne. Rozwiązaniem optymalnym zadania jest natomiast rozłożenie wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przegrupowania z uwzględnieniem wskazanego kryterium jakości rozwiązania.

Uzyskane koszty zewnętrzne dla poszczególnych dróg wskazano w tabeli 12. Wykres kosztów zewnętrznych w funkcji drogi przedstawiono na rys. 15.

Jak wynika z rys. 15, czas przejazdu w zakresie przemieszczania w przypadku każdej drogi jest praktycznie identyczny. Wykres wielkość przemieszczanego wyposażenia wojsk w funkcji drogi przedstawiono na rys. 16.

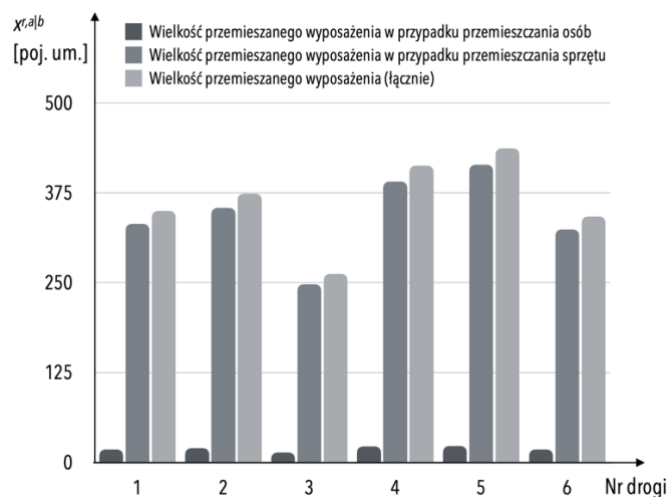
Tabela 12. Czasy przejazdu w zakresie przemieszczania wyposażenie wojsk w rozpatrywanej relacji, przypadające na daną drogę

Nr drogi	Czas przejazdu w zakresie przegrupowania osób [h]	Czas przejazdu w zakresie przegrupowania sprzętu [h]	Czas przejazdu w zakresie przegrupowania wyposażenia [h]
1	150,4176623	2924,787879	3075,206
2	156,8160173	2932,459524	3089,276
3	156,9673232	2937,531335	3094,499
4	156,1275	2930,938977	3087,066
5	154,2777273	2931,276818	3085,555
6	154,1889214	2929,589507	3083,778



Rys. 15. Czas przejazdu w zakresie przegrupowania w funkcji drogi

Źródło: opracowanie własne



Rys. 16. Rozłożenie wielkość przemieszczanego wyposażenia wojsk w funkcji drogi w przypadku kryterium czasu realizacji przejazdu w zakresie przemieszczania

Źródło: opracowanie własne

3.5. Optymalizacja wielokryterialna

Przedstawione w sekcjach 3.4.2.-3.4.4. kryteria przynależą do układu kryteriów cząstkowych, które powinny być traktowane jako współistniejące w zakresie wielokryterialnej oceny w modelu decyzyjnym, Jacyna (2001, p. 80). Zasadniczo wielokryterialna oceny rozłożenia wielkości przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach

przegrupowania polega na wykorzystaniu szczegółowych ocen wariantów (zależność (33)) rozłożenia, przy jednoczesnym uwzględnieniu współczynników względnej ważności kryteriów cząstkowych. Taka ocena pozwala na wybór możliwie najlepszego wariantu realizacji rozłożenia, Jacyna (2001, p. 80).

Kryteria cząstkowe nie muszą być jednoznacznie zgodne, rzadko zdarza się, iż wszystkie kryteria cząstkowe będą prowadziły do jednoznacznej optymalizacji rozwiązania. W związku z występowaniem wielorakości celów konieczne jest ustalenie zasad optymalności rozwiązania. Mierzalność, kwantyfikowalność rozwiązań uzyskać można w efekcie poprzez określenie rozpiętości pomiędzy rozwiązaniem otrzymanym a rozwiązaniem idealnym. Należy w związku z tym poszczególnym stopniom realizacji celu przypisać „liczby rzeczywiste z przyjętej skali, w umownych jednostkach miary”, Jacyna (2001, p. 24).

Warunki ograniczające realizację celu wraz z ewentualnymi warunkami brzegowymi tworzą zbiór decyzji dopuszczalnych. Zatem zakładając dwa cele C_1 i C_2 realizowane przy spełnieniu warunków g_1 i g_2 otrzymuje się zbiory decyzji dopuszczalnych D_1 i D_2 (zbiory te generują warunki). Cele C_1 i C_2 decydują o charakterze warunków g_1 i g_2 , co w rezultacie może prowadzić do następujących relacji między dwoma zbiorami decyzji D_1 i D_2 .

Pierwszą z takich relacji jest, że zbiory decyzji dopuszczalnych są identyczne (rys. 17), to znaczy, że zachodzą stosunki wskazane w zależności (45).

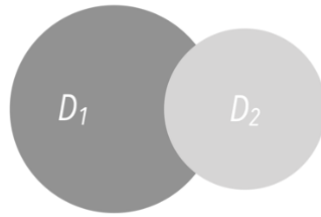
$$D_1 = D_2 = D; D_1 \cap D_2 = D \quad (45)$$



Rys. 17. Identyfikacja zbiorów dopuszczalnych

W przypadku, gdy zbiory decyzji dopuszczalnych nie pokrywają się, to istnieje niepusty iloczyn zbiorów decyzji dopuszczalnych (rys. 18), wg wskazania w zależności (46).

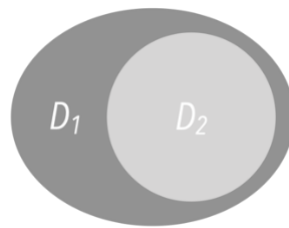
$$D_1 \cap D_2 \neq \emptyset \quad (46)$$



Rys. 18. Brak zbioru pustego pośród zbiorów dopuszczalnych

Kolejna relacja pomiędzy zbiorami, związana jest z faktem, że zbiór D_2 jest podzbiorem zbioru D_1 ($D_2 \subset D_1$). Zatem niepusty iloczyn zbiorów decyzji dopuszczalnych jest równy D_2 , co przedstawiono na rys. 19 oraz w postaci zależności (47).

$$D_2 \subset D_1 = D_2 \quad (47)$$



Rys. 19. Relacja podzbiorów

Kolejna relacja dotyczy zasadniczo braku relacji, czyli zbiory D_1 i D_2 są wzajemnie rozłączne. Iloczyn zbiorów decyzji dopuszczalnych jest pusty (rys. 20), co można zapisać jako zależność (48).

$$D_1 \cap D_2 = \emptyset \quad (48)$$



Rys. 20. Zbiór pusty jako relacja

Z przeprowadzonej analizy wynika, że warunkiem koniecznym wzajemnej zależności (powiązania) celów w problemie optymalizacji wielokryterialnej jest istnienie wspólnego

zbioru decyzji dopuszczalnych D . Warunek ten jest spełniony tylko w pierwszych trzech przypadkach relacji pomiędzy zbiorami decyzji dopuszczalnych dla różnych celów – zależności (44)-(46). Są to tzw. cele zależne. Ostatni wariant przedstawia natomiast cele niezależne, Jacyna (2001, pp. 24-25).

Zbiorem rozwiązań dopuszczalnych D problemu optymalizacji wielokryterialnej jest zbiór decyzji wspólnych dla wszystkich uwzględnionych w modelu celów mierzalnych, Jacyna (2001, p. 26).

Funkcja kryterium jest funkcją, która opisuje zależność między decyzją a celem. W podejściu do uzyskiwania rozwiązań zwanym optymalizacją wielokryterialną wszystkie funkcje kryterium określone są na wspólnym zbiorze decyzji dopuszczalnych (rozwiązań dopuszczalnych) D . Jednakże w optymalizacji wielokryterialnej cele są ze sobą niezgodne, Jacyna (2001, p. 26).

Cele niezgodne to cele, nazwane wcześniej celami wielorakimi, pomiędzy którymi występuje zależność polegająca na tym, że podwyższenie ważności osiągnięcia jednego celu skutkuje obniżeniem ważności osiągnięcia celów pozostałych. Zatem istotą problemu optymalizacji wielokryterialnej jest znalezienie wspólnej miary ilościowej służącej do mierzenia stopnia osiągnięcia celów niezgodnych w taki sposób (Jacyna 2001, p. 26), aby rozwiązanie było możliwie najbardziej satysfakcjonujące dla wszystkich interesariuszy.

Modelowanie rzeczywistych problemów transportowych, w których brane są pod uwagę różne cele można osiągnąć poprzez uwzględnienie w zadaniu modelowania wielokryterialnego funkcji kryterium złożonej z wielu cząstkowych funkcji celu.

Optymalizacja wielokryterialna systemów transportowych jest wyidealizowaną sytuacją decyzyjną, w której:

1. istnieje skończona liczba mierzalnych celów (w przypadku gdy cel nie jest mierzalny w sposób bezpośredni, należy najpierw dokonać przekształcenia celu niemierzalnego w mierzalny), które należy osiągnąć w stopniu optymalnym – zakłada się zatem, że zdefiniowanie zbiorów kryteriów cząstkowych, względem których przeprowadzona będzie ocena różnych wariantów tj.: $F = \{f(1), f(2), \dots, f(k), \dots, f(K)\}$;
2. wszystkie mierzalne cele są określone na tym samym zbiorze decyzji dopuszczalnych D ;
3. podstawę oceny i wyboru decyzji stanowi zbiór celów przedstawionych w postaci wieloskładnikowej, wektorowej funkcji kryterium;

4. przekierowanie realizacji jednego celu w stronę ściśle optymalnej pociąga za sobą obniżenie stopnia realizacji pozostałych celów (występuje zjawisko konkurencyjności w zbiorze rozpatrywanych celów);
5. kryteriom cząstkowym (ze zdefiniowanego zbioru F) przyporządkowuje się pewną wartość liczbową $c(k)$, gdzie $k = 1, \dots, K$, którą interpretować należy jako względną ważność (stopień ważności, istotność danego kryterium nad innymi) k -tego kryterium. Założenie to oznacza, że:
 - każdemu kryterium $f(k)$ w zbiorze kryteriów F jest przyporządkowana liczba $c(k)$: $c(k) \geq 0$, czyli miara ważności (waga) względnej $f(k)$ -tego kryterium cząstkowego;
 - jeżeli kryterium $f(k)$ jest ważniejsze od kryterium $f(m)$, $k \neq m$, $m = 1, \dots, K$, to $c(k) > c(m)$, jeśli zaś $f(k)$ oraz $f(m)$ są tak samo ważne, to liczby $c(k)$ oraz $c(m)$ są sobie równe: $c(k) = c(m)$;
 - jeżeli liczby $c(k)$ i $c(m)$ są przyporządkowane odpowiednio do $f(k)$ oraz $f(m)$, to suma $c(k) + c(m)$ odpowiada łącznej ważności $f(k)$ oraz $f(m)$. Zachodzą wówczas następujące zależności pomiędzy kryteriami cząstkowymi:
 - jeżeli $(f(k) \gg f(m)) \wedge (f(m) \gg f(n)) \Rightarrow (f(k) \gg f(n))$, to zachodzi relacja przechodniości (poprzez symbol „ \gg ” oznaczono frazę „ważniejsze niż”),
 - jeżeli $(f(k) \equiv f(m)) \Rightarrow (f(m) \equiv f(k))$, to zachodzi relacja symetrii,
 - jeżeli $(f(k) \wedge f(m)) \equiv (f(k)) \Rightarrow c(k) = 0$, Jacyna (2001, pp. 26-27).

Poszukiwanie metod pozwalających na ocenę decyzji z punktu widzenia wielu kryteriów wynika ze struktury formułowanych celów. W zależności od typu działalności organizacji, na rzecz której optymalizacja byłaby dokonywana, dotyczy ona np. maksymalizacji sumy zysku, stopy zysku, wielkości produkcji, wydajności pracy, wykorzystania zdolności produkcyjnych lub minimalizacji kosztów, niewykorzystania surowca, niewykorzystania zdolności produkcyjnych itp. Cele te w warunkach rzeczywistych są złożone, posiadają wielowymiarową strukturę, stąd też metodą pozwalającą na ocenę decyzji, biorąc pod uwagę wiele cząstkowych funkcji kryteriów, jest metoda wielokryterialnej oceny rozwiązań (optymalizacja wielokryterialna), Jacyna (2001, p. 27).

Optymalizacja wielokryterialna lub inaczej problem optymalizacji przy wielorakości celów polega na poszukiwaniu „... w rozpatrywanym zbiorze decyzji takiej, która zapewniłaby optymalną realizację pewnego wyspecjalizowanego zbioru konkurujących ze sobą celów ...”, Jacyna (2001, p. 27). Zatem problem optymalizacji wielokryterialnej lub inaczej

programowania wielokryterialnego stosowany jest „... do wyboru rozwiązania godzącego cele wyrażone przez różne cząstkowe kryteria optymalizacji”, Jacyna (2001, p. 28).

„Wielokryterialne problemy optymalizacyjne charakteryzują się dwoma podstawowymi elementami, tj. opisem zbioru rozwiązań dopuszczalnych oraz zbiorem funkcji (kryteriów) odwzorowujących zbiór rozwiązań w zbiór ocen jakości (na ogół, w zbiór liczb rzeczywistych)”, Jacyna (2001, p. 28).

W efekcie problem poszukiwania rozwiązania x^* maksymalizującego lub minimalizującego globalną funkcję kryterium F (złożoną z wielu kryteriów cząstkowych) można zapisać w postaci zależności (49), przy określonych ograniczeniach.

$$F = \langle f_1(x), f_2(x), \dots, f_s(x), \dots, f_S(x) \rangle \rightarrow \max/\min \quad (49)$$

Wówczas zbiór rozwiązań dopuszczalnych zdefiniowany jest jako zbiór elementów x w postaci zależności (50), przy określonych ograniczeniach.

$$D = \{x: a_s(x) \leq b_s, s = 1, \dots, S\} \quad (50)$$

Zaś odpowiadająca mu przestrzeń kryteriów oznaczona jest w sposób wskazany zależnością (51).

$$D_f = \{F: F = \langle f_1(x), f_2(x), \dots, f_s(x), \dots, f_S(x) \rangle, x \in D\} \quad (51)$$

gdzie:

- $x = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$ – wektor zmiennych decyzyjnych,
- $f_s(x)$, dla $s = 1, \dots, S$; $S \geq 2$ – kryteria cząstkowe,
- D – zbiór rozwiązań dopuszczalnych określonych za pomocą ograniczeń.

„W zależności od postaci analitycznej cząstkowych funkcji kryterium $f_s(x)$ oraz ograniczeń $a_s(x) \leq b_s$ możemy mówić o różnych rodzajach wielokryterialnego programowania matematycznego. Jeżeli wszystkie kryteria i ograniczenia wyrażone są za pomocą związków liniowych, to mówimy o wielokryterialnym programowaniu liniowym. W przypadku, gdy przynajmniej jedno z kryteriów lub ograniczeń wyrażone jest w postaci nieliniowej, mamy do czynienia z wielokryterialnym programowaniem nieliniowym”, Jacyna (2001, p. 28). Jeżeli zbiór rozwiązań dopuszczalnych przedstawiony jest w postaci układu równań i nierówności, wówczas problem optymalizacyjny jest problemem programowania matematycznego. W przypadku bardziej skomplikowanych struktur obliczeniowych warto sięgnąć po inne

metody obliczeniowe, numeryczne bądź symulacyjne, w szczególności gdy liczba kryteriów i ograniczeń uznana zostanie za znaczną.

