

Jakub Murawski¹

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Ilona Jacyna-Golda²

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji

Problem wyznaczania optymalnej lokalizacji terminali transportu intermodalnego

1. WPROWADZENIE

Zgodnie z definicją zawartą w [16] transport intermodalny to przewóz ładunków w jednej jednostce ładunkowej przy użyciu co najmniej dwóch różnych, następujących po sobie gałęzi transportu. Zalety transportu intermodalnego to przede wszystkim:

- uproszczenie robót ładunkowych,
- zmniejszenie pracochłonności przeładunków;
- zmniejszenie kosztów realizacji zadania transportowego;
- skrócenie czasu realizacji zadania transportowego;
- zmniejszenie ryzyka uszkodzenia ładunku podczas robót ładunkowych;
- zmniejszenie kosztów składowania ładunków (ze względu na charakterystykę jednostek ładunkowych transportu intermodalnego).

Do wad omawianego rodzaju transportu na pewno można zaliczyć konieczność poniesienia wysokich nakładów inwestycyjnych na specjalizowane środki transportowe oraz infrastrukturę transportu intermodalnego (możliwe jest również dostosowanie istniejącej infrastruktury dla potrzeb transportu intermodalnego).

Zazwyczaj transport intermodalny jest utożsamiany z transportem kombinowanym, jednak to drugie pojęcie jest znacznie węższe. Transport kombinowany zaliczany jest do transportu intermodalnego,

w którym jednostka ładunkowa na zasadniczej części trasy przewożona jest między terminalami przez kolej, żeglugę śródlądową lub morską, a jej dowóz i odwóz odbywa się transportem drogowym na możliwie najkrótsze odległości. Analogicznie jak w transporcie intermodalnym, w trakcie realizacji procesu przewozowego transportem kombinowanym przeładunki realizowane są bez zmiany jednostki ładunkowej. [4]

Jak wskazuje autor [13] transport kombinowany łączy zalety różnych gałęzi transportu, to znaczy zdolność do przewozu dużych ładunków na dalekie odległości charakterystyczną dla transportu kolejowego oraz żeglugi śródlądowej i morskiej z dobrą dostępnością i elastycznością transportu drogowego na krótkie odległości, niezbędną w systemach zwózkowych i rozwózkowych. Poza wymienionymi wcześniej zaletami transportu intermodalnego, do pozytywnych cech z nim związanych należy zaliczyć także:

- wykorzystanie gałęzi transportu przyjaznych środowisku,
- zmniejszenie negatywnych dla człowieka i środowiska naturalnego kosztów zewnętrznych związanych z transportem drogowym,
- zmniejszenie natężenia ruchu drogowego,
- zmniejszenie zjawiska kongestii na drogach,
- poprawa bezpieczeństwa w ruchu drogowym,
- zgodność z ideą kształtowania zrównoważonego transportu.

¹Murawski.Jakub@gmail.com

²Jacyna.Golda@gmail.com

Zgodnie z klasyfikacją zaprezentowaną w [12] wśród systemów transportu kombinowanego możemy wyróżnić:

- technologię "ruchomej drogi",
- technologię kontenerów wielkich i specjalizowanych,
- technologię nadwozi wymiennych,
- technologię pojemników systemu ATCS (*Abroll Container Transport System*),
- technologię transportu bimodalnego,
- technologię naczep transportu kombinowanego.

Każda z wyżej wymienionych technologii ma określone cechy charakterystyczne, a dobór odpowiedniej technologii jest kluczowy z punktu widzenia organizacji procesu przewozowego w transporcie intermodalnym.

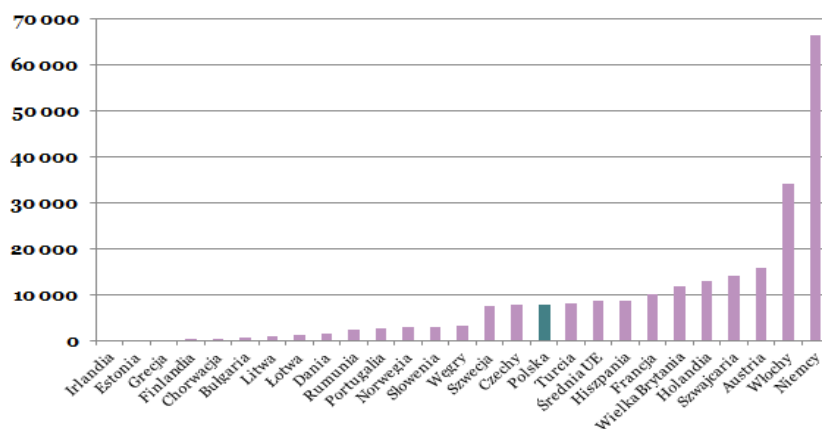
2. ZNACZENIE TRANSPORTU INTERMODALNEGO W POLSCE I W EUROPIE

Unia Europejska od lat podkreśla konieczność zmniejszenia szkodliwego oddziaływania transportu na środowisko, zwracając szczególną uwagę na problem transportu drogowego. Już w 1970 r. Rada Europejskiej Wspólnoty Gospodarczej przyjęła dyrektywę określającą maksymalny poziom emisji tlenków węgla i węglowodorów przez samochody osobowe i dostawcze. W następnych latach wraz

z przekształceniem Europejskiej Wspólnoty Gospodarczej w Unię Europejską przyjmowane były kolejne akty prawne mające na celu ograniczenie emisyjności transportu. Jednym z najważniejszych dokumentów kształtujących politykę transportową Unii Europejskiej jest tzw. *Biała księga* [14]. Jej głównym założeniem jest ograniczenie do 2050 r. emisji gazów cieplarnianych emitowanych w sektorze transportu o 60% w stosunku do poziomu z 1990 r.

Jak można zauważyć *Biała księga* wskazuje nie tylko cele w zakresie ograniczania emisyjności transportu, ale także metody jakimi można te cele osiągnąć. Do najważniejszych z nich należy rozwój transportu intermodalnego poprzez:

- optymalizację intermodalnych łańcuchów logistycznych,
- wykorzystywanie do przewozów w większym stopniu środków transportu kolejowego jak również żeglugi śródlądowej i morskiej
- rozwój terminali przeładunkowych (w przypadku transportu pasażerskiego – punktów przesiadkowych) umożliwiający integrację sieci transportowej,
- zaprojektowanie nowych korytarzy transportowych zoptymalizowanych pod względem wykorzystania energii oraz minimalizacji negatywnego oddziaływania na środowisko.



Rys. 1. Ilość przewiezionych towarów transportem kolejowym w systemie transportu intermodalnego w krajach UE w 2012 r. w tys. ton

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Eurostat

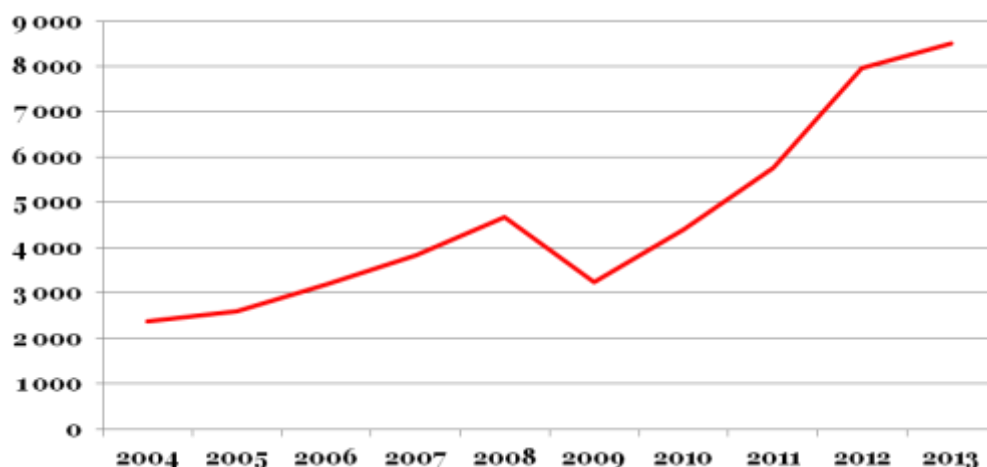
Jak wspomniano transport intermodalny stanowi alternatywę dla tradycyjnego transportu drogowego i jest istotnym elementem kształtowania polityki zrównoważonego transportu. Dlatego też dynamiczny rozwój transportu intermodalnego jest postrzegany jako rozwiązanie wielu problemów europejskiego systemu transportowego. Należy zaznaczyć że omawiany rodzaj transportu jest niezwykle istotny również z punktu widzenia interesów Polski. Główny cel krajowej polityki transportowej zapisany w [15] to stworzenie w Polsce zintegrowanego systemu transportowego. Cel ten ma zostać osiągnięty poprzez realizację celów strategicznych takich jak m.in. poprawa sposobu organizacji

i zarządzania systemem transportowym. Wypełnienie wspomnianego celu głównego jak i celów strategicznych krajowej polityki transportowej wymaga rozbudowy brakujących elementów infrastruktury transportowej we wszystkich gałęziach transportu. Autorzy dokumentu [15] szczególną uwagę skupiają na rozwoju terminali (zwanymi platformami) intermodalnych, które umożliwią rozwijanie polskiego systemu transportu intermodalnego.