Analiza i ocena wariantów charakteryzowanych przez zmienne decyzyjne o różnych typach i jednostkach, takich jak przedstawiono w dotychczasowych rozważaniach, wymaga ujednolicenia i unormowania wyników. W tym celu zastosowano jedną z metod unitaryzacji zerowej. Metody te charakteryzują się przyjęciem pewnego, jednolitego punktu odniesienia (Jędrzejczyk et al. 2016), którym jest rozstęp pomiędzy skrajnymi wartościami otrzymanymi w danej próbie (minimalne i maksymalne wartości – zależności (52-67)). Transformacje oryginalnych wartości cząstkowych funkcji kryteriów w unormowane zachodzą zgodnie z zależnościami (52-57). W przypadku zastosowania metody, rozpatrywane w rozprawie cząstkowe funkcje kryterium są traktowane jako destymulanty, stąd postać ww. zależności (opracowano je na podstawie Jędrzejczyk et al. 2016, p. 374).

$$u^{c,W1,a}(p) = \frac{\frac{\max}{p} F_1(XL^*,p,c,W1,a) - F_1(XL^*,p,c,W1,a)}{\frac{\max}{p} F_1(XL^*,p,c,W1,a) - \frac{\min}{p} F_1(XL^*,p,c,W1,a)} \quad (52)$$

gdzie:

- $u^{c,W1,a}(p)$ – unormowana wartość cząstkowej funkcji kryterium kosztów średnich (c) w przypadku przemieszczania wyposażenia uzyskane na podstawie modelu analitycznego tj. modelu decyzyjnego (a) dla p -tej drogi w przypadku wariantu $W1$,
- $F_1(XL^*,p,c,W1,a)$ – wartość funkcji kryterium kosztów średnich (c) w przypadku przemieszczania wyposażenia uzyskane na podstawie modelu analitycznego tj. modelu decyzyjnego (a) dla p -tej drogi w przypadku wariantu $W1$, [zł].

$$u^{c,W2,a}(p) = \frac{\frac{\max}{p} F_1(XL^*,p,c,W2,a) - F_1(XL^*,p,c,W2,a)}{\frac{\max}{p} F_1(XL^*,p,c,W2,a) - \frac{\min}{p} F_1(XL^*,p,c,W2,a)} \quad (53)$$

gdzie oznaczenia są analogiczne jak w przypadku zależności (52), przy czym są opracowane dla wariantu $W2$.

$$u^{c,W3,a}(p) = \frac{\frac{\max}{p} F_1(XL^*,p,c,W3,a) - F_1(XL^*,p,c,W3,a)}{\frac{\max}{p} F_1(XL^*,p,c,W3,a) - \frac{\min}{p} F_1(XL^*,p,c,W3,a)} \quad (54)$$

gdzie oznaczenia są analogiczne jak w przypadku zależności (52), przy czym są opracowane dla wariantu W3.

Zależności (52)-(54) są identyczne w przypadku modelu symulacyjnego – wystarczy notację a podmienić na s .

$$u^{t,W1,a}(p) = \frac{\max_p F_1(XL^*,p,t,W1,a) - F_1(XL^*,p,t,W1,a)}{\max_p F_1(XL^*,p,t,W1,a) - \min_p F_1(XL^*,p,t,W1,a)} \quad (55)$$

gdzie :

- $u^{t,W1,a}(p)$ – unormowana wartość cząstkowej funkcji kryterium czasu trwania przegrupowania (t) w przypadku przemieszczania wyposażenia uzyskane na podstawie modelu analitycznego tj. modelu decyzyjnego (a) dla p -tej drogi w przypadku wariantu W1,
- $F_1(XL^*,p,t,W1,a)$ – wartość funkcji kryterium czasu trwania przegrupowania (t) w przypadku przemieszczania wyposażenia uzyskane na podstawie modelu analitycznego tj. modelu decyzyjnego (a) dla p -tej drogi w przypadku wariantu W1, [zł].

$$u^{t,W2,a}(p) = \frac{\max_p F_1(XL^*,p,t,W2,a) - F_1(XL^*,p,t,W2,a)}{\max_p F_1(XL^*,p,t,W2,a) - \min_p F_1(XL^*,p,t,W2,a)} \quad (56)$$

gdzie oznaczenia są analogiczne jak w przypadku zależności (55), przy czym są opracowane dla wariantu W2.

$$u^{t,W3,a}(p) = \frac{\max_p F_1(XL^*,p,t,W3,a) - F_1(XL^*,p,t,W3,a)}{\max_p F_1(XL^*,p,t,W3,a) - \min_p F_1(XL^*,p,t,W3,a)} \quad (57)$$

gdzie oznaczenia są analogiczne jak w przypadku zależności (55), przy czym są opracowane dla wariantu W3.

Zależności (55)-(57) są identyczne w przypadku modelu symulacyjnego – wystarczy notację a podmienić na s .

Wartości funkcji kryteriów cząstkowych transformowane do wartości unormowanych są następnie sumowane dla każdej drogi przemieszczania osobno (zgodnie z zależnością (58),

a ostatecznie ta zsumowana wartość $u^{wr,a/s}(p)$, która jest najwyższą staje się wartością suboptymalnej funkcji wielokryterialnej i traktowana jest jako wariant drogi o wybranych do oceny cząstkowych funkcjach kryterium najlepiej spełniających oczekiwania (charakteryzowanej najlepszymi walorami wdrożeniowymi). Jednocześnie najniższa wartość $u^{wr,a/s}(p)$ oznacza, że oceniane cząstkowe funkcje kryterium są najmniej predestynowane do wdrożenia (charakteryzowane najgorszymi walorami wdrożeniowymi).

$$\forall p \in \mathbf{P}: u^{wr,a/s}(p) = u^{c,wr,a/s}(p) + u^{t,wr,a/s}(p) \quad (58)$$

Wobec takiego podejścia do zagadnienia przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych określa się potencjalne środki transportu, które mogą być stosowane do przewozu wyposażenia oraz określa się także parametry techniczno-ekonomiczne sieci transportowej rejonu przegrupowania. Formuluje się zadanie optymalizacyjne rozłożenia środków transportu w rejonie przegrupowania w sensie minimalizacji kosztów średnich, w sensie minimalizacji kosztów zewnętrznych oraz w sensie minimalizacji czasu przegrupowania. Aplikacja modelu decyzyjnego potwierdzi słuszność przyjętych założeń. Przewiduje się, że w wyniku rozwiązania zadania optymalizacyjnego adekwatnego do sytuacji decyzyjnych przemieszczania wyposażenia wyznaczone będą te drogi, które powodują, że koszty średnie, zewnętrzne oraz czas przegrupowania będą minimalne. Będzie zatem możliwość obniżać całkowity koszt przemieszczania wyposażenia. Oprogramowanie modelu decyzyjnego (przedstawione w rozdziale 4.) w postaci modelu symulacyjnego pozwoli na uzyskanie ewidentnych efektów finansowych dla każdego rejonu przegrupowania, przy jednoczesnym uwzględnieniu warunków rzeczywistych i znacznie większej liczby parametrów mających wpływ na przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych niż w przypadku zastosowania wyłącznie formalizmu matematycznego.

4. Implementacja komputerowa modelu decyzyjnego

Dotychczasowe efekty i wyniki przedstawione w rozprawie uzyskano w oparciu o stosowanie rozwiązań analitycznych (analityczne metody programowania matematycznego) i grupowania klastrów danych. Uzyskany model decyzyjny posłużył do opracowania modelu symulacyjnego, dzięki któremu możliwe jest zweryfikowanie wyników pozyskanych metodami analitycznymi przy jednoczesnym rozważeniu potencjalnych sytuacji awaryjnych lub kryzysowych, które mogłyby wystąpić na drogach komunikacyjnych branż pod uwagę przy opracowywaniu przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych.

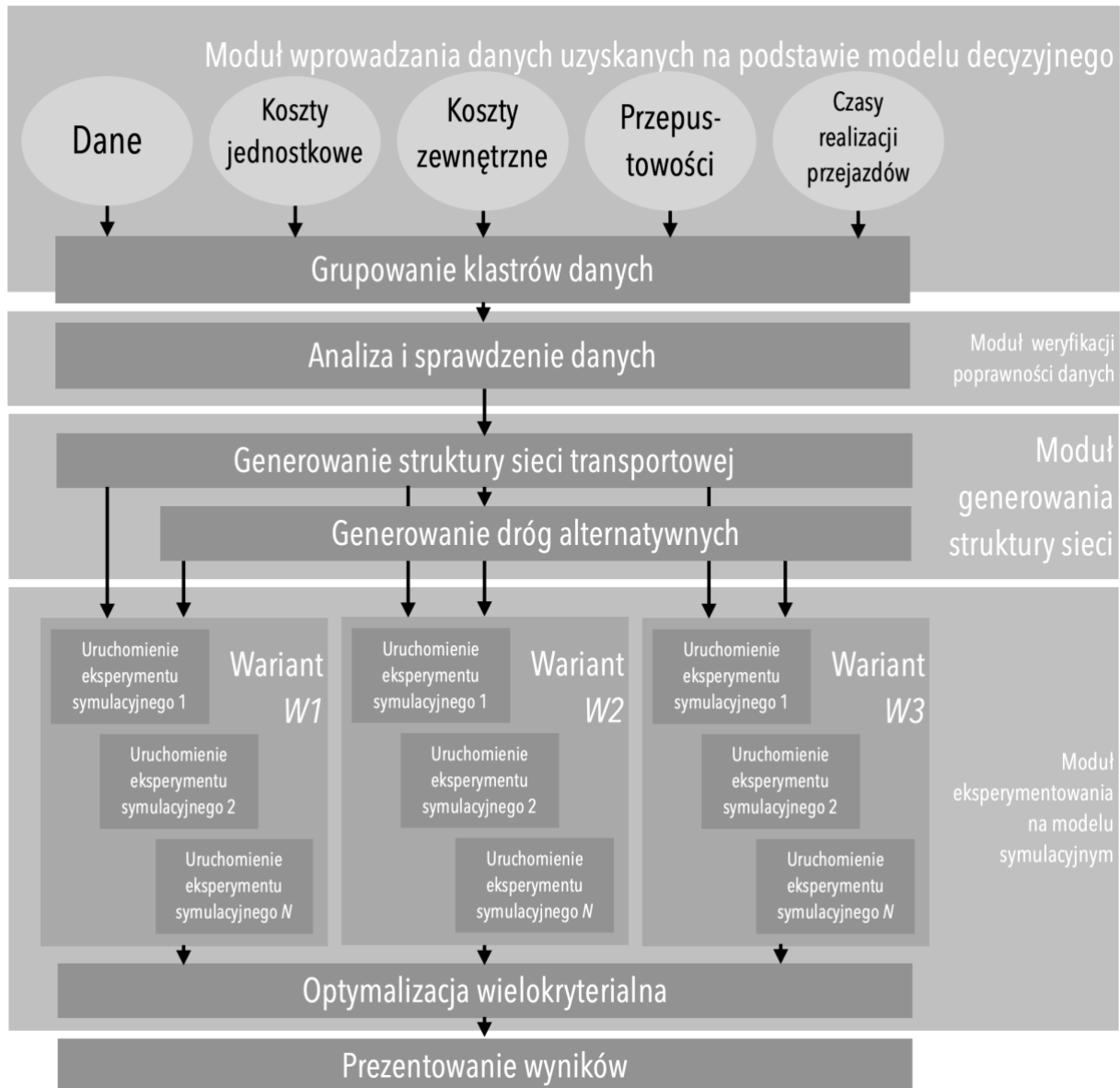
Model symulacyjny wg Kostrzewski (2018, p. 63) to model złożony, bowiem składa się nań model formalny oraz funkcjonalne algorytmy numeryczne zakodowane w oprogramowaniu. Warto przy tym dodać, że „każdy model symulacyjny ma charakter unikatowy – jego rozwiązania nie mogą być wykorzystywane, w sposób bezpośredni, do analizy innych problemów decyzyjnych (wymaga to co najmniej przebudowy modelu symulacyjnego)”, Kostrzewski (2018, p. 79). Ważne jest, wobec tego celu, aby przełożenie modelu formalnego (konceptyjnego, analitycznego) do postaci modelu symulacyjnego było realizowane w sposób jednoznaczny i aby funkcjonalność tych modeli była tożsama, homomorficzna, Kostrzewski (2018, p. 60). W związku z tym pośród efektów rozprawy jest również porównanie wyników uzyskanych z modelu analitycznego i symulacyjnego.

W bieżącym rozdziale przedstawiono zbudowany model symulacyjny, a następnie przedstawiono uzyskane za jego pomocą wyniki i porównano je z wynikami modeli analitycznych. Model symulacyjny został skonstruowany i podlega analizom w oprogramowaniu komputerowym Siemens/Technomatix Plant Simulation (wersja 13) będącym kompilatorem z możliwością programowania poprzez zastosowanie język programowania wysokiego poziomu SimTalk, stosowanego w oprogramowaniu. Schemat blokowy aplikacji komputerowej przedstawiono na rys. 21.

4.1. Budowa modelu symulacyjnego

Dotychczasowe obliczenia mogłyby zostać wykonane z wykorzystaniem istniejącego oprogramowania służącego do topologii grafu oraz rozłożenia wielkość przemieszczanych ładunków lub osób (np. w pracach Ambroziak et al. 2014, Ambroziak et al. 2013 posłużono się dodatkiem do pakietu MS Excel – Solver i dokonano rozłożenia wielkość przemieszczanych

pasażerów na drogi w zadanej sieci). Są to oprogramowania znane od wielu lat, a ich stosowanie cieszy się zainteresowaniem, przy czym nie są one skonstruowane w myśl o modelach dynamicznych przedstawionych w rozdziale 3.1.



Rys. 21. Schemat blokowy aplikacji komputerowej

Źródło: opracowanie własne

Tego typu programy komputerowe wymagają dokładnego odwzorowania topologii grafu oraz wprowadzenia następujących danych:

- wielkości kosztów jednostkowych przejścia poszczególnych łuków,
- przepustowości poszczególnych łuków,

- wielkości zapotrzebowania na transport w relacjach,
- względnej ważności poszczególnych kryteriów,
- progów zgodności i niezgodności.

Autor podjął decyzję o opracowaniu modelu symulacyjnego stanowiącego implementację modelu decyzyjnego i jednocześnie wsparcie dla obliczeń szczególnie w przypadku różnych nieoczywistych, niewyidealizowanych wariantów sytuacyjnych. Jest tak, jako że należałoby wziąć pod uwagę np.:

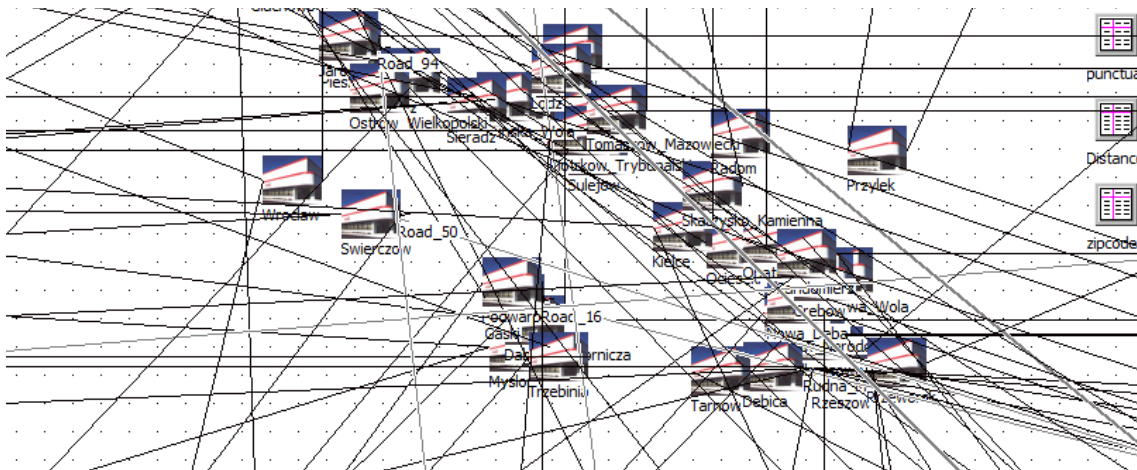
- bieżący ruch na drogach, stan infrastruktury i inne czynniki wywołujące utrudnienia na drogach wskazane w sekcji 3.3. i dalej,
- elektryfikację linii kolejowych (a w zasadzie jej brak na niektórych odcinkach dróg szynowych),
- zróżnicowanie kosztów jednostkowych w ujęciu typu przedmiotu przewozu (pasażerski, ładunkowy),
- zróżnicowanie, niepewność, niestabilność aspektów związanych z kosztami zewnętrznymi,
- lokalizacje miejsc obsługi podróżnych z uwzględnieniem potrzeb parkowania środków transportu służących do przewozu ładunków niebezpiecznych, będących uwzględnionymi w międzynarodowej konwencji dotyczącej drogowego przewozu towarów i ładunków niebezpiecznych ADR,
- zróżnicowanie oraz obwarowania dotyczące prędkości jazdy w sieci transportowej.

Wyżej wymienione czynniki nie należą do stałych definiujących sieć transportową, autor zdecydował zatem przedstawić różne warianty decyzyjne przy zastosowaniu oprogramowania.

Wybrane wyżej wymienione czynniki zostały uwzględnione w analizach przedstawionych w dalszej części rozprawy. Nastąpiło to poprzez implementację zawartości licznych tabel oraz równań wskazanych w rozprawie do oprogramowania. Ponadto model symulacyjny umożliwia przeprowadzanie większej gamy analiz w porównaniu do oprogramowania dedykowanego rozłożeniu wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w zadanej sieci transportowej.

Dane, wartości parametrów zebrane i wyznaczone lub opracowane w rozdziale 3 (oraz w załączniku 6) posłużyły za dane wsadowe do oprogramowania (modelu symulacyjnego) służącego do przeprowadzania analiz przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych dla ustalonych relacji przegrupowania. Przebieg prac przedstawić w oparciu o schemat w postaci rys. 2.

W oprogramowaniu zaimplementowana jest struktura sieci transportowej, naniesiona na mapę kraju. Za obiektem reprezentującym mapę kraju znajdują się zarówno wierzchołki i łuki grafu (rys. 22). Każdemu wierzchołkowi odpowiadają współrzędne mapy wyrażone w liczbie pikseli w jej wzdłuż i wszerz, a każdy z łuków stanowi połączenie pomiędzy wierzchołkami zdefiniowane w tabeli zawierającej odległości pomiędzy wierzchołkami (tabela *Distances*, która powstała w oparciu o zawartość tabel Z.1.1.-Z.1.6. w rozprawie doktorskiej). Generowane połączenia następuje na podstawie tabeli *Distances* w efekcie wywołania dwóch procedur zaimplementowanych w modelu symulacyjnym tj. procedury *BuildPlan* służącej skonstruowaniu planu przemieszczania na podstawie danych wsadowych oraz *ApplyPlan*, służącej do zaimportowania skonstruowanego planu do różnych obiektów i procedur stanowiących części integralne modelu symulacyjnego. Implementacji w szczególności podlega macierz *XL* uzyskana w wyniku rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk (załącznik 6).



Rys. 22. Struktura grafu zaimplementowana w modelu symulacyjnym

Źródło: opracowanie na podst. Siemens/Technomatix Plant Simulation (wer. 13)

Dane do analizy dróg przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych wczytywane są na podstawie odpowiednich tabel zaimplementowanych w modelu symulacyjnym. Za prawidłowe przypisanie danych obiektom opracowanym w oprogramowaniu odpowiada procedura przedstawiona na rys. 23 (jest to jednocześnie przykładowy zapis aplikacji języka SimTalk w oprogramowaniu).

```

i,s
  i          : integer;
  t,s       : object;
do
  -- Delete deliveries from the objects
  For i := 1 to Network.Distances.YDim loop
    t := str_to_obj ("root.Network."+Network.Distances[0,i]+".Deliveries");
    t.Delete;
    s := str_to_obj ("root.Network."+Network.Distances[0,i]+".Punctuality");
    s.Delete;
  next;
  -- Record new plans
  For i := 1 to Plan.YDim loop
    -- Find table to write to
    t := str_to_obj ("root.Network."+Plan[2,i]+".Deliveries");
    s := str_to_obj ("root.Network."+Plan[2,i]+".Punctuality");
    -- Copy ID
    t[1,t.YDim+1] := Plan[1,i];
    s[1,s.YDim+1] := Plan[1,i];
    -- Set delivery starting time
    t[2,t.YDim] := Plan[4,i];
    s[2,s.YDim] := Plan[4,i];
    -- Set destination object
    t[3,t.YDim] := Plan[3,i];
    s[3,s.YDim] := Plan[3,i];
    -- Set number of pallets
    t[4,t.YDim] := Plan[5,i];
  next;

```

Rys. 23. Procedura *ApplyPlan* służąca do wprowadzenia danych wsadowych w modelu symulacyjnym

Źródło: Opracowanie z wykorzystaniem kompilatora Siemens/Technomatix Plant Simulation (wersja 13)

W modelu symulacyjnym wprowadzono m.in. dane dotyczące:

- usytuowania wierzchołków grafu w interakcji z mapą kraju,
- zdefiniowane położenie wierzchołków pozwoliło na połączenie ich wg wskazań zamieszczonych w poprzednim rozdziale pracy z pomocą łuków grafu,
- łukom nadano parametry je charakteryzujące, w tym ich długości,
- zdefiniowano dopuszczalne prędkości przemieszczania się pojazdów wzdłuż łuków, w uzależnieniu od pory dnia (tabela 13) oraz rodzaju drogi, którą odzwierciedla łuk (według wskazań zamieszczonych w poprzednich rozdziałach pracy),
- koszty obsługi pojazdów oraz infrastruktury punktowej w wybranych lokalizacjach (wierzchołkach grafu), a także koszty przewozu wg wskazań w poprzednich rozdziałach,
- wygenerowano szereg parametrów o charakterze losowym, których celem było urealnienie nieoczekiwanych sytuacji na drogach w czasie realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych, w tym ewentualnych awarii stosowanych środków transportu – zabiegi takie nie były zastosowane w modelu decyzyjnym (analitycznym), a ich wzmożone działanie jest analizowane w przypadku wariantu W3).

Tabela 13. Prędkość przemieszczania się w zależności od pory dnia

Godzina początkowa [dd:hh:mm:ss.msms]	Godzina końcowa [dd:hh:mm:ss.msms]	Prędkość [km/h]
0.0000	7:00:00.0000	90
7:00:00.0000	12:00:00.0000	60
12:00:00.0000	17:00:00.0000	70
17:00:00.0000	21:00:00.0000	60
21:00:00.0000	1:00:00:00.0000	90

W efekcie uzyskano szereg parametrów pozwalających na szerszą ocenę proponowanych rozwiązań z wykorzystaniem modelu symulacyjnego w stosunku do przedstawionego rozwiązania analitycznego.

W przypadku rozprawy doktorskiej koszty jednostkowe nie stanowiły wystarczającej podstawy do prowadzonych analiz, jako że wzięto pod uwagę również trudne (i rzadko podejmowane) zagadnienia szacowania kosztów zewnętrznych oraz analizy czasu trwania przemieszczania.

Rysowanie grafu w programie jest zautomatyzowane, odbywa się przy pomocy predefiniowanych metod (funkcji, procedur) specjalnie zaprogramowanych w tym celu w oprogramowaniu Siemens/Technomatix Plant Simulation (wersja 13). Treści procedury wraz z objaśnieniami przedstawiono poniżej. Wobec opracowania takiej sieci potrzebne są naturalnie informacje stanowiące opisy wierzchołków i łuków. W oprogramowaniu znajduje się bitmapa przedstawiająca Polskę. Każdej miejscowości odpowiada jednoznaczne położeniu danego piksela na mapie. Łuki powstają po uprzednim ich zdefiniowaniu w oparciu o bitmapę oraz obiekty reprezentujące wierzchołki (*Proc.*).

Podczas sporządzania grafu za pomocą narzędzi dostępnych w programie następuje automatyczne zliczanie wierzchołków i łuków w tabelach wbudowanych w oprogramowaniu. Program ustala również liczbę relacji oraz liczbę dróg w danej relacji. Przy wyznaczaniu dróg program umieszcza je w dedykowanej tabeli. Każdemu pojazdowi umownemu odpowiada jeden wiersz w tabeli.

Koszty jednostkowe zostają przypisane w oprogramowaniu, podobnie możliwe jest przypisanie zróżnicowanie prędkości jazdy. Kolejną czynnością jest wprowadzenie wielkości

kosztów jednostkowych i przepustowości łuków, po uprzednim wybraniu opcji *uzupełnianie danych*, a następnie klikając na oznaczenie danego łuku.

Ustalenia te oraz inne określone w oprogramowaniu parametry pozwalają na dokonanie analiz wskaźników i mierników stosowanych w działalności transportowej jak np.:

- praca przewozowa, [tkms],
- wielkość przewiezionego ładunku, [t],
- koszt transportu na jednostkę ładunku, [zł/szt.],
- koszt transportu przypadające na środek transportu, [zł/poj.],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów, [%],
- terminowość realizacji przegrupowania, [%],
- wskaźnik kongestii, [min].

W efekcie zautomatyzowanego narysowania grafu odwzorowującego strukturę sieci transportowej i wprowadzeniu danych niezbędnych do rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk przystępuje się do tworzenia kolejnego wariantu zagadnienia. Można to zrobić na dwa sposoby, tzn. (a) usunąć pełen graf i stworzyć nowy graf, a następnie wprowadzać dane ponownie lub (b) dodać do istniejącego grafu kolejne pozycje, a przypadku braku zapotrzebowania na przemieszczanie w zw. z danymi wierzchołkami i łukami przypisać zerowe wartości obciążenia. Drugi sposób jest niewątpliwie prostszy i szybszy, co potwierdziły liczne przeprowadzone przez autora eksperymenty z wykorzystaniem oprogramowania. W skopiowanym wariantcie możemy modyfikować strukturę grafu, wielkości kosztów jednostkowych oraz zapotrzebowanie na przemieszczenie w danych relacjach.

Sporządzanie danych do programu zawarte zostało w szczególności w poszczególnych sekcjach rozdziału 3. (i załącznika 6).

4.2. Implementacja wariantu 1 modelu decyzyjnego w oprogramowaniu

Wyniki rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk (opracowane w oparciu o kryterium równych średnich kosztów przejścia poszczególnymi drogami w danej relacji) wraz z obliczonymi kosztami zostały wykorzystane w oprogramowaniu tak, aby stanowiły sytuację wyidealizowaną, a więc optymalną. Przy czym istotą oprogramowania jest opracowanie wyników dla wariantów rozbieżnych z optymalnymi, wzbogaconych o problemy i wyzwania rzeczywistych sieci transportowych, co pociąga za sobą konieczność rozpatrywania wariantów W2 i W3.

W rozdziale 3 i załączniku 6 przedstawiono wyniki dotyczące rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk. Wyniki te z jednej strony stanowią wsad do modelu symulacyjnego, a ponadto pozwolą na porównanie go z modelem analitycznym w kolejnych fragmentach pracy (sekcja 4.5.). W oprogramowaniu można zapoznać się ze szczegółami dotyczącymi każdego odrębnego obiektu typu wierzchołek, łuk, pojedynczy pojazd. Niemniej jednak z punktu widzenia globalnej oceny rozwiązań, wobec porównania ich z wartościami uzyskanymi przy zastosowaniu modelu analitycznego, szczegóły na ten temat nie są szerzej komentowane w rozprawie. Warto jednak wspomnieć do jakich elementów wspierających przeprowadzenie analiz owe szczegóły prowadzą, tj.:

- wykres kosztów realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w zadanej relacji vs. wykres kosztów przestoju w czasie przemieszczania,
- wykres dotyczący punktualności zrealizowanych przejazdów w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w zadanej relacji,
- wykres kosztów obsługi procesów towarzyszących przemieszczaniu wyposażenia wojsk lądowych w zadanej relacji, w obszarze danego wierzchołka,
- tabela kosztów obsługi procesów towarzyszących przemieszczaniu wyposażenia wojsk lądowych w zadanej relacji, w obszarze danego wierzchołka (przykładowa zawartość przedstawiona została w tabeli Z.7.1.),
- tabela dotycząca punktualności przejazdu każdego z pojazdów podczas przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w zadanej relacji (nie prezentowana z racji znacznych rozmiarów reprezentowanych przez tysiące wierszy),
- tabela dotycząca kosztów przejazdu każdego z pojazdów podczas przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w zadanej relacji (nie prezentowana z racji znacznych rozmiarów reprezentowanych przez tysiące wierszy),

Należy jednakże zauważyć, że w zakresie wykonywanych badań i analiz szczególnie interesujące są „globalne” wyniki w skali poszczególnych sześciu dróg i jako takie przedstawione zostaną w kolejnych sekcjach pracy (tabele i wykresy z powyższego wypunktowania, z wyjątkiem tabeli Z.7.1, zasadniczo nie są przytaczane w rozprawie wprost).

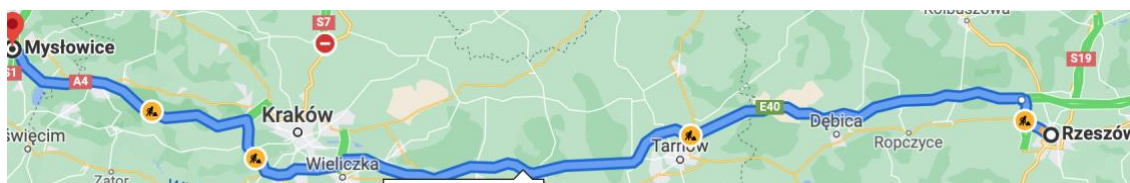
W załączniku 6 rozpatrzono rozwiązania z punktu widzenia kosztów średnich, rozpatrując jednocześnie sześć opcjonalnych dróg. W modelu symulacyjnym każdą drogę rozpatrzono oddzielnie, aby docelowo porównać wyniki zamieszczone w rozdziale 3.4.2.

z wynikami uzyskanymi w efekcie aplikacji modelu symulacyjnego. Porównanie to zostało zamieszczone w dalszej części opracowania w tabeli 14.

Poniżej przedstawiono efekty zastosowania modelu symulacyjnego w przypadku każdej z rozpatrywanych dróg. Każda z nich związana jest z przepływem określonej liczby pojazdów umownych, każdorazowo przemieszczających się wzdłuż poszczególnych łuków w grafie zamieszczonym w modelu symulacyjnym pomiędzy wierzchołkami (miejscowościami podanymi z nazwy w tabelach Z.7.1.-Z.7.5).

W pierwszej kolejności przez model symulacyjny „przepuszczono” rozłożenie wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk dla równych koszty średnich uzyskanych w przypadku drogi nr 1. Wyniki przedstawione są w tabeli Z.8.1.

Warto zwrócić uwagę na różnice pomiędzy wartościami średniego czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego (czas średni liczony jest po uwzględnieniu łącznego czasu przejazdu wszystkich pojazdów w przypadku realizacji podczas przemieszczania wyposażenia wojsk na danej drodze oddzielonego przez liczbę zrealizowanych przejazdów) w kontrze wobec czasu przejazdu pojazdu wg modelu analitycznego. W modelu symulacyjnym wprowadzono czas przejazdu pojazdu wg modelu analitycznego jako czas określający granicę pomiędzy przejazdem zrealizowanym punktualnie a tym z opóźnieniem. W tabeli Z.8.1. oznaczono pismem pogrubionym te wartości czasów, które w obrębie danego łuku nie zostały określone mianem zrealizowanych w założonym terminie, a zatem wywołujących opóźnienie w realizacji podczas przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych. W kolejnym akapicie podano też ewentualne przyczyny takich opóźnień, co jest cenną informacją, zważywszy na fakt odzwierciedlania przez model symulacyjny warunków rzeczywistych wzmiankowanych wcześniej w tym rozdziale oraz poprzednich rozdziałach pracy.



Rys. 24. Obecna sytuacja drogowa dotycząca łuku 1(1,2)

Źródło: www.googlemaps.pl, dostęp on-line 21 października 2021 r.

W przypadku łuku nr 1, pomiędzy Rzeszowem a Mysłowicami dochodzi do robót drogowych w kilku miejscach autostrady A4, jak wskazano na rys. 24. W przypadku łuku nr 3, pomiędzy Dąbrową Górniczą a miejscowością Gąski, opóźnienie powodowane krótką

długością łuku i koniecznością odczekania kolejnych kolumn podczas przemieszczania wyposażenia wojsk na możliwość zajęcia danego łuku. Podobnie w przypadku kolejnych łuków o krótkich długościach przyczyna jest podobna. Dotyczy to łuku nr 5 pomiędzy Ciechocinkiem a miejscowością Przyłubie, łuku nr 6 łączącego Przyłubie i Białe Błota oraz łuku nr 7 łączącego miejscowości Białe Błota i Ruda. Jeśli natomiast chodzi o łuk 10 łączący miejscowość Wałcz i Czaplinek można wziąć pod uwagę utrudnienia wskazane w załączniku 1, w tym przypadku utrudnienia na drodze krajowej nr 20, roboty drogowe na odcinku m. Czaplinek ul. Złocieniecka. Warto zauważyć, że niektóre z przekroczeń czasu spodziewanego na podstawie modelu analitycznego mogą mieć związek z przekroczeniem przepustowości. Jest tak np. w przypadku łuku (10, 11), co zasygnalizowano w załączniku 6.

Łączne koszty średnie dla drogi nr 1 i średni czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego dla drogi nr 1 wprowadzono do tabeli 14.

Dodatkowo wskaźniki i mierniki zaimplementowane w modelu symulacyjnym (a nie stosowane w modelu analitycznym) są następujące:

- praca przewozowa: 220000 [poj.km],
- wielkość przewiezionego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,33 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 98,05 [%] (warto przy okazji tego parametru zauważyć, że jest on związany ze stochastycznie „przydzielonym” poziomem zakłóceń funkcjonowania danego pojazdu),
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 65,07 [min].