Niestety, w chwili obecnej transport intermodalny w Polsce nie jest w najlepszej kondycji. Jak wynika z rys. 1, w 2012 r. w Polsce przewieziono około 8 tys. ton towarów transportem kolejowym w systemie transportu intermodalnego, co stanowiło około 4% pracy przewozowej wykonanej przez transport kolejowy ogółem. Dla porównania w tym samym okresie czasu w Holandii i we Włoszech było to blisko 35%, przy czym średnia europejska wynosiła około 18%. Mimo wszystko, należy zaznaczyć że transport intermodalny w Polsce stale się rozwija. Na kolejnym rysunku przedstawiono ilość przewiezionych towarów transportem kolejowym w systemie transportu intermodalnego w Polsce w latach 2004-2013, jak łatwo zauważyć w tym okresie czasu wolumen ładunków przewożonych opisywanym rodzajem transportu wzrósł czterokrotnie.

Brak rozwiniętej sieci terminali przeładunkowych dedykowanych dla transportu intermodalnego jest wskazywany jako główna bariera utrudniająca jego rozwój w Polsce. Stan techniczny lądowych terminali intermodalnych jest daleki od doskonałości, a większość z nich nie jest przystosowana pod względem infrastruktury do realizacji procesów przeładunkowych z wykorzystaniem najnowszych technologii. Ponadto zauważalny jest brak dostatecznej liczby terminali kontenerowych na wschodniej granicy Polski, a ogólnopolskie plany rozbudowy sieci terminali tego typu nie istnieją [8].

Nie ulega wątpliwości, że sprawny transport intermodalny wymaga odpowiedniej sieci terminali przeładunkowych transportu intermodalnego. W dokumentach strategicznych przewidywana jest rozbudowa sieci terminali dedykowanych dla omawianego rodzaju transportu. W *Strategii Rozwoju Transportu* wspomniano, że objęcie transportem intermodalnym całego terytorium Polski wymagałoby uruchomienia co najmniej trzydziestu nowych terminali przeładunkowych transportu intermodalnego.



Rys. 2. Ilość przewiezionych towarów transportem kolejowym w systemie transportu intermodalnego w krajach Unii Europejskiej w 2012 r. w tys. ton

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Eurostat

3. ISTOTA PROBLEMU LOKALIZACJI TERMINALI PRZEŁADUNKOWYCH TRANSPORTU INTERMODALNEGO

Zgodnie z definicją zaprezentowaną w [5], system transportowy to układ środków technicznych, organizacyjnych i ludzkich powiązanych ze sobą w taki sposób żeby mógł on sprawnie realizować przemieszczanie osób i (lub) ładunków w czasie i przestrzeni. Aby system transportowy mógł działać prawidłowo niezbędna jest:

- infrastruktura liniowa - istniejące połączenia transportowe;
- infrastruktura punktowa - wyodrębnione przestrzennie punkty nadania i odbioru ładunków oraz obiekty służące do ich obsługi;
- infrastruktura informatyczna - środki przekazu oraz standardy wymiany danych;
- suprastruktura - środki transportowe.

Terminale przeładunkowe transportu intermodalnego są szczególnym przykładem infrastruktury punktowej systemu transportowego, ponieważ muszą być one dostosowane do różnych technologii transportu intermodalnego co wiąże się ze specyficzną organizacją ich pracy. Z tego względu w rozważaniach i badaniach dotyczących tego typu obiektów stosowane jest podejście systemowe, w którym terminale przeładunkowe stanowią jeden z elementów systemu transportowego

W publikacji [6] opisano rozwinięcie zaproponowanego podejścia systemowego. Autor wskazuje, że w przypadku zastosowania podejścia systemowego bardzo istotna jest umiejętność zapisu struktur systemów transportowo-logistycznych, charakterystyk potoków ruchu obciążających układ i związanych z nimi strumieni informacji w postaci formuł matematyczno-logicznych. Dzięki temu możliwe jest opracowanie prawidłowego modelu matematycznego, algorytmu jego rozwiązania oraz zastosowania technik komputerowych do przeprowadzenia badań symulacyjnych. Prowadzenie wspomnianych rozważań ma na celu opracowanie takiej organizacji funkcjonowania całego układu, aby możliwe było właściwe wykorzystanie zasobów infrastruktury transportowej i urządzeń uczestniczących w procesie realizacji zadań.

Problematyka transportu kombinowanego oraz intermodalnego wiąże się z wieloma interesującymi problemami badawczymi. Analizując literaturę można zauważyć, że rozpatrywane są takie aspekty jak chociażby: analizy kosztów opłacalności transportu tego typu, wyznaczanie optymalnych tras dla pojazdów zwózkowych/rozwózkowych, czy badania dotyczące strategii rozwoju transportu intermodalnego. Najbardziej fundamentalnym problemem jest jednak kształtowanie sieci logistycznej uwzględniającej charakterystykę przewozów intermodalnych i związanej z nią infrastruktury.

Stale rosnące zapotrzebowanie na realizację przewozów transportem intermodalnym skutkuje koniecznością zapewnienia infrastruktury transportu intermodalnego, która zaspokoi to zapotrzebowanie oferując usługi na satysfakcjonującym poziomie. W związku z tym można wyróżnić cztery cechy charakterystyczne terminali przeładunkowych transportu intermodalnego, tj.:

- lokalizacja,
- wydajność obsługi,
- koszt obsługi
- zakres obsługiwanych technologii.

Dosyć oczywiste wydaje się stwierdzenie, że w przypadku obiektów takich jak terminale przeładunkowe, czy centra konsolidacji ładunków najbardziej kluczowa jest ich lokalizacja. Nawet jeżeli terminal będzie charakteryzował się dobrymi wskaźnikami wydajności i kosztu obsługi, ale nie będzie zlokalizowany w odpowiednim miejscu nie będzie mógł spełniać swojej funkcji we właściwy sposób.

Zarówno liczba terminali przeładunkowych jak również ich lokalizacja musi zostać wyznaczona w taki sposób, aby opracowana sieć obiektów logistycznych była w stanie spełnić wymagania:

- inwestora - minimalizacja nakładów inwestycyjnych oraz maksymalizacja zysków po zrealizowaniu inwestycji;
- operatora terminala - minimalizacja kosztów utrzymania obiektu;

- potencjalnych klientów (np. organizatorów przewozów) - dostępność oraz minimalizacja kosztów operacji przeładunkowych;
- społeczeństwa - ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko. [10]

Jak łatwo zauważyć, wspomniane wymagania są sprzeczne względem siebie, stąd aby rozwiązanie omawianego problemu decyzyjnego było racjonalne, dokonanie wyboru powinno zostać poprzedzone gruntownymi analizami uwzględniającymi potrzeby transportowe, aspekty środowiskowe, czy rachunek ekonomiczny oraz konsultacjami ze wspomnianymi uczestnikami procesu, tj. inwestorami, potencjalnymi klientami, operatorami logistycznymi, czy osobami odpowiedzialnymi za tworzenie strategicznych planów transportowych. Co więcej, niezbędne jest wsparcie procesu decyzyjnego poprzez wykorzystanie metod modelowania matematycznego oraz algorytmów optymalizacyjnych.

Należy zwrócić uwagę, że jak wskazuje autorka [4] dla potrzeb wyznaczenia właściwej organizacji punktów przeładunkowych w strukturze sieci transportowo-logistycznej niezbędne jest opracowanie kryteriów, które będą stanowiły wskaźniki oceny jakości rozwiązania, do których można zaliczyć:

a) kryteria techniczne tzw. użytkowe takie jak:

- mierniki powierzchniowe dla oceny zagospodarowania obszarów w zakresie powierzchni,
- dobowa pracochłonność procesu przepływu ładunków i informacji ze względu na pracę potrzebnych pracowników,
- dobowa pracochłonność procesu przepływu ładunków i informacji ze względu na pracę potrzebnych urzędzeń,
- liczba potrzebnych pracowników i urzędzeń,

b) kryteria ekonomiczne tzw. kosztowe takie jak:

- statyczny i dynamiczny miernik nakładów,
- kosztowy miernik rozwiązania organizacyjnego projektowanego systemu,
- kosztowy miernik mechanizacji i automatyzacji,

c) kryteria jakościowe takie jak:

- niezawodność funkcjonowania systemu,
- elastyczność systemu,
- możliwość rozbudowy.

4. STRUKTURA SIECI LOGISTYCZNEJ UWZGLĘDNIAJĄCEJ TERMINALE TRANSPORTU INTERMODALNEGO

Problem wyznaczania lokalizacji terminali transportu intermodalnego w literaturze jest opisywany jako ITLP (*intermodal terminal location problem*), stanowiąc rozwinięcie problemu wyznaczania lokalizacji hubów HLP (*hub location problem*). Huby są węzłami w sieci logistycznej, które pełnią funkcje magazynów krótkiego składowania, punktów przeładunkowych oraz sortowni w systemach dystrybucyjnych w których przewozy realizowane są od wielu dostawców do wielu odbiorców. W takich systemach do danego hubu zwożone są ładunki od wielu dostawców, a następnie po realizacji procesów przeładunkowych, czy sortowania rozwożone do wielu odbiorców.