Następnie rozpatrzono drogę nr 2. W przypadku łuku nr 15 łączącego miejscowości Kolbuszowa i Świerczów dochodzi do robót drogowych w kilku miejscach autostrady A4, jak wspomniano wcześniej (fragment tej trasy pokrywa się z łukiem 1 drogi nr 1). W przypadku łuku nr 16, 17 pomiędzy miejscowościami Świerczów i Przyłęk oraz Przyłęk i Tuszów Narodowy, opóźnienie powodowane krótką długością łuku i koniecznością odczekania kolejnych kolumn podczas przemieszczania wyposażenia wojsk na możliwość zajęcia danego łuku. W przypadku łuku 21 łączącego miejscowości Sroć i Ciechocinek opóźnienia wynikają z bieżących prac remontowych (<https://bit.ly/3JXjro9>, dostęp on-line 22 października 2021 r.). Łuki 5, 7, 10 zostały objaśnione w tej kwestii przy okazji drogi nr 1.

Łączne koszty średnie dla drogi nr 2 i średni czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego dla drogi nr 2 wprowadzono do tabeli 14.

Dodatkowo wskaźniki i mierniki zaimplementowane w modelu symulacyjnym (a nie stosowane w modelu analitycznym) są następujące:

- praca przewozowa: 138012 [poj.km],
- wielkość przewiezonego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,34 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 98,14 [%],
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 0,43 [min].

W dalszej części przeanalizowano drogę nr 3. W przypadku łuku nr 23 pomiędzy miejscowościami Trzebinia i Dąbrowa Górnicza występują roboty drogowe po obydwu strona miejscowości Mysłówice znajdującej się na wspomnianej trasie. Podobnie w przypadku łuku 26 łączącego miejscowości Srock i Stryków opóźnienia wynikają z bieżących prac remontowych (<https://bit.ly/3LmxmEp>, dostęp on-line 22 października 2021 r.). W przypadku łuku 27 roboty drogowe w sąsiedztwie miejscowości Stryków. W przypadku miejscowości Głuchowo i Złotkowo (łuk 28) następuje zwiększenie natężenia ruchu w Głuchowie.

Łączne koszty średnie dla drogi nr 3 i średni czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego dla drogi nr 3 wprowadzono do tabeli 14.

Dodatkowo wskaźniki i mierniki zaimplementowane w modelu symulacyjnym (a nie stosowane w modelu analitycznym) są następujące:

- praca przewozowa: 225302 [poj.km],
- wielkość przewiezonego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,33 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 98,06 [%],
- terminowość procesu: 73,28 [%].
- wskaźnik kongestii Δ : 88,33 [min].

Wobec analizy drogi nr 4, w przypadku łuku nr 32 pomiędzy miejscowościami Nowa Dęba i Opatów występuje niewielkie przekroczenie przewidywanego czasu wg modelu analitycznego, co spowodowane jest występującymi zatorami drogowymi przed wjazdem do Opatowa. W przypadku łuku 42 wydłużenie czasu przejazdu spowodowane jest robotami drogowymi przy wyjeździe z Poznania oraz zatorami drogowymi przy wjeździe do miejscowości Oborniki. Należało zatem spodziewać się również nieznacznych opóźnień na

łuku 43 pomiędzy Obornikami a Piłą. W przypadku łuku nr 46, pomiędzy miejscowościami Mirosławiec i Kalisz Pomorski, opóźnienie powodowane krótką długością łuku i koniecznością odczekania kolejnych kolumn podczas przemieszczania wyposażenia wojsk na możliwość zajęcia danego łuku. Ogólnie rzecz ujmując w przypadku tej drogi stopień występowania opóźnień nie jest znaczny.

Łączne koszty średnie dla drogi nr 4 i średni czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego dla drogi nr 4 wprowadzono do tabeli 14.

Dodatkowo wskaźniki i mierniki zaimplementowane w modelu symulacyjnym (a nie stosowane w modelu analitycznym) są następujące:

- praca przewozowa: 209303 [poj.km],
- wielkość przewiezionego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,34 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 98,05 [%],
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 147,49 [min].

Tabela 14. Porównanie czasów i kosztów realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk, uzyskanych na podstawie modeli analitycznego i symulacyjnego w przypadku wariantu *WI*

Nr drogi	Koszty średnie w przypadku przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych uzyskane na podstawie modelu analitycznego, $F_1(XL^*, p, c, WI, a)$ [zł]	Koszty realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych przy liczbie pojazdów wyznaczonych w modelu analitycznym, obliczane w modelu symulacyjnym $F_1(XL^*, p, c, WI, s)$ [zł]	Czas przejazdu w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych uzyskany na podstawie modelu analitycznego $F_1(XL^*, p, t, WI, s)$ [hh:mm:ss]	Średni czas przejazdu w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych uzyskany na podstawie modelu symulacyjnego $F_1(XL^*, p, t, WI, s)$ [hh:mm:ss]
1	774945,60	768001,2	11:08:00.0000	12:13:06.9569
2	777413,80	739826	10:24:00.0000	10:23:56.9455
3	775638,50	746374,8	11:23:00.0000	12:51:33.3973
4	775548,20	767951,8	13:37:00.0000	11:09:50.8087
5	N/A	N/A	N/A	N/A
6	775310,40	736296,2	15:58:00.0000	11:18:51.9081

Droga nr 6 jest realizowana z wykorzystaniem transportu szynowego. W modelu symulacyjnym przyjęto prędkość handlową dla ruchy pasażerskiego zgodnie ze wskazaniami

przedstawionymi we wcześniejszych rozdziałach wynoszącą 111,5 km/h. Cena jednostkowa przewozu z kolei w przypadku tej drogi to 0,45 zł/km.

W przypadku drogi nr 6 opóźnienie w ruchu wystąpiło jedynie w przypadku łuku 65 pomiędzy miejscowościami Stargard Szczeciński i Runowo Pomorskie. Opóźnienia mogą wynikać z gorszej jakości stanu toru między tymi miejscowościami.

Łączne koszty średnie dla drogi nr 6 i średni czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego dla drogi nr 6 wprowadzono do tabeli 14.

Dodatkowo wskaźniki i mierniki zaimplementowane w modelu symulacyjnym (a nie stosowane w modelu analitycznym) są następujące:

- praca przewozowa: 301835 [poj.km],
- wielkość przewiezionego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 0,46 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 98,02 [%],
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 279,48 [min].

Cel przedstawienia wyników w tabeli 14 jest porównanie zawartości tabeli 2. Koszty średnie w funkcji drogi będących efektem obliczeń w modelu analitycznym z wynikami uzyskanymi w efekcie wykorzystania modelu symulacyjnego oraz kwestia punktualności realizacji przejazdów w procesie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych na podstawie tych dwóch modelu zostały przedstawione w tabeli 14.

4.3. Implementacja wariantu 2 modelu decyzyjnego w oprogramowaniu

W rozdziale 3.4. wspomniano, że wariant drugi rozwiązania (W2) zakłada półtorakrotny wzrost przewozów w analizowanym zagadnieniu przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych. Wyniki dokonania rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk dla równych koszty średnich uzyskanych w przypadku drogi nr 1 w przypadku tego wariantu przedstawione są w tabeli 15.

Różnice pomiędzy wartościami średniego czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego w kontrze wobec czasu przejazdu pojazdu wg modelu analitycznego są w przypadku większości łuków przekroczone (tabela 15). Zasadniczy wpływ na ów fakt miały oczywiście zwiększone wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk. Interesujący wynik otrzymano jednak dla łuków nr 4 (4,5), nr 8 (8,9), w przypadku których to przekroczenie nie

występuje – jest to związane z długimi odległościami pokonywanymi przez pojazdy biorące udział w przegrupowaniu wojsk i równomiernymi odstępami pomiędzy tymi pojazdami („lokalny” brak kongestii ruchu).

Łączne koszty średnie dla drogi nr 1 w przypadku wariantu W2 i średni czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego dla drogi nr 1 wprowadzono do tabeli 15. Dodatkowo wskaźniki i mierniki zaimplementowane w modelu symulacyjnym (a nie stosowane w modelu analitycznym) są następujące:

- praca przewozowa: 440000 [poj.km],
- wielkość przewiezionego ładunku: 12846 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,33 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 98,01 [%] (warto przy okazji tego parametru zauważyć, że jest on związany ze stochastycznie „przydzielonym” poziomem zakłóceń funkcjonowania danego pojazdu),
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 123,36 [min].

W dalszej części przedstawiono analizy dotyczące drogi nr 2 (tabela Z.8.7.). Podobnie jak w przypadku wariantu W1, także w przypadku łuku nr 15 łączącego miejscowości Kolbuszowa i Świerczów dochodzi do robót drogowych w kilku miejscach autostrady A4, jak wspomniano wcześniej (fragment tej trasy pokrywa się z łukiem 1 drogi nr 1). W przypadku łuku nr 16, 17 pomiędzy miejscowościami Świerczów i Przyłęk oraz Przyłęk i Tuszów Narodowy, opóźnienie powodowane krótką długością łuku i koniecznością odczekania kolejnych kolumn przemieszczania wyposażenia wojsk na możliwość zajęcia danego łuku. W przypadku wariantu W2 sytuacja związana z przekroczeniem czasu dotyczy także łuku nr 18 łączącego miejscowości Tuszów Narodowy i Ocieseki – jest on konsekwencją przemieszczania wyposażenia realizowanego wzdłuż poprzednich łuków wraz ze zwiększeniem o 50% wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w przypadku wariantu W2. W przypadku łuku 21 łączącego miejscowości Sroć i Ciechocinek opóźnienia wynikają z bieżących prac remontowych (<https://bit.ly/3JJaU7U>, dostęp on-line 22 października 2021 r.). Łuki 5, 7, 10 zostały objaśnione w tej kwestii przy okazji drogi nr 1 dla wariantu W1, a dodawszy do tego kwestię zwiększeniem o 50% wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w przypadku wariantu W2 można objaśnić tymi kwestiami przyczynę różnic w tabeli Z.8.7. Do nieznacznych opóźnień w stosunku do modelu analitycznego dochodzi w przypadku łuków nr 9 i 11, co jest

spowodowane zwiększeniem o 50% wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w przypadku wariantu W2.

Łączne koszty średnie dla drogi nr 2 i średni czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego dla drogi nr 2 wprowadzono do tabeli Z.8.7. Dodatkowo wskaźniki i mierniki zaimplementowane w modelu symulacyjnym (a nie stosowane w modelu analitycznym) są następujące:

- praca przewozowa: 27624 [poj.km],
- wielkość przewiezionego ładunku: 12846 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,34 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 98,01 [%] (warto przy okazji tego parametru zauważyć, że jest on związany ze stochastycznie „przydzielonym” poziomem zakłóceń funkcjonowania danego pojazdu),
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 59,53 [min].

W przypadku drogi nr 3 (tabela Z.8.8.), analogicznie do wariantu W1, również w wariantcie W2 w przypadku łuku nr 23 doszło do przekroczenia czasu trwania procesu przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w obrębie tego łuku, przewidywanego wg modelu analitycznego. Pomiędzy miejscowościami Trzebinia i Dąbrowa Górnicza występują roboty drogowe po obydwu stronach miejscowości Mysłowice znajdującej się na wspomnianej trasie. Podobnie w przypadku łuków 25 i 26 łączących miejscowości Podwarpie, Sroć i Stryków opóźnienia wynikają z bieżących prac remontowych (<https://bit.ly/3tDqPPI>, dostęp on-line 22 października 2021 r.). wpływ na owe opóźnienia ma także zwiększenie wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk przewidziane w wariantcie W2. Na łuku 27 powodowane jest to robotami drogowymi w sąsiedztwie miejscowości Stryków. W przypadku łuku 28 następuje zwiększenie natężenia ruchu dotyczące miejscowości Głuchowo. Dla łuku 29 czas może być traktowany jako tożsamy, jako że pomiędzy modelami symulacyjnym i analitycznym występuje jedynie niepełna minuta różnicy. Warto zauważyć, że niektóre z przekroczeń czasu spodziewanego na podstawie modelu analitycznego mogą mieć związek z przekroczeniem przepustowości. Jest tak np. w przypadku łuku nr 10, a w konsekwencji także łuku nr 11.

Łączne koszty średnie dla drogi nr 3 i średni czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego dla drogi nr 3 wprowadzono do tabeli 15. Dodatkowo wskaźniki i mierniki zaimplementowane w modelu symulacyjnym (a nie stosowane w modelu analitycznym) są następujące:

- praca przewozowa: 450604 [poj.km],
- wielkość przewiezonego ładunku: 12846 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,33 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 98,05 [%],
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 163,49 [min].

Kolejno poddano analizie drogę nr 4 (tabela Z.8.9.). W przypadku łuku nr 32 pomiędzy miejscowościami Nowa Dęba i Opatów występuje przekroczenie przewidywanego czasu wg modelu analitycznego, co spowodowane jest występującymi zatorami drogowymi przed wjazdem do Opatowa. Ma to konsekwencje w postaci około 6-minutowego opóźnienia w łuku kolejnym nr 33 łączącym miejscowości Opatów i Kielce.

Nieznaczne przekroczenia występują w przypadku łuku nr 35 Piotrków Trybunalski i Łask oraz łuku nr 36 łączącego Łask i Zduńską Wolę. W przypadku łuku 43 wydłużenie czasu przejazdu spowodowane jest robotami drogowymi przy wyjeździe miejscowości Oborniki. Należało zatem spodziewać się również nieznacznych opóźnień na łuku 43 pomiędzy Obornikami a Piłą. W przypadku łuków nr 46-47, pomiędzy miejscowościami Mirosławiec-Kalisz Pomorski-Drawsko Pomorskie, opóźnienie powodowane krótkimi długościami łuków i koniecznością odczekania kolejnych kolumn przemieszczania wyposażenia wojsk na możliwość zajęcia danego łuku. Łączne koszty średnie dla drogi nr 4 i średni czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego dla drogi nr 4 wprowadzono do tabeli 15. Dodatkowo wskaźniki i mierniki zaimplementowane w modelu symulacyjnym (a nie stosowane w modelu analitycznym) są następujące:

- praca przewozowa: 418606 [poj.km],
- wielkość przewiezonego ładunku: 12846 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,34 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 98,05 [%],
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 102,75 [min].

W przypadku drogi nr 6 (tabela Z.8.10.) opóźnienie w ruchu wystąpiło w przypadku łuków 54 pomiędzy miejscowościami Rzeszów i Przeworsk, nr 59 pomiędzy miejscowościami Skarżysko Kamienna i Radom, nr 65 pomiędzy miejscowościami Stargard Szczeciński i Runowo Pomorskie. Opóźnienia mogą wynikać z gorszej jakości stanu toru.

Łączne koszty średnie dla drogi nr 6 i średni czas przejazdu pojazdu wg modelu symulacyjnego dla drogi nr 6 wprowadzono do tabeli 15. Dodatkowo wskaźniki i mierniki zaimplementowane w modelu są następujące:

- praca przewozowa: 598645 [poj.km],
- wielkość przewiezonego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 0,46 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 98,02 [%],
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 230,99 [min].

Cel przedstawienia wyników w tabeli 15 jest porównanie zawartości tabeli 10. Koszty średnie w funkcji drogi będących efektem obliczeń w modelu analitycznym z wynikami uzyskanymi w efekcie wykorzystania modelu symulacyjnego oraz kwestia punktualności realizacji przejazdów w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych na podstawie tych dwóch modeli zostały przedstawione w tabeli 15.

Tabela 15. Porównanie czasów i kosztów realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk, uzyskanych na podstawie modeli analitycznego i symulacyjnego w przypadku wariantu W2

Nr drogi	Koszty średnie w przypadku przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych uzyskane na podstawie modelu analitycznego, $F_1(XL^*, p, c, W2, a)$ [zł]	Koszty realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych przy liczbie pojazdów wyznaczonych w modelu analitycznym, obliczane w modelu symulacyjnym $F_1(XL^*, p, c, W2, s)$ [zł]	Czas przejazdu w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych uzyskany na podstawie modelu analitycznego $F_1(XL^*, p, t, W2, s)$ [hh:mm:ss]	Średni czas przejazdu w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych uzyskany na podstawie modelu symulacyjnego $F_1(XL^*, p, t, W2, s)$ [hh:mm:ss]
1	1164405	1309769	11:08:00.0000	13:11:35.6473
2	1163436	1150097	10:24:00.0000	11:23:52.8034
3	1163458	1341146	11:23:00.0000	14:06:49.1962
4	1163562	1255370	13:37:00.0000	11:54:25.0015
5	N/A	N/A	N/A	N/A
6	1163290	1127640	15:58:00.0000	12:07:01.4548

4.4. Implementacja wariantu 3 modelu decyzyjnego w oprogramowaniu

W przypadku wariantu W3 dokonano analizy takich samych wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk (ładunków, osób) jak dla wariantu W1 (tj. bez zmian liczby pojazdów umownych). Zróżnicowanie tych dwóch wariantów polegało na zwiększeniu podatności na awarie pojazdów umownych do 25%. W bieżącym rozdziale pominięto dokładniejsze opisy przyczyn potencjalnych opóźnień dotyczących poszczególnych łuków, niemniej jednak przytoczono dokładne charakterystyki łuków w tabelach Z.8.11.-Z.8.15., a także w poniższych akapitach. Ponadto zestawienie głównych wyników zamieszczono w tabeli 16.