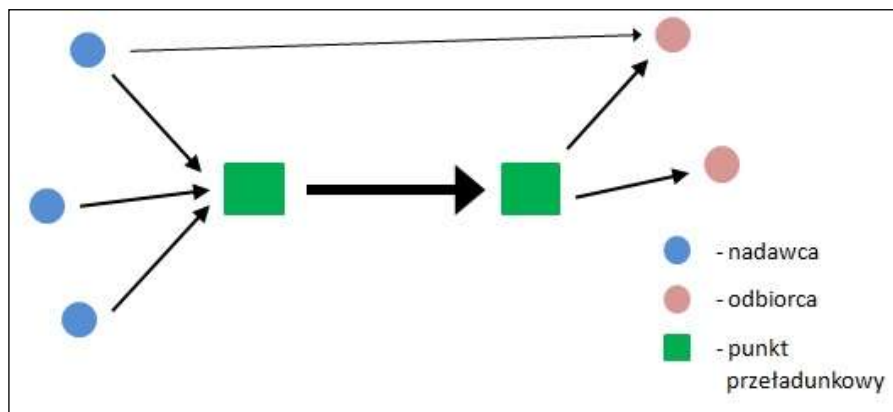
Główne założenia problemu wyznaczania lokalizacji terminali transportu intermodalnego to:

- liczba terminali transportu intermodalnego nie jest ustalona,
- liczba terminali transportu intermodalnego zależy od całkowitego kosztu uruchomienia terminali,
- każdy terminal charakteryzuje się kosztem uruchomienia oraz pojemnością;
- ładunki mogą być przesyłane od nadawców do odbiorców kilkoma drogami równocześnie,
- ładunki pomiędzy danym odbiorcą i nadawcą mogą być przesyłane jednocześnie bezpośrednio z pominięciem terminali intermodalnych jak i pośrednio z wykorzystaniem terminali intermodalnych,
- w przypadku wykorzystywania transportu intermodalnego, ładunek musi zostać przesłany przez dwa terminale transportu intermodalnego.

Cechami, które odróżniają problem wyznaczania lokalizacji terminali transportu intermodalnego od problemu wyznaczania lokalizacji hubów są dwa ostatnie założenia. Rys. 3 ilustruje strukturę sieci

logistycznej uwzględniającej terminale przeładunkowe transportu intermodalnego. Na omawianym schemacie można wyróżnić trzy rodzaje połączeń:

- pomiędzy nadawcami, a terminalem oraz pomiędzy terminalem, a odbiorcami (stanowiące odwzorowanie relacji zwózkowych i rozwózkowych),
- pomiędzy dwoma terminalami transportu intermodalnego,
- bezpośrednio pomiędzy nadawcami, a odbiorcami bez wykorzystania terminali transportu intermodalnego.



Rys. 3. Ilustracja struktury sieci logistycznej uwzględniającej terminale przeładunkowe transportu intermodalnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [9]

Na potrzeby projektowanej sieci logistycznej konieczne jest jej zdefiniowanie jako uporządkowana dwójka, tj.:

$$S = \langle V, L \rangle \quad (1)$$

gdzie:

S - sieć logistyczna;

V - zbiór numerów elementów sieci logistycznej;

L - zbiór połączeń transportowych występujących między elementami sieci logistycznej.

Zgodnie z interpretacją sieci logistycznej zbiór jej elementów stanowią: dostawcy, terminale przeładunkowe transportu intermodalnego oraz odbiorcy, w związku z tym w zbiorze V wyróżniamy:

- zbiór numerów nadawców:

$$I = \{1, 2, \dots, i, \dots, \tilde{I}\} \quad (2)$$

gdzie:

i - numer nadawcy,

\tilde{I} - liczba nadawców;

- zbiór numerów odbiorców:

$$J = \{1, 2, \dots, j, \dots, \tilde{J}\} \quad (3)$$

gdzie:

j - numer odbiorcy,

\tilde{J} - liczba odbiorców;

- zbiór numerów terminali transportu intermodalnego:

$$T = \{1, 2, \dots, s, t, \dots, \tilde{T}\} \quad (4)$$

gdzie:

s, t - numery terminali transportu intermodalnego,

\tilde{T} - liczba terminali transportu intermodalnego.

Geograficznie elementy $i \in I$ oraz $j \in J$ w szczególnym przypadku mogą się pokrywać lecz różnią się rolą jaką pełnią w sieci logistycznej. Zakładamy, że podział węzłów sieci logistycznej na zbiory I , J i T jest wyczerpujący i rozłączny. Na potrzeby projektowania układu zakładamy, że zadane są także:

- ilość ładunku jaka musi zostać przewieziona pomiędzy i -tym dostawcą a j -tym odbiorcą jest przedstawiona w dwuwymiarowej macierzy:

$$Q = [q_{ij}]_{\bar{I} \times \bar{J}} \quad (5)$$

- koszt c_{ij} bezpośredniego przewozu jednostki ładunku pomiędzy i -tym dostawcą a j -tym odbiorcą jest przedstawiony w dwuwymiarowej macierzy:

$$C_1 = [c_{ij}]_{\bar{I} \times \bar{J}} \quad (6)$$

- koszt c_{ij}^{st} przewozu jednostki ładunku pomiędzy i -tym dostawcą a j -tym odbiorcą poprzez terminale transportu intermodalnego s i t jest przedstawiony w czterowymiarowej macierzy:

$$C_2 = [c_{ij}^{st}]_{\bar{I} \times \bar{J} \times \bar{T} \times \bar{T}} \quad (7)$$

- koszt f_t uruchomienia terminala transportu intermodalnego t :

$$F = [f_t]_{\bar{T}} \quad (8)$$

- pojemność z_t terminala transportu intermodalnego t :

$$Z = [z_t]_{\bar{T}} \quad (9)$$

5. PRZYKŁADOWE METODY ROZWIĄZANIA ROZPATRYWANEGO PROBLEMU

Analizując dostępną literaturę poruszającą problematykę wyznaczania lokalizacji terminali transportu intermodalnego można zauważyć, że po raz pierwszy próbę rozwiązania rozpatrywanego problemu badawczego podjęto w pracy [2]. Opisany model zakładał możliwość przewozu ładunków zarówno pośrednio (z wykorzystaniem transportu intermodalnego) jak i bezpośrednio (z pominięciem terminali intermodalnych), jednak nie dopuszczał wykorzystania przewozów bezpośrednich i pośrednich jednocześnie w tej samej relacji. Model ten zawierał szereg założeń upraszczających rozpatrywany problem takich jak:

- nieuwzględnianie kosztu powstania (uruchomienia) terminala transportu intermodalnego,
- nieuwzględnianie wolumenu ładunków, które mają zostać przewiezione;
- założenie nieskończonej pojemności terminali intermodalnych.

W publikacji [1] zaprezentowano rozwinięcie tego modelu uwzględniające koszt powstania (uruchomienia) terminala transportu intermodalnego. W udoskonalonym modelu założono, że terminale intermodalne stanowią luki, a nie węzły w sieci logistycznej, co umożliwiło znaczne zredukowanie liczby zmiennych decyzyjnych.

Wszystkie kolejne z omawianych modeli stanowią rozwinięcie modelu opisanego w [2]. Na przykład w pracy [9] zaprezentowano podejście nieuwzględniające bezpośrednich przewozów ładunków pomiędzy nadawcą, a odbiorcą. Z kolei autorzy [7] przyjęli że dany nadawca może być przypisany wyłącznie do jednego terminala intermodalnego. Interesujące podejście zawiera model opisany w pracy [3], w którym uwzględniono nie tylko koszty, ale także czas realizacji procesu transportowego, pomijając jednak ograniczenie dotyczące zdolności przeładunkowych terminali intermodalnych.

Po przeanalizowaniu literatury przedmiotu modelem, który najlepiej odwzorowuje specyfikę omawianego problemu jest model opisany w [11]. Autorzy pracy sformułowali model uwzględniający wszystkie założenia i dane wejściowe wskazane w rozdz. 4. Omawiany model definiuje następujące zmienne decyzyjne:

- zmienne decyzyjne y_t określają czy t -ty terminal transportu intermodalnego jest otwarty:

$$Y = [y_t]_{\bar{T}} \quad (10)$$

$$\forall_{t \in \bar{T}} y_t = \begin{cases} 1 & - \text{gdy terminal transportu intermodalnego jest otwarty} \\ 0 & - \text{gdy terminal transportu intermodalnego nie jest otwarty} \end{cases}$$

- zmienne decyzyjne x_{ij} o interpretacji ilości ładunków przewożonych bezpośrednio pomiędzy i -tym dostawcą a j -tym odbiorcą z pominięciem terminali transportu intermodalnego. Zmienną decyzyjną opisano za pomocą macierzy:

$$X_1 = [x_{ij}: x_{ij} \in C^+ \cup \{0\}]_{\bar{I} \times \bar{J}} \quad (11)$$

- zmienne decyzyjne x_{ij}^{st} o interpretacji ilości ładunków przewożonych pomiędzy i -tym dostawcą a j -tym odbiorcą poprzez terminale transportu intermodalnego s i t . Zmienną decyzyjną opisano za pomocą macierzy:

$$X_2 = [x_{ij}^{st}: x_{ij}^{st} \in C^+ \cup \{0\}]_{\bar{I} \times \bar{J} \times \bar{T} \times \bar{T}} \quad (12)$$