Wobec analizy drogi nr 1, wskaźniki i mierniki (poza przytoczonymi w tabeli Z.8.11.) zaimplementowane w modelu symulacyjnym są następujące:

- praca przewozowa: 598645 [poj.km],
- wielkość przewiezonego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,33 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 95,13 [%],
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 1101,02 [min].

W przypadku drogi nr 2 wskaźniki i mierniki, których nie zamieszczono w tabeli Z.8.12., są następujące:

- praca przewozowa: 138012 [poj.km],
- wielkość przewiezonego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,34 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 75,20 [%],
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 1082,20 [min].

Analiza drogi nr 3 pozwoliła na uzyskanie następujących wskaźników i mierników, których nie przytoczono w tabeli Z.8.13.:

- praca przewozowa: 225302 [poj.km],
- wielkość przewiezonego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,33 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 75,12 [%],

- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 1118,39 [min].

Wobec analizy drogi nr 4, wskaźniki i mierniki (poza przytoczonymi w tabeli Z.8.14.) zaimplementowane w modelu symulacyjnym (a nie stosowane w modelu analitycznym) są następujące:

- praca przewozowa: 209303 [poj.km],
- wielkość przewiezonego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 1,34 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 75,15 [%],
- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 1342,45 [min].

Tabela 16. Porównanie czasów i kosztów realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk, uzyskanych na podstawie modeli analitycznego i symulacyjnego w przypadku wariantu W3

Nr drogi	Koszty średnie w przypadku przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych uzyskane na podstawie modelu analitycznego, $F_1(XL^*, p, c, W3, a)$ [zł]	Koszty realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych przy liczbie pojazdów wyznaczonych w modelu analitycznym, obliczane w modelu symulacyjnym $F_1(XL^*, p, c, W3, s)$ [zł]	Czas przejazdu w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych uzyskany na podstawie modelu analitycznego $F_1(XL^*, p, t, W3, s)$ [hh:mm:ss]	Średni czas przejazdu w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych uzyskany na podstawie modelu symulacyjnego $F_1(XL^*, p, t, W3, s)$ [hh:mm:ss]
1	774945,60	476690	11:08:00.0000	1:05:29:02.1007
2	777413,80	769170	10:24:00.0000	1:04:26:19.5216
3	775638,50	868656	11:23:00.0000	1:06:39:01.4350
4	775548,20	810060	13:37:00.0000	1:11:59:45.3116
5	N/A	N/A	N/A	N/A
6	775310,40	720789	15:58:00.0000	1:07:06:21.5423

W przypadku drogi nr 6 wskaźniki i mierniki, których nie zamieszczono w tabeli Z.8.15., są następujące:

- praca przewozowa: 301835 [poj.km],
- wielkość przewiezonego ładunku: 8564 [t],
- koszt transportu na pojazdokilometr: 0,46 [zł/poj.km],
- wykorzystanie czasu pracy pojazdów: 75,08 [%],

- terminowość procesu: 73,28 [%],
- wskaźnik kongestii Δ : 908,22 [min].

Cel przedstawienia wyników w tabeli 16 jest porównanie zawartości tabeli 12. Koszty średnie w funkcji drogi będących efektem obliczeń w modelu analitycznym z wynikami uzyskanymi w efekcie wykorzystania modelu symulacyjnego oraz kwestia punktualności realizacji przejazdów w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych na podstawie tych dwóch modeli zostały przedstawione w tabeli 16.

4.5. Wielokryterialna ocena wariantów modelu decyzyjnego

W tabeli 17 zamieszczono wszystkie uzyskane i przytoczone w poprzednich sekcjach pracy cząstkowe funkcje kryterium, oddzielnie dla modelu analitycznego oraz oddzielnie dla modelu symulacyjnego. W efekcie transformacji oryginalnych wartości cząstkowych funkcji kryteriów w wartości unormowane uzyskano najbardziej i najmniej pożądane drogi realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych, dla trzech wariantów obliczeniowych *W1-W3*. W przypadku najbardziej pożądanych dróg sumy wartości unormowanych zostały w tabeli 17 zapisane kolorem białym na zaciemnionym tle, natomiast w przypadku najmniej pożądanych dróg sumy wartości unormowanych zostały zapisane pismem pogrubionym. W przypadku wariantu *W1* uzyskano następujące wyniki. W modelu analitycznym najbardziej korzystną drogą jest droga nr 1, a najmniej korzystną droga nr 6, natomiast w efekcie zastosowania modelu symulacyjnego najbardziej korzystną drogą jest droga nr 4, a najmniej korzystna droga nr 6. Różnica pomiędzy modelem analitycznym i symulacyjnym wynika z faktu, że odzwierciedla on więcej założeń i rzeczywistych zależności na trasach w analizowanej relacji w stosunku do modelu analitycznego, co było przedmiotem opisu wcześniejszych rozdziałów.

W przypadku wariantu *W2* dotyczącego rozłożenia, półtorakrotnie zwiększonego w stosunku do wariantu *W1*, wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk uzyskano następujące wyniki. W modelu analitycznym najbardziej korzystną drogą jest droga nr 2, a najmniej korzystną droga nr 1, natomiast w efekcie zastosowania modelu symulacyjnego najbardziej korzystną drogą jest droga nr 2, a najmniej korzystna droga nr 3. Wystąpiła zgodność w kwestii najlepszego wariantu.

Tabela 17. Ocena cząstkowych funkcji kryterium wraz ze wskazaniem dróg o najlepszych i najgorszych walorach wdrożeniowych

Nr drogi	Model analityczny					Model symulacyjny				
	$F_l(XL^*, p, c, Wl, a)$ [zł]	$F_l(XL^*, p, t, Wl, a)$ [zł]	$u^{c, Wl, a}(p)$	$u^{t, Wl, a}(p)$	$u^{Wl, a}(p)$	$F_l(XL^*, p, c, Wl, s)$ [s]	$F_l(XL^*, p, t, Wl, s)$ [s]	$u^{c, Wl, s}(p)$	$u^{t, Wl, s}(p)$	$u^{Wl, s}(p)$
Wariant 1										
1	774945,6	40080	1	0,87	1,87	774945,6	43986,9569	1	0,26	1,26
2	777413,8	37440	0	1	1	777413,8	37436,9455	0	1	1,00
3	775638,5	40980	0,72	0,82	1,54	775548,2	46293,3973	0,76	0	0,76
4	775548,2	49020	0,76	0,42	1,178	775310,4	40190,8087	0,85	0,70	1,54
5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
6	775310,4	57480	0,85	0	0,85	777413,8	40731,9081	0	0,63	0,63
Wariant 2										
1	1164405,44	40080	0	0,87	0,87	1309769	47495,6473	0,15	0,34	0,49
2	1163436,296	37440	0,87	1	1,87	1150096,7	41032,8034	0,89	1	1,89
3	1163457,768	40980	0,85	0,82	1,67	1341146	50809,1962	0	0	0
4	1163562,048	49020	0,76	0,42	1,18	1255370	42865,0015	0,40	0,81	1,21
5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
6	1163289,6	57480	1	0	1	1127639,7	43621,4548	1	0,74	1,74
Wariant 3										
1	774945,6	40080	1	0,87	1,87	476690	106142,1007	1	0,86	1,86
2	777413,8	37440	0	1	1	769170	102379,5216	0,25	1	1,25
3	775638,5	40980	0,72	0,82	1,54	868656	110341,435	0	0,71	0,71
4	775548,2	49020	0,76	0,42	1,18	810060	129585,3116	0,15	0	0,15
5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
6	775310,4	57480	0,85	0	0,85	720789	111981,5423	0,38	0,65	1,02

Źródło: opracowanie własne na podstawie tabel 14-16

Przy okazji wariantu W2 warto zwrócić uwagę na fakt, że przy znacznych zmianach obciążeń ruchu dochodzić może do znacznych zmian w zakresie uzyskanych wartości cząstkowych funkcji kryteriów, co oznacza z kolei, że raz poczyniona optymalizacja rozwiązań

nie pozostaje słuszną dla odmiennych warunków, danych, ograniczeń i zmiennych decyzyjnych. Stosowanie modelu analitycznego za każdym razem byłoby czasochłonne, kosztochłonne i operacjochłonne, najkrócej rzecz ujmując – uciążliwe. W związku z tym poleca się stosowanie aplikacji numerycznych, w tym modeli symulacyjnych.

W przypadku wariantu *W3*, w którym założono zastosowanie nieprzewidywalnych, nieoczekiwanych zdarzeń w trakcie realizacji przegrupowania (bez przyrostu przewozów), warto zwrócić przede wszystkim uwagę na model symulacyjny, jako że efekty modelu analitycznego są zbliżone do uzyskanych w wariantcie *W1* (jest tak, dlatego że w rozwiązaniach analitycznych nie występuje zastosowanie nieprzewidywalnych zdarzeń, w tym nie dochodzi do zmian podatności na awarie środków transportu i infrastruktury, co z kolei jest możliwe w przypadku zastosowania modelu symulacyjnego). W modelu analitycznym najbardziej korzystną drogą jest droga nr 1, a najmniej korzystną droga nr 6, natomiast w efekcie zastosowania modelu symulacyjnego najbardziej korzystną drogą jest droga nr 1, a najmniej korzystną droga nr 4. Warto przy tym zauważyć, że w przypadku wariantu *W3* potwierdziło się uznanie drogi nr 1 za najbardziej korzystną z punktu widzenia obydwu modeli.

Podsumowanie

Zasadniczym celem rozprawy było opracowanie modelu przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w określonych relacjach przegrupowania tych sił, a przy tym rozważenie przyjętej w pracy tezy, w zakresie której poczyniono założenie możliwości opracowania modelu przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w określonych relacjach przegrupowania tych sił, ze względu na predefiniowane funkcje celu, jako narzędzia wspomagania decyzji w zakresie zabezpieczenia logistycznego wojsk lądowych.

Oprogramowanie modelu przemieszczania wyposażenia wojsk lądowy pozwoli na uzyskanie efektów finansowych dla każdego rejonu przegrupowania. W rozprawie doktorskiej przedstawione są metody i algorytmy wykorzystane do rozwiązania zadań optymalizacyjnych oraz implementacja komputerowa proponowanej metody. Zawiera ona m.in.: warianty rozłożenia, odwzorowanie struktury badanego połączenia w postaci grafu Berge'a, relacje przemieszczania, charakterystyki określone na elementach struktury oraz przygotowanie danych do programu.

W pierwszym etapie prac podjęto zatem działania zmierzające do sformułowania zadań optymalizacyjnych rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w zadanych relacjach przegrupowania z punktu widzenia trzech różnych cząstkowych funkcji kryterium. Następnie, bazując na danych, zmiennych decyzyjnych, ograniczeniach i cząstkowych funkcjach kryterium, zaprojektowano oprogramowanie stanowiącego wsparcie dla prowadzenia analiz wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk pomiędzy wybranymi miejscowościami, między którymi dochodzi do przegrupowania wojsk (tj. w relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie), umożliwiające analizowanie wielowariantowych sytuacji decyzyjnych. Wielowariantowość sytuacji decyzyjnych była związana z jednej strony z różnymi drogami przebiegu przegrupowania wojsk lądowych (obecnie realizowanych oraz hipotetycznych), z drugiej zaś z wprowadzaniem różnych parametrów środków transportu (np. różne prędkości przemieszczania się, zróżnicowane wartości podatności na awarie) i infrastruktury (np. czasowe wyłączenie wybranych odcinków dróg z ruchu w efekcie robót drogowych, wypadków itp.) w oprogramowaniu komputerowym.

W pracy przeprowadzono działania o charakterze poznawczym (aspekty teoretyczne), które znalazły także odzwierciedlenie w działaniach o charakterze użytkowym (aspekty praktyczne). Wybrane z nich przytoczono w kolejnych akapitach, z rozdzieleniem na aspekty o znaczeniu poznawczym i użytecznym.

Znaczenie poznawcze (aspekty teoretyczne) dotyczyło następujących realizacji:

1. Pogłębiony przegląd literatury, który pozwolił na wskazanie luki badawczej w zakresie rozważań dotyczących wsparcia analiz przemieszczania wyposażenia wojsk z wykorzystaniem oprogramowania (w tym oprogramowania implementowanego z wykorzystaniem metod symulacyjnych). W celu zebrania odpowiednio dużego materiału badawczego przestudiowana została literatura zagraniczna i pozycje krajowe. W ramach rozprawy doktorskiej wobec przeanalizowania literatury podjęta została zatem tzw. metoda jakościowa, której celem była próba zgromadzenia możliwie pełnego zasobu informacji dostępnych w literaturze krajowej i zagranicznej, naukowej oraz popularnej.
2. Opracowanie modelu analitycznego przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w określonych relacjach przegrupowania tych sił (modelu decyzyjnego), pozwalającego na rozważanie realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w kontekście trzech różnych funkcji kryterium: kosztów średnich, kosztów zewnętrznych, czasu realizacji przegrupowania.
3. Przytoczenie podstawowej terminologii w zakresie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych przy okazji przeglądu literatury.
4. Opracowanie bogatego materiału źródłowego pozwalającego na budowę modeli analitycznych i symulacyjnych, bazujących na rzeczywistych danych i warunkach drogowych w zakresie dwóch gałęzi transportu: drogowego i szynowego (w tym w szczególności opracowano charakterystyki techniczne dróg). Takie opracowanie danych sprawiło, że tematyka rozprawy doktorskiej oparta jest na analizie przebiegu rzeczywistego procesu przemieszczania. W rozprawie doktorskiej rozpoznane i przedstawione zostały szczegółowe charakterystyki oraz analizy wybranych, dostępnych tras i ich przepustowości, zarówno w przypadku dróg kołowych jak i kolejowych.
5. W rozprawie rozważana jest problematyka rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk wg kryteriów: kosztów średnich, kosztów zewnętrznych, czy też czasu przejazdu traktowanego w sensie kosztowym. W tym celu wykorzystywane są znane z badań operacyjnych techniki i metod optymalizacji. Dokonano tego w zastosowaniu dla zagadnienia przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych, nieopracowanego do tej pory w literaturze w wyczerpujący sposób. W pracy dokonano sformułowania i rozwiązania zadania optymalizacyjnego, dotyczącego rozłożenia

wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w wymiarze pojazdów umownych w zakresie przegrupowania wojsk lądowych (przy zastosowaniu metod analitycznych), wg trzech kryteriów, w tym: kryterium kosztów średnich, kryterium kosztów zewnętrznych, kryterium czasu przejazdu.

Warto wspomnieć, że model analityczny obejmuje bardzo rozbudowane zagadnienie szacowania kosztów zewnętrznych, rzadko podejmowane także w transporcie cywilnym ze względu na niezwykle wysoką złożoność tego zagadnienia.

Znaczenie utylitarne (aspekty praktyczne) dotyczyło następujących realizacji:

1. Rozpatrywana w pracy doktorskiej tematyka dotyczy analizy przebiegu rzeczywistego procesu przemieszczania wyposażenia 21BSP w relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie.
2. W pracy dokonano transformacji modelu analitycznego w koncepcyjny pozwalający na opracowanie modelu symulacyjnego. W konsekwencji opracowano symulacyjny model przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w określonych relacjach przegrupowania tych sił (w efekcie implementacji modelu symulacyjnego) oraz przeprowadzono analizy danych pozyskanych z oprogramowania stanowiącego implementację modelu. Jak wspomniano przy okazji aspektów teoretycznych, opracowanie metody poprzedzone zostało skrupulatną analizą literatury oraz możliwie najdokładniejszą kompilacją informacji dotyczących poszczególnych elementów i obiektów, których poznanie było niezbędne do prawidłowego zaprojektowania modelu symulacyjnego.
3. Opracowanie autorskiego użytkowego modelu symulacyjnego do pewnego stopnia automatycznego (tworzenie sieci wierzchołków i łuków, tworzenie macierzy niezbędnych przy rozwiązywaniu zagadnień optymalizacyjnych, w tym optymalizacji wielokryterialnej) w komercyjnym oprogramowaniu Siemens/Technomatix Plant Simulation (wersja 13) służącym do budowy, kompilacji i eksperymentowania na modelach symulacyjnych. Na początku rozdziału 3.1. stwierdzono, że rozłożenie wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w sieci transportowej przy określonym zapotrzebowaniu na przemieszczanie, a w przypadku rozprawy doktorskiej wobec realizacji przemieszczanego wyposażenia wojsk lądowych, skierowanym do tego systemu z otoczenia jest statycznym modelem organizacji przemieszczania ładunków w systemie transportowym (tzn. modelem, w którym odwzorowany jest stan ustalony obciążenia węzłów i łuków sieci transportowej składowymi wielkościami przemieszczanego wyposażenia wojsk, wynikającymi z zapotrzebowania na przemieszczenie; modele takie nie zawierają odwzorowania upływu czasu – co oznacza, że nie są modelami

dynamicznymi, a zatem model symulacyjny jest kluczowy w rzeczywistych opracowaniach planów przemieszczanego wyposażenia wojsk lądowych.