Opisano następujące ograniczenia definiujące zbiór rozwiązań dopuszczalnych, tj.:

- ładunek nie może być przewożony przez terminal intermodalny, który nie jest otwarty:

$$x_{ij}^{st} \leq q_{ij} \cdot y_s \quad \forall i \in I \quad \forall j \in J \quad \forall s, t \in T \quad (13)$$

$$x_{ij}^{st} \leq q_{ij} \cdot y_t \quad \forall i \in I \quad \forall j \in J \quad \forall s, t \in T \quad (14)$$

- całkowita wielkość ładunku przewożona bezpośrednio i pośrednio w danej relacji powinna być taka jak zapotrzebowanie na przewóz w tej relacji:

$$w_{ij} + \sum_{s, t \in T} x_{ij}^{st} = q_{ij} \quad \forall i \in I \quad \forall j \in J \quad (15)$$

- wielkość ładunku wwożona i wywożona do t -tego terminala nie może być większa od jego pojemności

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s, t \in T} x_{ij}^{st} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s, t \in T} x_{ij}^{ts} \leq z_t \quad \forall t \in T \quad (16)$$

W omawianym modelu, aby osiągnąć optymalny wynik należy wyznaczyć taką liczbę terminali przeładunkowych transportu intermodalnego, aby całkowity koszt opracowanego rozwiązania był jak najmniejszy. Funkcję celu można zapisać w postaci wyrażenia:

$$F(x) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s, t \in T} c_{ij}^{st} \cdot x_{ij}^{st} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{t \in T} f_t \cdot y_t \rightarrow \min \quad (17)$$

Przedmiotowy problem może zostać rozwiązany metodami dokładnymi lub poprzez wykorzystanie algorytmów heurystycznych. Zgodnie z [11] problem wyznaczania optymalnej lokalizacji terminali intermodalnych jest NP-trudny, co oznacza że z pomocą metod dokładnych możliwe będzie rozwiązywanie jedynie niewielkich zadań optymalizacyjnych. W przypadku metod tego typu znalezienie rozwiązania wymaga przeprowadzenia wielu iteracji, w związku z czym jest bardzo czasochłonne.

Z tego powodu do rozwiązania problemu wyznaczania lokalizacji terminali transportu intermodalnego dużo bardziej odpowiednie są metody heurystyczne. W ich przypadku otrzymane rozwiązanie może być bliskie optymalnemu – mniej dokładne, jednak czas obliczeń będzie na akceptowalnym poziomie.

6. WNIOSKI

W ciągu ostatnich lat zarówno w Polsce jak i w Europie znaczenie transportu intermodalnego stale rośnie, ponieważ jest on coraz bardziej konkurencyjny w stosunku do tradycyjnych gałęzi transportu. Wspomniany trend prowadzi do formułowania nowych i coraz ciekawszych problemów badawczych, których rozwiązanie ma stanowić impuls na drodze do dalszego wzrostu udziału

transportu intermodalnego na rynku przewozowym. Jak wynika z analizy dokumentów strategicznych szczególnie istotny jest dynamiczny rozwój infrastruktury transportu intermodalnego, a zwłaszcza terminali przeładunkowych dedykowanych dla tego rodzaju transportu.

Omawiane zagadnienie wyznaczania racjonalnej lokalizacji terminali przeładunkowych transportu intermodalnego jest złożonym problemem badawczym, w związku z czym podejmowane są kolejne próby sformułowania tego problemu w taki sposób, aby opracowany model matematyczny jak najlepiej odwzorowywał rzeczywistość oraz był jak najbardziej efektywny. Wiele z przeanalizowanych modeli charakteryzowało się jednak dużą skalą uproszczeń i założeń, które sprawiają że opracowane metody nie mogą zostać zastosowane do wspomaganie rozwiązywania rzeczywistych problemów decyzyjnych.

Jak wspomniano wcześniej rozpatrywany problem jest wieloaspektowy, ponieważ w formułowanym modelu matematycznym konieczne jest uwzględnienie różnych (nierazko sprzecznych) interesów poszczególnych uczestników procesu przewozowego w transporcie intermodalnym. Jak wynika z przeprowadzonego przeglądu literatury brakuje modeli matematycznych uwzględniających różnorodność stosowanych technologii transportu intermodalnego, czy umożliwiających rozwiązywanie zagadnień związanych z więcej niż dwiema gałęziami transportu.