4. Sporządzanie kodów programistycznych w oprogramowaniu Siemens/Technomatix Plant Simulation (w języku programowania SimTalk) w celu implementacji modelu analitycznego do postaci modelu symulacyjnego.
5. W rozprawie doktorskiej przeprowadzono także weryfikację oprogramowania w stosunku do opracowanego modelu analitycznego. Stanowi ją wariant modelu symulacyjnego, w przypadku którego wprowadzono parametry pochodzące bezpośrednio z modelu analitycznego, czyli *WI*.

W przypadku modelu symulacyjnego do wszystkich jego wariantów wprowadzono wyniki modelu analitycznego dla zadania optymalizacyjnego rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk wyrażonych poprzez pojazdy umowne z kryterium kosztów średnich. Wybór ten uzasadniony jest względu na to, że przedmiotem zainteresowania były rozważania dotyczące zagadnienia z punktu widzenia ponoszonych kosztów przez organizatorów przemieszczanego wyposażenia wojsk lądowych.

W rozdziale 1.2. przytoczono opracowanie Dowództwa Wojsk Lądowych (2008) w brzmieniu „[p]rzewóz wojsk operacyjnych w pełnym składzie organizacyjnym jest racjonalny na odległość powyżej 100 km. Na mniejsze odległości, przewóz wojsk wykonuje się z zasady sposobem kombinowanym. Stan osobowy oraz pojazdy kołowe przemieszcza się transportem drogowym, a sprzęt ciężki (gaśnicowy) przewożony jest transportem kolejowym.” Biorąc pod uwagę analizy przytoczone w rozprawie oraz fakt wyprodukowania nowych wagonów na rzecz sił zbrojnych (Madrjas 2020) nie jest to już obligatoryjne rozwiązanie (poza tym rozpatrywane przegrupowanie odbywa się na odległość większą niż wskazane 100 km). Jak wynika z praktyki autora sposób kombinowany wciąż jest realizowany, niemniej z analiz w rozprawie doktorskiej wynika, że wariant dotyczący realizacji przemieszczania wyposażenia z wykorzystaniem gałęzi transportu szynowego jest rzadziej rozpoznany jako korzystny (tabela 17). Z drugiej strony może być przedmiotem szczególnego zainteresowania przy zwiększonym przemieszczaniu wyposażenia wojsk co wykazano w rozdziale 4.5. W przypadku rzeczywistych warunków implementacyjnych, biorąc pod uwagę rozwiązania uzyskane z wykorzystaniem rozprawy doktorskiej, można rozważyć pewną specyfikę. W przypadku zastosowania transportu szynowego uzyskano 1189 pojazdów umownych co oznaczało przejazd 8 wagonów pasażerskich i 327 towarowych (załącznik 6). Po pierwsze warto

zauważyć zbieżność uzyskanych wyników z wolumenem wyprodukowanych wagonów na rzecz sił zbrojnych (Madrjas 2020). Po drugie zaś warto rozważyć następującą postać realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych środkami transportu szynowego: w ciągu dnia można wydelegować pociąg przewożący żołnierzy, a w nocy przy mniejszym wykorzystaniu infrastruktury kolejowej można skierować na tory pozostałe, nieosobowe składowe przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych.

W efekcie eksploatacji modelu symulacyjnego opracowanego na potrzeby rozprawy doktorskiej zauważono pewne spiętrzenia w okolicach większych miejscowości. Zbieżne jest to z uwagą zamieszczoną w pracy Basiewicz et al. (1998, p. 91), że największe wielkości przemieszczeń na autostradach występują zazwyczaj na ich kilkudziesięciokilometrowych odcinkach w sąsiedztwie wielkich aglomeracji. Poświadcza to jednocześnie, że model symulacyjny odzwierciedla warunki rzeczywiste rozważanej sieci transportowej.

Warto poczynić pewne uwagi dotyczące modelu symulacyjnego opracowanego z wykorzystaniem pakietu komercyjnego.

Pomimo wielu zalet stosowania modelu symulacyjnego, warto wspomnieć także o pewnych wyzwaniach z tym związanych. Model symulacyjny przygotowany został w oprogramowaniu na licencji edukacyjnej. Po pierwsze oznacza to, że opracowany model nie może być licencjonowany w celach zarobkowych, a ponadto kwestia ta dotyczy specyficznego ograniczenia modelu: liczba elementów w modelu symulacyjnym nie może przekroczyć 1000 elementów w licencji edukacyjnej. Istotnym ograniczeniem modelu symulacyjnego jest fakt, że do jego eksploracji wymagane jest posiadanie narzędzia kompilującego, jakim jest oprogramowanie, w którym model symulacyjny został zbudowany (model symulacyjny nie jest wywołany plikiem z rozszerzeniem *.exe). Ponadto, w modelu symulacyjnym konieczna jest ciągła kontrola warunków związanych z danymi i zmiennymi decyzyjnymi – w przyszłości warto rozwinąć narzędzie i zaproponować interpretatory danych on-line dotyczących ruchu, i odpowiedniego interfejsu, wtyczek systemowych (jest to istotna domena modeli cyfrowych, symulacyjnych i numerycznych, która nie jest stosowalna w modelach analitycznych).

Poprzez porównanie przepustowości poszczególnych łuków z występującym na tych łukach obciążeniem dokonano oceny dostosowania istniejącej infrastruktury transportowej do realizowanych przez nią zadań przewozowych.

W wyniku analizy przepustowości poszczególnych łuków ze skierowaniem na te łuki rzeczywistymi wielkościami przemieszczanego wyposażenia wojsk, wyrażonych poprzez pojazdy umowne, obciążającymi te łuki zanotowano przekroczenia przepustowości na

niektórych lukach (szczegóły podano w rozdziale 4.), co w szczególności dotyczyło transportu kolejowego. A zatem pośród wstępnie nie planowanych rozważań po szczegółowej analizie wyników rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk, wyrażonych poprzez pojazdy umowne, w relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie zauważono konieczność podjęcia następujących inwestycji: modernizację linii kolejowych, modernizację niektórych odcinków dróg samochodowych. Nie było to przedmiotem rozważań w pracy niemniej jednak może świadczyć o dodatkowych możliwościach wykorzystania opracowanego modelu.

Potencjalne kierunki dalszych prac badawczych są następujące:

1. Jak wspomniano wcześniej, w przypadku modelu symulacyjnego do wszystkich jego wariantów wprowadzono wyniki modelu analitycznego dla zadania optymalizacyjnego rozłożenia wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk wyrażonych poprzez pojazdy umowne z kryterium kosztów średnich. Warto w przyszłych badaniach rozpatrzyć model i jego wyniki szczególnie z punktu widzenia kosztów zewnętrznych. Koszty zewnętrzne nie zostały zaaplikowane w symulacyjnym modelu, z uwagi na niepewność zagregowanych danych i konieczność dokonania ich aktualizacji w świetle najnowszych przepisów – będą one przedmiotem dalszych prac badawczych. Szczególnie interesującym aspektem badań w tym kontekście będzie dokonanie analizy emisji zanieczyszczeń powietrza powstałego w efekcie przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych z uwzględnieniem efektów prac nad modelem EMITRANSYS zamieszczonych m.in. w pracach Jacyna i Merkiś (2014a; 2014b), Jacyna-Golda et al. (2014a) oraz przytoczonych tu w postaci tabeli 3. Integracja efektów zastosowania modelu EMITRANSYS znacznie wzbogaci możliwości modelu decyzyjnego przedstawionego w rozprawie.
2. Walidacja modelu symulacyjnego w stosunku do rzeczywistych warunków przemieszczania wyposażenia wojsk w relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie nie została przedstawiona w pracy z uwagi na fakt, że rzeczywiste działania tego typu mogą być przedmiotem tajemnicy sił zbrojnych.
3. Rozbudowa modelu symulacyjnego, by różne gałęzie transportu były rozpatrywane jednocześnie w zakresie danego eksperymentu symulacyjnego. W obecnej postaci w ramach jednego eksperymentu symulacyjnego rozważana jest jedna droga, a zatem jedna gałąź transportu.

4. W przyszłych pracach badawczych warto uwzględnić różnice w konstrukcji i budowie dróg oraz zróżnicowanie kosztów jednostkowych w ujęciu regionalnym, geograficznym.

Model przemieszczania wyposażenia wojsk w ustalonych relacjach przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych umożliwia projektowanie procesów skupionych wokół przemieszczania wyposażenia w sposób wariantowy, z uwzględnieniem odpowiednich przesłanek naukowych uwidoczonych w efekcie zastosowania prawidłowości matematycznych, a także kwestii inżynierskich i technicznych. A zatem stosując aparat programowania matematycznego oraz metody symulacji komputerowej, można opracować model przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych w określonych relacjach przegrupowania tych sił, ze względu na predefiniowane funkcje celu wyznaczające najbardziej korzystne warianty. Tak opracowany model decyzyjny może być traktowany jako narzędzie wspomagania decyzji w zakresie zabezpieczenia logistycznego wojsk lądowych.

Wykaz rysunków i tabel

Rysunki

Rys. 1. Wagon osobowy na zamówienie MON	28
Rys. 2. Metoda postępowania w rozprawie.....	35
Rys. 3. Ilustracja definicji drogi	38
Rys. 4. Graficzne przedstawienie węzłów sieci transportowej	39
Rys. 5. Odwzorowanie struktury połączenia Rzeszów – Drawsko Pomorskie.....	43
Rys. 6. Ilustracja graficzna przemieszczania wyposażenia wojsk lądowych, w ustalonych relacjach przegrupowania, w modelu decyzyjnym	52
Rys. 7. Koszty średnie w funkcji drogi	71
Rys. 8. Rozłożone wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk (ładunków, osób) w funkcji drogi	71
Rys. 9. Zanieczyszczenie powietrza związkami toksycznym; sektor LULUCF (ang. <i>Land use, land use change and forestry</i>)	73
Rys. 10. Zanieczyszczenie powietrza związkami toksycznymi, GUS 2020 r.....	76
Rys. 11. Lokalizacje miejsc obsługi podróżnych MOP z uwzględnieniem potrzeb parkowania pojazdów dla ładunków niebezpiecznych, uwzględnionych w konwencji ADR.....	77
Rys. 12. Procentowy udział poszczególnych gałęzi transportu w tworzeniu kosztów zewnętrznych ogółem.....	78
Rys. 13. Koszty zewnętrzne w funkcji drogi w przypadku kryterium kosztów zewnętrznych	87
Rys. 14. Rozłożone wielkości przemieszczanego wyposażenia wojsk w funkcji drogi w przypadku kryterium kosztów zewnętrznych	87
Rys. 15. Czas przejazdu w zakresie przegrupowania w funkcji drogi	91
Rys. 17. Identyfikacja zbiorów dopuszczalnych	92
Rys. 18. Brak zbioru pustego spośród zbiorów dopuszczalnych.....	93
Rys. 19. Relacja podzbiorów	93
Rys. 20. Zbiór pusty jako relacja.....	93
Rys. 21. Schemat blokowy aplikacji komputerowej	101
Rys. 22. Struktura grafu zaimplementowana w modelu symulacyjnym.....	103
Rys. 23. Procedura <i>ApplyPlan</i> służąca do wprowadzenia danych wsadowych w modelu symulacyjnym	104
Rys. 24. Obecna sytuacja drogowa dotycząca łuku 1(1,2).....	108

Tabele

Tabela 1. Charakterystyki łuków relacji Rzeszów – Drawsko Pomorskie.....	61
Tabela 2. Koszty średnie w funkcji drogi.....	70
Tabela 3. Poziom zanieczyszczenia szkodliwymi związkami spalin pochodzącymi z drogowego transportu towarowego	76
Tabela 4. Kalkulowane koszty ekologiczne uwzględniające estymowaną wartość szkód wywołanych przez dany środek transportowy	79
Tabela 5. Kalkulowane koszty ekologiczne uwzględniające estymowaną wartość szkód wywołanych przez dany środek transportowy na 10 ⁶ pas. km i 10 ⁶ tkm wyrażone w ECU (European Currency Unit; 1 stycznia 1999 r. zastąpiona przez euro w relacji 1 ECU = 1 EUR).....	79
Tabela 6. Koszty zewnętrzne transportu w Polsce szacowane na 2014 r. przy uwzględnieniu kategorii kosztów, z wyłączenie kosztów kongestii.....	80
Tabela 7. Instrumenty internalizacji kosztów zewnętrznych	81

Tabela 8. Roczny koszt przypadający na osobę narażoną na poziom hałasu p_z [EUR]	84
Tabela 9. Dynamika zmian kosztów zewnętrznych transportu drogowego i szynowego w Polsce.....	85
Tabela 10. Koszty zewnętrzne w funkcji drogi	86
Tabela 11. Średnie prędkości lokalne w ruchu swobodnym	89
Tabela 12. Czasy przejazdu w zakresie przegrupowania w rozpatrywanej relacji, przypadające na daną drogę.....	90
Tabela 13. Prędkość przemieszczania się w zależności od pory dnia	105
Tabela 14. Porównanie czasów i kosztów realizacji przegrupowania, uzyskanych na podstawie modeli analitycznego i symulacyjnego w przypadku wariantu $W1$	111
Tabela 15. Porównanie czasów i kosztów realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk, uzyskanych na podstawie modeli analitycznego i symulacyjnego w przypadku wariantu $W2$	116
Tabela 16. Porównanie czasów i kosztów realizacji przemieszczania wyposażenia wojsk, uzyskanych na podstawie modeli analitycznego i symulacyjnego w przypadku wariantu $W3$	118
Tabela 17. Ocena cząstkowych funkcji kryterium wraz ze wskazaniem dróg o najlepszych i najgorszych walorach wdrożeniowych	120

Bibliografia

1. Abt S., 1996, Systemy logistyczne w gospodarowaniu. Teoria i praktyka logistyki, AE, Poznań 1996.
2. Ambroziak T., 2005, Optymalizacja tras dostaw oraz dobór optymalnych środków transportowych. Systemy Logistyczne Teoria i Praktyka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
3. Ambroziak T., Gołębiowski P., Woźnicki K., Jacyna-Gołda K., Jachimowski R., Kłodawski M., Lewczuk K., Szczepański E., 2014, Wariantowe rozłożenie potoku ruchu w zadanej sieci przy uwzględnieniu kosztów zewnętrznych, Logistyka vol. 4, pp. 1605-1616.
4. Ambroziak T., Jachimowski R., 2012, Klasteryzacja punktów obsługi i wyznaczanie tras pojazdów w dwuszczeblowym systemie dystrybucji, Logistyka, nr 4, pp. 255–264.
5. Ambroziak T., Jacyna M., Gołębiowski P., Wasiak M., Żak J., 2013, Wpływ rozłożenia potoku ruchu w sieci transportowej na poziom emisji CO₂ przez środki transportu, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, vol. 97, pp. 9-18.
6. Ashton W.D., 1966, The theory of road traffic flow. Methuen & Co Ltd., Londyn, Wielka Brytania.
7. Bala Subramanian C., Maragatharajan M., Balakannan S.P., 2020, Inventive approach of path planning mechanism for mobile anchors in WSN, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. doi:10.1007/s12652-020-01752-2
8. Baran A., 2020, Możliwość usprawnienia podsystemu transportu i ruchu wojsk w zakresie planowania i organizowania transportu nienormatywnego w Siłach Zbrojnych RP, Zeszyty Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Witelona w Legnicy, nr 34(1), pp. 89-101.
9. Barcik J., Czech P., 2014, Prawne aspekty bezpieczeństwa w ruchu drogowym kolumn wojskowych obcych Sił Zbrojnych na terytorium RP, Logistyka, nr 5, pp. 44-53.
10. Basiewicz T., Gołaszewski A., Rudziński L., 1998, Infrastruktura transportu, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
11. Benec M., Smal T., 2007, Wojskowy transport strategiczny jako wyzwanie dla Sił Zbrojnych RP, Zeszyty Naukowe WSOWL, vol. 1, pp. 18-32.
12. Benton J., Herndon R., Iyengar S.S., Deng W., Brener N., Subrahmanian V.S., 1995, Tactical route planning: new algorithms for decomposing the map, Proceedings of the IEEE International Conference on Tools for AI, 6-8 November 1995, pp. 268-277.
13. Bryk, 2021, <https://bit.ly/37QcXZN>, dostęp on-line: 1 kwietnia 2021 r.
14. Brykowski J., Cieślak M., Kempański R., Muzal T., Strycharczyk J., Tomaszek K., 2008, Informator kierowcy, Inspektorat Wsparcia Sił Zbrojnych Szefostwo Transportu i Ruchu Wojsk Centrum Koordynacji Ruchu Wojsk, Grupa IMAGE Sp. z o.o., Warszawa.
15. Byleń S., 2019, Development of the IT system supporting the management of the transport and movement system of the armed forces of the Republic of Poland, Zeszyty Naukowe ASzWoj, nr 1(114), pp. 88-101.
16. Campbell C., Hull R., Root E., Jackson L., 1995, Route planning in CCTT, Proceedings of the 5th Conference on Computer Generated Forces and Behavioural Representation, Technical Report, Institute for Simulation and Training, pp. 233-244.

17. Cascetta E., 2009, *Transportation Systems Analysis. Models and Applications*. 2nd Edition. Springer Optimization and Its Application, Vol.29. Springer: New York.
18. Chan, H.K., Lee, H.B., Xiao, X., Ulmke, M., 2010, Integrated GMTI radar and report tracking for ground surveillance, 13th Conference on Information Fusion, Fusion 2010, 26- 29July 2010, Edinburgh, UK.
19. Church A., 2011, Air force world, *Air Force Magazine*, vol. 94, nr 1, pp. 12-20.
20. Dakudowicz T., Cyrek M., Brzostek T., Cichecki J., Cieśla M., Deja J., Kaźmierowski J., Kowalski A., Kozerawski D., Małek J., Marecki W., Osiński A., Piasecki W., Rudawski K., Rudnicki W., Szalc J., Szarmach R., Węlyczko L., Wiktorowski Z., Żabierek A., 2000, *Podręcznik walki pododdziałów wojsk zmechanizowanych (pluton, drużyna)*, Dowództwo Wojsk Lądowych Wyższa Szkoła Oficerska im. Tadeusza Kościuszki, Warszawa 2000.
21. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M., 1997, *Inżynieria ruchu*, WKŁ, Warszawa.
22. DD/4.4.3, 2006, *Instrukcja o przewozach wojsk oraz uzbrojenia i sprzętu wojskowego transportem morskim (DD/4.4.3)*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Sztab Generalny Wojska Polskiego, Szef. Kom. 165/2006, Warszawa 2006.
23. DD/4, 2002, *Doktryna logistyczna Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej: DD/4 / Ministerstwo Obrony Narodowej*. Sztab Generalny Wojska Polskiego. - Warszawa: MON. Szt. Gen. WP, 2002.
24. Dijkstra E., 1959, A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, 1, 269-271.
25. Dowództwo Wojsk Lądowych, 2008, *Reg. działań Wojsk Lądowych, DWLąd Wewn. 115/2008*, Warszawa.
26. Dz.U.2016.124 t.j. | Akt obowiązujący Wersja od: 30 sierpnia 2020 r. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/warunki-techniczne-jakim-powinny-odpowiadac-drogi-publiczne-i-ich-16835362>, dostęp on-line 9 września 2021 r.
27. *Encyklopedia powszechna*, 1974, PWN, Warszawa, t. 2, s. 748.
28. Evertsz R., Ritter F.E., Russell S., Shepherdson D., 2007, Modeling Rules of Engagement in Computer Generated Forces Rick, *Proceedings of the 16th Conference on Behavior Representation in Modeling and Simulation*. Orlando, FL: U. of Central Florida, pp. 123-134.
29. Finkel M., 2020, *Organizational and technological flexibility*, [w:] *On Flexibility*, Redwood City: Stanford University Press, 2020, pp. 73-97. <https://doi.org/10.1515/9780804777155-005>
30. Firetms, <https://firetms.com/pl/blog/jak-wyznaczyc-stawke-za-km-zlecenia-transportowego/> (dostęp on-line 12 sierpnia 2021 r.).
31. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., 2008. *Inżynieria ruchu drogowego*, WKiŁ Warszawa.
32. Gajda B., 1978, *Technika ruchu kolejowego. Część 2. Technologia ruchu kolejowego*. WKiŁ, Warszawa.
33. Gnap J., Varjan P., Benova D., Kostrzewski M., 2018, The importance of road freight transport for the economic development of EU Member States, *Proceedings of 8th Intern. Scientific Conf. CMDTUR 2018*, 4.-5. October 2018, Žilina, Slovakia, pp. 152-158.

34. Gnap Jozef, Senko Šimon, Drličiak Marek, Kostrzewski Mariusz, 2021, Modeling of time availability of intermodal terminals, *Transportation Research Procedia*, 55, pp. 442-449. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.007>
35. Gondek S., Ostrowski K., 2017, Metoda obliczania przepustowości dróg dwupasowych dwukierunkowych – stan obecny, *Autobusy*, vol. 12/2017, pp. 1705-1714.
36. Gortney W.E. (ed.), 2016, Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms, Joint Publication 1-02, 8 November 2010 (15 February 2016).
37. Grala D., 2017, Terytorialny system zabezpieczenia logistycznego w aspekcie wsparcia polskich kontyngentów wojskowych realizujących zadania w operacjach wielonarodowych poza granicami kraju, *Zeszyty Naukowe ASzWoj*, vol. 1(106), pp. 66-78.
38. Gregorowicz J., Trybuś P., 2018, Wykonanie usług pomiarowo-analitycznych zw z zadaniem projektowym przedłużenia ul. Stęślickiego do al. Korfantego w Katowicach, tj. określenie miarodajnych natężeń ruchu – dobowy pomiar ruchu drogowego, <https://bit.ly/3DgoInZ> (dostęp on-line: 11 sierpnia 2021 r.)
39. Gronowicz J., 2003, Ochrona środowiska w transporcie lądowym. Instytut Technologii Eksploatacji, Poznań-Radom.
40. Gronowicz J., 2005, Kierunki zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska przez lokomotywy spalinowe, *TTS Technika Transportu Szynowego* 9, pp. 2-8.
41. Halor J., 2013, Komunikacja tramwajowa w aglomeracji katowickiej jako przedmiot polityki transportowej w okresie transformacji gospodarczej (1989-2010), w: *Współczesne uwarunkowania rozwoju transportu w regionie*, Michałowska M. (red.), pp. 78-112.
42. Hall F.L., 1996, Traffic stream characteristics, *Traffic Flow Theory*, US Federal Highway Administration, <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/tft/chap2.pdf>, dostęp on-line 24 mar. 2019 r.
43. Hamroza Z., 2006, O definicji uzbrojenia, *Problemy Techniki Uzbrojenia*, r. 35, z. 97, pp. 63-68.
44. Headquarters Department of the Army, 1995, *Transportation Operations*, Washington, DC, 3 October 1995, Field Manual No. 55-1
45. Herl B.K., Doe W.W., Jones D.S., 2005, Use of military training doctrine to predict patterns of maneuver disturbance on the landscape. I. Theory and methodology, *Journal of Terramechanics*, vol. 42, is. 3–4, pp. 353-371. doi: 10.1016/j.jterra.2004.10.009
46. Ignaciuk P., Gil L., Wójcik A., 2016, Porównanie kosztów eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej zasilanych gazem CNG i olejem napędowym, *Autobusy*, vol. 11, pp. 67-69.
47. Jachimowski R., 2014, Algorytm metaheurystyczny dla problemu układania tras pojazdów, *Logistyka*, nr 6, pp. 4616–4624.
48. Jachimowski R., Szczepański E., 2014, Sieci Petriego w analizie problemu wyznaczania tras pojazdów, *Logistyka*, nr 4, pp. 1885–1892.
49. Jacyna M., 2000, Wielokryterialne modelowanie rozłożenia potoku ruchu w multimodalnym korytarzu transportowym (cz. 1). *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, z. 44, pp. 57-75.
50. Jacyna M., 2001, Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, z. 47, pp. 3-139.

51. Jacyna M. (red.), 2014, *Kształtowanie systemów w wybranych obszarach transportu i logistyki*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa.
52. Jacyna M., Kakietek S., Przygocki M., 2004, *Wielokryterialne modelowanie rozłożenia potoku ruchu w multimodalnym korytarzu transportowym. Cz. II – Ocena dostosowania infrastruktury do zadań*, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport*, vol. 52, pp. 7-26.
53. Jacyna M., Merkisz J., 2014a, *Proecological Approach to Modelling Traffic Organization in National Transport System*, *Archives of Transport*, vol. 30, is. 2, pp. 31-41. Doi: 10.5604/08669546.1146975
54. Jacyna M., Merkisz J., 2014b, *EMITRANSYS-model krajowego systemu transportowego w ujęciu proekologicznym*, *Logistyka*, nr 4, pp. 17-19.
55. Jacyna M., Merkisz J., 2014c, *Kształtowanie systemu transportowego z uwzględnieniem emisji zanieczyszczeń w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa.
56. Jacyna M., Pyza D., 2019, *Problemy decyzyjne w kształtowaniu proekologicznego systemu transportowego*, *Autobusy*, nr 6, pp. 61-67. Doi:10.24136/atest.2019.126
57. Jacyna M., Szczepański E., 2012, *Problem optymalizacji tras w dystrybucji ładunków na obszarach zurbanizowanych* *Logistyka*, nr 4, pp. 265-274.
58. Jacyna M., Wasiak M., 2014, *Simulation model to support designing a sustainable transport system*, *Indec Copernicus International*: Warszawa.
59. Jacyna-Gołda I., Lewczuk K., Szczepański E., Gołębiowski P., 2015, *Analizy scenariuszowe rozłożenia ruchu w sieci transportowej w aspekcie zrównoważonego rozwoju*, *Logistyka*, nr 4, pp. 3752-3759.
60. Jacyna-Gołda I., Lewczuk K., Szczepański E., Gołębiowski P., 2014a, *Rozłożenie ruchu w sieci transportowej z zastosowaniem modelu EMITRANSYS w aspekcie scenariuszy rozwoju system transportowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa.
61. Jacyna-Gołda I., Żak J., Gołębiowski P., 2014b, *Models of traffic flow distribution for various scenarios of the development of proecological transport system*, *The Archives of Transport*, is. 32, vol. 4, pp. 17-28.
62. James J., Sayrs B., Benton J., Subrahmanian V.S., 1999, *Uncertainty management: keeping battlespace visualization honest*, *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Advanced Telecommunications and Information Distribution Research Program (ATIRP)*, 1-5 February 1999, University of Maryland, College Park, MD.
63. Janasz D., Smal T., 2013, *Modelling of Polish military contingent redeployment from ISAF operation in Afghanistan*, *Logistics and Transport*, vol. 20, nr 4, pp. 107-112.
64. Jędrzejczak Z., Kukuła K., Skrzypek J., Walkosz A., 2016, *Badania operacyjne w przykładach I zadaniach*, Warszawa, PWN.
65. Juszczyk S., Tymińska M., 2010, *Optymalizacja organizacji transportu w systemie dystrybucji przedsiębiorstwa*, *Zeszyty Naukowe SGGW w Warszawie. Ekonomika i Organizacja Gospodarki Żywnościowej*, nr 81, pp. 251-259.
66. Kaddoussi A., Zoghلامي N., Zgaya H., Hammadi S., Bretaudeau F., 2011, *Disruption Management Optimization for Military Logistics*. In: Iliadis L., Maglogiannis I., Papadopoulos H. (eds) *Artificial Intelligence Applications and Innovations. EANN 2011, AIAI 2011. IFIP Advances in Information*

- and Communication Technology, vol 364. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 61-66. Doi: 10.1007/978-3-642-23960-1_8
67. Kamrani F., Luotsinen L.J., Lovlid R.A., 2016, Learning objective agent behavior using a data-driven modeling approach, 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2016 - Conference Proceedings, 9-12 October 2016, Budapest, Hungary, 7844561, pp. 2175-2181. doi:10.1109/SMC.2016.7844561
 68. Kannammal K.E., Purusothaman T., 2011, Comparison of data centric routing protocols with random way point mobility model in mobile sensor networks, European J. of Sc. Research, vol. 65, nr 4, pp. 546-552.
 69. Karkula M., 2018, Praktyczne aspekty problemu układania tras z podziałem dostaw (SDVRP), Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, z. 120, pp. 155-166
 70. Kaszubowski Z., Mizera R., Piasecki S., 1970, Problemy przegrupowania wojsk, WAT, Warszawa.
 71. Kempa J., 1983, Prędkości rzeczywiste samochodów na krzywych poziomych, Drogownictwo, vol. 1/1983, pp. 26-31.
 72. Kędziński A. (2021) <https://bit.ly/3IALmIP>, dostęp online 22 kwietnia 2021 r.
 73. Kioumourtzis G., Bouras C., Gkamas A., 2012, Performance evaluation of ad hoc routing protocols for military communications, International Journal of Network Management, vol. 22, nr 3, pp. 216-234. doi:10.1002/nem.802
 74. Kolek G., Majewska J., Mijewska J., Pajka, A., Sokół-Potocki M. Uroda-Blarowska P., 2012, Słownik języka haseł przedmiotowych nauk o bezpieczeństwie i obronności, polsko-angielski, Centralna Biblioteka Wojskowa im. Marszałka Józefa Piłsudskiego, Warszawa 2012.
 75. KOM, 2008, Załącznik IIIA pt. „Minimalne wymagania dotyczące nakładania opłaty z tytułu kosztów zewnętrznych oraz elementy maksymalnego dozwolonego kosztu uwzględnianego przy ustaleniu kwoty opłaty” do wniosku Komisji Europejskiej i Rady Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady zmieniającej dyrektywę 1999/62/WE w sprawie pobierania opłat za użytkowanie niektórych typów infrastruktury przez pojazdy ciężarowe. Dokument KOM (2008)436, Bruksela, 8.7.2008.
 76. Korzan, B., 1978, Elementy teorii grafów i sieci. Metody i zastosowania. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1978.
 77. Kosicki D., 2015, O wybranych metodach obliczania przepustowości sieci kolejowej, Przegląd komunikacyjny, vol. 9, pp. 19-23.
 78. Kostrzewski M., 2018, Modelowanie i badanie wybranych elementów i obiektów logistycznych z wykorzystaniem metod symulacyjnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
 79. Kowalski K., 2010, Organizacja utrzymania wojskowych środków transportu, Autobusy, vol. 6, pp. 1-11.
 80. Krzyżiński P., 2008, Racjonalizacja czasu przemieszczania jednostki operacyjnej i sprzętu na duże odległości w warunkach specjalnych, Praca dyplomowa magisterska, Wydział Transportu, Politechnika Warszawska
 81. Kreitzberg T., Barragy T., Nevin B., 1990 Tactical movement analyzer: a battlefield mobility tool, Proceedings of the 4th Joint Tactical Fusion Symposium, Laurel, 1990.
 82. Kulińska E., 2014, Alternatywna droga transportu materiałów stałych, Logistyka, nr 6, pp. 6353-6363.

83. Leszczyński J., 1999, Modelowanie systemów i procesów transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
84. Lewicki J., 2008, Siły zbrojne jako element systemu państwowego RP, *Politeja*, vol. 9, pp. 85-110. 64.
85. Lewiński A., 2017, The role of logistics in shaping the competitive advantage of enterprises. *Poszerzamy Horyzonty*. Tom V, pp. 19-27. 65.
86. Ligaj M., (2015). Logistic support of polish military contingents – selected issues. *Zeszyty Naukowe Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. Tadeusza Kościuszki Journal of Science of the gen. Tadeusz Kosciuszko Military Academy of Land Forces*, 47 (2), pp.29-46. <http://dx.doi.org/10.5604/17318157.1179654>
87. Longtin M., Megherbi D., 1995, Concealed routes in ModSAF, Proceedings of the 5th Conference on Computer Generated Forces and Behavioural Representation, Technical Report, Institute for Simulation and Training, pp. 305-314.
88. Madrjas J., 2020, Wojskowe wagony PKP Intercity nie będą dostępne dla pasażerów, *Rynek Kolejowy*, <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/wojskowe-wagony-pkp-intercity-nie-beda-dostepne-dla-pasazerow-99051.html>, dostęp online 22 kwietnia 2021 r.
89. Madrjas J., (2021) <https://www.rynek-kolejowy.pl/mobile/wojsko-zaczelo-negocjacje-z-pkp-cargo-od-14-mld-zl-za-7-lat-101082.html> (dostęp online 12 sierpnia 2021 r.)
90. Maibach M., Schreyer C., Sutter D., Van Essen H.P., Boon B.H., Smokers R., Schrotten A., Doll C., Pawłowska B., Bąk M., 2007, Handbook on estimation of external cost in the transport sector. Produced within the study Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT). CE Delft, Delft, Holandia.
91. Malinowski Z., 2017, The impact of new technologies on supply chain management in the armed forces. *Zeszyty Naukowe Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. Tadeusza Kościuszki Journal of Science of the gen. Tadeusz Kosciuszko Military Academy of Land Forces*, 49 (4), p. 231-248, DOI: 10.5604/01.3001.0010.7231
92. Malinowski Z., 2017, Zastosowanie nowych technologii w zabezpieczeniu logistycznym wojsk realizujących zadania w specyficznych środowiskach walki, *Zeszyty Naukowe ASzWoj*, vol. 1(106), pp. 79-101.
93. Manet, 1999, <https://tools.ietf.org/html/rfc2501>, dostęp on-line: 3 kwietnia 2021 r.
94. Marczuk A., 2009, Komputerowy system optymalizacji transportu owoców miękkich w sieci rozproszonego skupu, *Eksploatacja i Niezawodność*, nr 4, pp. 82-90.
95. Massel A., 2015, Przyspieszenie ruchu pasażerskiego w Polsce, *TTS Technika Transportu Szynowego*, vol. 1–2 /2015, pp. 25-32.
96. Merkisz-Guranowska A., Czerwiński J., Daszkiewicz P., Andrzejewski M., 2017, Analiza kosztów środowiskowo społecznych w transporcie intermodalnym z wykorzystaniem naczep jako jednostek ładunkowych, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, vol. 117, pp. 199-205.
97. Miecznikowski S. (red.), 2001, Rola transportu w integracji europejskiej: materiały z konferencji naukowej (pod red. Stanisława Miecznikowskiego), *Gdańskie Towarzystwo Naukowe*, Gdańsk, pp. 1-139.