Z przeprowadzonych studiów literaturowych wynika, że model matematyczny opisany w [11] może stanowić bazę dla opracowania nowych metod wspomagających podejmowanie decyzji w zakresie terminali transportu intermodalnego. W przypadku rozwijania wspomnianego modelu konieczne jest uwzględnienie dodatkowych ograniczeń dotyczących m.in.:

- limitu nakładów inwestycyjnych;
- prognozowanych kosztów utrzymania terminala;
- poszczególnych rodzajów relacji pomiędzy nadawcą, a odbiorcą (np. ograniczenie przewozów bezpośrednich).

Należy zaznaczyć, że problematyka modelowania intermodalnych systemów transportowych jest niezwykle złożona, dlatego do rozwiązania omawianego problemu badawczego niezbędne jest zaimplementowanie aplikacji komputerowej wykorzystującej algorytmy heurystyczne. Ze względu na specyfikę problemu metody dokładne nie mogą zostać zastosowane w tym przypadku.

Streszczenie

Rozbudowa sieci terminali przeładunkowych transportu intermodalnego jest niezbędna z punktu widzenia rozwoju zintegrowanego systemu transportowego zarówno w Polsce jak i w Europie. W artykule opisano problematykę wyznaczania optymalnej lokalizacji intermodalnych terminali przeładunkowych. Skupiono się na przeanalizowaniu uwarunkowań technicznych, technologicznych i ekonomicznych jakie muszą zostać uwzględnione przy kształtowaniu sieci transportowej dla transportu intermodalnego. Ponadto artykuł zawiera krótki przegląd literatury dotyczący możliwych metod rozwiązania przedmiotowego problemu optymalizacyjnego.

Słowa kluczowe: optymalizacja, wyznaczanie lokalizacji, transport intermodalny, ITLP

Intermodal terminal location problem

Abstract

Evolution of transshipment terminals network for intermodal transport is necessary in order to maintain development of integrated transportation system in Poland as in Europe. The article describes intermodal terminals location problem (ITLP). Authors focused on analysis regarding technical, technological and economic requirements, which have to be consider during shaping transportation network for intermodal transport. Moreover the article includes short literature study about available methods allowing to find optimal solution for described research problem.

Keywords: optimization, location problem, intermodal transport, ITLP

LITERATURA

- [1] Arnold P., Peeters D., Thomas I.: *Modelling a rail/road intermodal transportation system*, Transportation Research Part E 40, 255–270, 2004.
- [2] Arnold P., Peeters D., Thomas I., Marchand H.: *For an optimum location of the intermodal centers of transshipment: Formulation and extensions*, The Canadian Geographer 45 (3), 427–436, 2001.
- [3] Ishfaq R., Sox C. R.: *Intermodal logistics: the interplay of financial, operational and service issues*. Transportation Research Part E 46, 926–949, 2010.
- [4] Jacyna I.: *Metoda projektowania sieci logistycznych dla przedsiębiorstw produkcyjnych*, Rozprawa doktorska, OWPW, Warszawa 2011.
- [5] Jacyna M.: *Wybrane zagadnienia modelowania systemów transportowych*. OWPW, Warszawa 2009.
- [6] Jacyna M. (red.), Merkiś-Guranowska A., Jacyna-Gołda I., Kłodawski M., Jachimowski R.: *Kształtowanie systemów w wybranych obszarach transportu i logistyki*, OWPW, Warszawa 2014.
- [7] Limbourg S., Jourquin B.: *Optimal rail-road container terminal locations on the European network*. Transportation Research Part E 45, 551–563, 2009.
- [8] Mindur L. (red): *Technologie transportowe*. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, Radom 2014.
- [9] Racunica I., Wynter L.: *Optimal location of intermodal freight hubs*. Transportation Research Part B 39, 453-477, 2005.
- [10] Sirikijpanichkul A., Van Dam K. H., Ferreira L., Lukszo Z.: *Optimizing the Location of Intermodal Freight Hubs: An Overview of the Agent Based Modelling Approach*. Journal Of Transportation Systems Engineering And Information Technology 7 (4), 71-81, 2007.
- [11] Sorensen K., Vanovermeire C., Busschaert S.: *Efficient metaheuristics to solve the intermodal terminal location problem*. Computers & Operations Research 39, 2079–2090, 2012.
- [12] Stokłosa J.: *Transport intermodalny. Technologia i organizacja*. Innovatio Press, Lublin 2011.
- [13] Wronka J.: *Transport kombinowany w aspekcie wymogów zrównoważonego rozwoju*. Wyd. Naukowe Ośrodka Badawczego Ekonomiki Transportu P.P., Warszawa 2002.
- [14] *Biała księga. Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu*. Komisja Europejska, Bruksela 2011.
- [15] *Strategia Rozwoju Transportu do 2020 roku (z perspektywą do 2030 roku)*. Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Warszawa 2013.
- [16] *Terminology on combined transport*, European Conference of Ministers of Transport, European Commission, New York – Geneva 2001.