98. Ministerstwo Infrastruktury (2020). <https://orka2.sejm.gov.pl/INT9.nsf/klucz/ATTBNXHPB/%24FILE/i02192-o1.pdf>. Dostęp on-line 3 sierpnia 2021 r.
99. Mitchell J.S.B., 1999, Geometric shortest paths and network optimization, in J.R. Sack and J. Handbook of Computational Geometry, Urrutia: Elsevier Science Publishers, North-Holland, Amsterdam 1999.
100. Moto WP, 2013, Czy opłaca się omijać autostradę A4?, <https://moto.wp.pl/czy-oplaca-sie-omijac-autostrade-a4-6068415721907329a>. Dostęp on-line: 2017-12-03.
101. Mroczo F., 2016, Logistyka, Wyższa Szkoła Zarządzania i Przedsiębiorczości z siedzibą w Wałbrzychu, Wałbrzych.
102. Myszczyński Z., Wielgosik N., Borucka A., 2016, Modelowanie procesu zaopatrywania wojsk w czasie prowadzenia działań taktycznych, *Gospodarka Materialowa i Logistyka*, nr 5, pp. 1-15.
103. Najgebauer A., Dyk M., 2011, Sieci sensorowe dla potrzeb pozyskiwania danych w symulacji wielorozdzielczej, *Symulacja w Badaniach i Rozwoju Vol. 2, No. 4*, pp. 197-207.
104. Nareyek A., Goenawan A.K., 2011, Tactical multi-unit pathplanning with GCLS, *Proceedings of the 7th AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment, AIIDE 2011*, 11-14 October 2011, Palo Alto, California, pp. 176-181.
105. National Research Council (U.S.). Transportation Research Board, 1989, Highway capacity, flow measurement, and theory. Transportation Research Board, National Research Council, 1989. Series: Transportation research record, 1225. Washington.
106. Nowak E., *Logistyka w sytuacjach kryzysowych*, Wyd. II poprawione i poszerzone, AON, Warszawa 2009.
107. Nowosielski L., 1999, *Organizacja przewozów kolejowych*. Warszawa, Kolejowa Oficyna Wydawnicza.
108. Önal H., Woodford P., Tweddale S.A., Westervelt J.D., Chen M., Dissanayake S.T.M., Pitois G., 2016, A dynamic simulation/optimization model for scheduling restoration of degraded military training lands, *Journal of Environmental Management*, 171, pp. 144-157. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.02.005.
109. Pacholski Ł. (2019), <https://radar.rp.pl/wojsko-polskie/13451-pkp-intercity-zamawia-wagony-dla-wojska-w-h-cegielski>, dostęp online 22 kwietnia 2021 r.
110. Page E.H., Opper J.M., 2000, Investigating the application of web-based simulation principles within the architecture for a next-generation computer generated forces model, *Future Generation Computer Systems*, vol. 17, issue 2, pp. 159-169, [https://doi.org/10.1016/S0167-739X\(99\)00111-9](https://doi.org/10.1016/S0167-739X(99)00111-9).
111. Pająk M., 2019, Ograniczanie ryzyka zagrożeń w transporcie drogowym przez zastosowanie systemu monitorowania towarów niebezpiecznych, praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań.
112. Paliwo, <http://paliwo.ulewa.com/koszt-na-1-km> (dostęp on-line 12 sierpnia 2021 r.).
113. Paszkowski J., Kucharski R. 2017, Paradoksy przepustowości miejskiej sieci drogowej i sposoby ich odwzorowania w modelu czterostadiowym, *Transport miejski i regionalny*, vol. 10, pp. 5-11.
114. Paterak S., 2014, Problemy w przemieszczeniu PKW – w perspektywie planowanej operacji wycofania wojsk z Afganistanu, *Zeszyty Naukowe WSOWL*, vol. 2 (172), pp. 70-79. <https://doi.org/10.5604/17318157.1127096>

115. Pawłowska B., 2018, Koszty zewnętrzne transportu w Polsce Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 27 (1), 28–41. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2018.27.1.4>
116. Petty M.D., 1995, Computer generated forces in Distributed Interactive Simulation, Proceedings of the Conference on Distributed Interactive Simulation Systems for Simulation and Training in the Aerospace Environment, 19-20 April 1995, Orlando, USA, pp. 251-280.
117. Pisano G.P., 1994, Knowledge, integration and the locus of learning: an empirical analysis of process development, Strategic Management Journal, vol. 15, pp. 85-100.
118. Porter M.E., 2006, Strategia konkurencji. Metody analizy, sektorów i konkurentów, MT Biznes: Warszawa.
119. PLK SA, 2020, Wykaz linii Id-12 (D-29), Załącznik do zarządzenia Nr 1/2009 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 9 lutego 2009 r., stan na dzień 27 marca 2020 r. https://www.plk-sa.pl/files/public/user_upload/pdf/Akty_prawne_i_przepisy/Instrukcje/Wydruk/Id-12_D29_Wykaz_linii.pdf. Dostęp on-line 20 lipca 2021 r.
120. Poliński J., 2012, Identyfikacja, estymacja i internalizacja kosztów zewnętrznych transportu, Problemy Kolejnictwa, vol. 156, pp. 33-67.
121. Polska Zbrojna, 2014, <http://polska-zbrojna.pl/home/articleshow/14591?t=Podhalanczyzy-z-Podkarpacia#>, dostęp on-line 12 sierpnia 2021 r.
122. Puławska S., 2008, Koszty zewnętrzne w polityce transportowej Unii Europejskiej. „TTS Technika Transportu Szybowego”, 5–6.
123. Pushpa R.A., Vallimayil A., Dhulipala V.R.S., 2011, Impact of mobility models on mobile sensor networks, ICECT 2011 - 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, vol. 4, 5941866, pp. 102-106. doi:10.1109/ICECTECH.2011.5941866
124. Puskiewicz W., Piątkowski P., 2018, Podstawowe zasady transportu i ruchu wojsk własnych i sojusznicych, Autobusy, nr 6, pp. 1106-1113.
125. Ramming S. M., 2002, Network Knowledge and Route Choice, praca doktorska, Massachusetts Institute of Technology, MA, US.
126. Reece D.A., 2003, Movement Behavior for Soldier Agents on a Virtual Battlefield, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, vol. 12, nr 4, pp. 387-410. doi:10.1162/105474603322391622
127. Ryczyński J., Nowakowska M., 2018, Risk assessment in military transport—human factor in estimation of risk, Safety and Reliability—Safe Societies in a Changing World: Proceedings of ESREL 2018, June 17-21, 2018, Trondheim, Norway.
128. Ryczyński J., Smal T., 2017, Proposition of a Model for Risk Assessment in the Transport of the Oversized Loads in the Army, 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT), May 31 – June 2, 2017, Brno, Czech Republic.
129. Rydzynski P., 2004, Pasażerskie przewozy dalekobieżne – raport, Rynek Kolejowy, nr 4.
130. Scott P.A., Christie C.J., 2004, “Optimal” speed-load combinations for military manoeuvres, International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 33, is. 1, pp. 63-68, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2003.09.003>.
131. Sierpiński G., 2012, Zachowania komunikacyjne osób podróżujących a wybór środka transportu w mieście, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, z. 84, pp. 93-106.

132. Sitarek M., Wełyczko L., 1996, Zabezpieczenie komunikacyjne wojsk / rec.: Franciszek Milewicz, Wyższa Szkoła Oficerska im. Tadeusza Kościuszki. Wydział Inżynierii Wojskowej. - Wrocław: WSO im. T. Kościuszki. Cz. 5: Zasady działania kompanii regulacji ruchu.
133. Słomiany W., 2017, Możliwości wykorzystania systemu logistycznego Sił Zbrojnych Rzeczypospolitej w sytuacjach kryzysowych, Zeszyty Naukowe ASzWoj, nr 3 (108), pp. 156-181.
134. Słowiński B., 2008, Wprowadzenie do logistyki. Koszalin University of Technology Publishing House, Koszalin.
135. Suvin P.V., Mallikarjuna C., 2018, Modified Generalized Definitions for the Traffic Flow Characteristics under Heterogeneous, No-Lane Disciplined Traffic Streams, Transportation Research Procedia, Vol. 34, pp. 75-82. doi: 10.1016/j.trpro.2018.11.016
136. Szlachta A., 2007, Organizacja logistyki w siłach zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej, Zeszyty Naukowe. Logistyka i Transport, Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu, vol. 4, no. 1, pp. 77-85.
137. Tarapata Z., 1997, Algorithm for simultaneous finding a few independent shortest paths, Conference Proceedings of the 9th European Simulation Symposium, Passau (Germany), pp. 89-93.
138. Tarapata Z., 2000a, Modelling of terrain for necessities of military objects movement simulation, Bulletin of Military University of Technology, Vol. 1, pp. 127-146.
139. Tarapata Z., 2000b, Multi-paths optimization in an unreliable time-dependent networks, Proceedings of The 2nd NATO Regional Conference on Military Communication and Information Systems, 4-6 października 2000, Zegrze, vol. I, pp. 181-189.
140. Tarapata Z., 2001, Modelling, optimisation and simulation of groups movement according to group pattern in multiresolution terrainbased grid network, Proceedings of The 3rd NATO Regional Conference on Military Communication and Information Systems, Vol. 1, pp. 241-251.
141. Tarapata Z., 2003, Military route planning in battlefield simulation: effectiveness problems and potential solutions, Journal of Telecommunications and Information Technology, No 4, pp. 47-56.
142. Tarapata Z., 2004, Models and methods of movement planning and simulation in simulation aided system for operational training, Proceedings of The 6th NATO Regional Conference on Military Communication and Information Systems, 06-08 October 2004, Zegrze (Poland), pp. 152-161.
143. Tarapata Z., 2007, Selected multicriteria shortest path problems: an analysis of complexity, models and adaptation of standard algorithms, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol. 17, No. 2, pp. 269-287.
144. Tarapata Z., 2008a, Zastosowanie metod wyznaczania przepływu w sieciach do planowania manewru wojsk, Biuletyn Instytutu Systemów Informatycznych, vol. 2, pp. 31-44.
145. Tarapata Z., 2008b, Automatization of decision processes in conflict situations: modelling, simulation and optimization, w: Arreguin J.M.R. (ed.): Automation and Robotics, ISBN 978-3-902613-41-7, I-Tech Education and Publishing, Vienna (Austria), pp. 297-328.
146. Tarapata Z., 2011, Oparte na wiedzy modele i algorytmy planowania oraz symulacji przemieszczania w systemach wojskowych klasy DSS i CGF, Logistyka, vol. 4, pp. 970-981.

147. Tiongson G.D., 2016, Future unmanned concept of operations (CONOPs)-supporting future expeditionary and joint forcible entry forces, Annual Forum Proceedings - AHS International. 2016, vol. 3, pp. 2513-2521.
148. Toubman A., Roessingh J.J., van Oijen J., Løvlid R.A. Hou M. Meyer C., Luotsinen L., Rijken R., Harris J., Turčaník M., 2016, Modeling behavior of Computer Generated Forces with Machine Learning Techniques, the NATO Task Group approach, 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Budapest, Hungary, 2016, pp. 001906-001911, doi: 10.1109/SMC.2016.7844517.
149. Towpiak K., 2017, Transport Szynowy W Miastach – Kierunki Rozwoju, Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, Oddział w Krakowie, nr 2(113), pp. 163-172
150. Trela M., 2012, Ekonomiczne instrumenty systemu internalizacji kosztów zewnętrznych wynikających z eksploatacji środków transportu drogowego w Polsce, rozprawa doktorska, Wydział Zarządzania Katedra Ekonomii, Finansów i Zarządzania Środowiskiem, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Kraków.
151. van Eck N.J., Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* 2010, 84 (2), 523–538. doi: 10.1007/s11192-009-0146-3.
152. van der Heijden K., Bradfield R., Burt G., Cairns G., Wright G. 2009, *The sixth sense: Accelerating organizational learning with scenarios*, John Wiley & Sons.
153. Vasanthi V., Romen Kumar M., Ajith Singh N., Hemalatha M., 2011, A detailed study of mobility models in wireless sensor network, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 33, nr 1, pp. 7-14.
154. Vennik K., Kukk P., Krebstein K., Reintam E., Keller T., 2019, Measurements and simulations of rut depth due to single and multiple passes of a military vehicle on different soil types, *Soil and Tillage Research*, vol. 186, pp. 120-127, doi: 10.1016/j.still.2018.10.011.
155. Wardrop J. G., 1952, Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 1 (3), pp. 325–362. doi:10.1680/ipeds.1952.11259.
156. Wardrop J. G., Whitehead J. I., 1952, Correspondence. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, *ICE Proceedings: Engineering Divisions*, vol. 1 (5), p. 767. doi:10.1680/ipeds.1952.11362.
157. Wikipedia, 2019a, „Autostrada A4 (Polska)”. *Wikipedia* – https://pl.wikipedia.org/wiki/Autostrada_A4_%28Polska%29. Dostęp on-line 4 września 2019 r.
158. Wikipedia, 2019b, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_91_%28Polska%29. Dostęp on-line 4 września 2019 r.
159. Wikipedia, 2019c, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_68. Dostęp on-line 4 wrz.. 2019 r.
160. Wikipedia, 2019d, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_74. Dostęp on-line 4 wrz. 2019 r.
161. Wikipedia, 2019e, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_78. Dostęp on-line 4 wrz. 2019 r.
162. Wikipedia, 2019f, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_25. Dostęp on-line 4 wrz. 2019 r.
163. Wikipedia, 2019g, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_8. Dostęp on-line 4 wrz. 2019 r.
164. Wikipedia, 2019h, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_22. Dostęp on-line 4 wrz. 2019 r.
165. Wikipedia, 2019i, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_14. Dostęp on-line 4 wrz. 2019 r.
166. Wikipedia, 2019j, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_272. Dostęp on-line 4 wrz. 2019 r.

167. Wikipedia, 2019k, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_351. Dostęp on-line 4 wrz. 2019 r.
168. Wikipedia, 2019l, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_202. Dostęp on-line 4 wrz. 2019 r.
169. Wikipedia, 2019m, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_kolejowa_nr_210. Dostęp on-line 4 wrz. 2019 r.
170. Wikipedia, 2021a, https://pl.wikipedia.org/wiki/Pr%C4%99dko%C5%9B%C4%87_handlowa Dostęp on-line 3 sierpnia 2021 r.
171. Worthington W.J., Collins J.D., Hitt M.A., 2009, Beyond risk mitigation: enhancing corporate innovation with scenario planning, *Business horizons*, vol. 52, is. 5, pp. 441-450.
172. Wronka J., 2002, *Transport kombinowany w aspekcie wymogów zrównoważonego rozwoju*, Warszawa - Szczecin, Wydawnictwo Naukowe Ośrodka Badawczego Ekonomiki Transportu.
173. Zowada K., 2016, Zarządzanie środowiskowe w transporcie. Przypadek małego przewoźnika, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i zarządzanie*, 99, pp. 643-658.
174. Żochowska R., 2012, Modelowanie wyboru drogi w transporcie indywidualnym – wybrane aspekty. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, z. 86, pp. 83-104.