

Piotr Sawicki, Szymon Fierek

Politechnika Poznańska, Zakład Systemów Transportowych

PROBLEM JEDNOCZESNEGO WYZNACZANIA PRZEBIEGU LINII I LOKALIZACJI ZAJEzdNI W SYSTEMIE TRANSPORTU ZBIOROWEGO

Rękopis dostarczono, październik 2017

Streszczenie: Artykuł dotyczy problemu łącznego rozwiązania dwóch problemów związanych z systemem publicznego transportu zbiorowego, tj. wyznaczenia przebiegu linii transportowych oraz ustalania lokalizacji zajezdni transportowych. Autorzy wyszli z założenia, iż umiejscowienie zajezdni w systemie transportowym nie tylko związane jest z bieżącym ukształtowaniem poszczególnych linii, ale możliwe są wzajemne interakcje w obrębie obu problemów, co implikuje łączne koszty eksploatacji środków transportu. Koszty te rozumiane są jako suma składowych wynikających z obsługi przewozów oraz strat z tytułu pustych przebiegów pomiędzy zajezdniami i liniami transportowymi. Autorzy rozwijając efekty wcześniejszych badań skoncentrowali się na ocenie wpływu dwóch elementów metodyki, tj. ocenie sposobu generowania zbioru linii transportowych i komfortu podróży na ostateczne rozwiązanie. W efekcie przeprowadzonych prac stwierdzono, że oba badane elementy mają znaczący wpływ na poziom generowanego rozwiązania.

Słowa kluczowe: publiczny transport zbiorowy, przebieg linii transportowych, lokalizacja zajezdni, komfort podróżowania.

1. WPROWADZENIE

1.1. PROJEKTOWANIE SYSTEMÓW TRANSPORTOWYCH

Projektowanie systemów transportowych (w tym sieci połączeń transportu zbiorowego) dla danego obszaru (regionu, miasta, dzielnicy) ma istotny wpływ na jego funkcjonowanie. Podstawą do opracowania sprawnego układu transportowego jest topografia rozważanego obszaru. Projektowanie rozwiązań transportowych ma miejsce zarówno w przypadku planowania nowych sieci komunikacyjnych na obszarach zagospodarowywanych, jak również w przypadku przebudowy i modernizacji już istniejących sieci.

Wśród celów projektowania rozwiązań transportowych najczęściej wymienia się zapewnienie sprawności funkcjonowania systemu transportowego przy rosnącym poziomie motoryzacji, poprawę jakości transportu zbiorowego, poprawę warunków parkowania, ograniczenie uciążliwości transportu dla środowiska (w tym zwłaszcza zanieczyszczenia

powietrza), poprawę bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz poprawę ekonomicznej efektywności transportu. W związku z tym można dostrzec silny związek pomiędzy projektowaniem rozwiązań transportowych, ustalaniem polityki transportowej i planowaniem przestrzennym. Prowadzi to do wniosku, że projektowanie systemów transportowych jest zadaniem wielopłaszczyznowym i kluczowym z punktu widzenia różnych interesariuszy związanych z danym obszarem (miasto, powiat, województwo itp.). Do kluczowych grup zaangażowanych w proces projektowy należą władze samorządowe i organizator transportu publicznego (niekiedy pod postacią tej samej instytucji) oraz operator publicznego transportu zbiorowego (PTZ). W zależności od roli każdej z tych jednostek, można spotkać się z różnymi problemami decyzyjnymi, jak np.:

- władze lokalne – problemy o charakterze strategicznym np.: ustalenie ogólnych zasad funkcjonowania transportu na danym obszarze w tym także polityka taryfowa, ustalenie lokalizacji kluczowych obiektów generujących ruch itp.,
- organizator PTZ – problemy o charakterze taktycznym, jak np. ustalenie przebiegu linii PTZ, częstotliwości kursów itp.,
- operator PTZ – problemy o charakterze operacyjnym do których zaliczyć można harmonogramowanie czasu pracy kierowców, harmonogramowanie brygad itp.

Oczywiście zaprezentowany powyżej podział nie jest tak jednoznaczny i bywają od niego odstępstwa oraz konieczność prowadzenia działań w sposób zintegrowany, współpracując przy rozwiązywaniu określonych problemów przez wielu różnych interesariuszy. Jest to silnie uzależnione od uwarunkowań lokalnych – polityki prowadzonej przez samorząd, struktury organizacyjnej itp.

Wspomnianą wyżej niejednoznaczność można dobrze zaobserwować na przykładzie problemów rozważanych w niniejszej pracy tj. ustalenia lokalizacji zajezdni oraz przebiegu linii. Z jednej strony stanowią one klasyczne połączenie problemów o charakterze strategicznym i taktycznym, z drugiej natomiast należy mieć na uwadze fakt silnej zależności pomiędzy ustaleniem lokalizacji zajezdni, a ustaleniem przebiegu linii PTZ. Nieodpowiednie zlokalizowanie zajezdni będzie generatorem znacznych kosztów. Problematykę tę komplikuje dodatkowo fakt konieczności okresowego dostosowywania przebiegów linii PTZ do popytu. O ile można tego dokonać w relatywnie mało kłopotliwy sposób (szczególnie w przypadku linii autobusowych), to w przypadku ustalenia lokalizacji zajezdni nie jest to możliwe – łączy się z kosztowną i przewidzianą na wiele lat inwestycją.

1.2. STAN WIEDZY Z ZAKRESU WYZNACZANIA PRZEBIEGU LINII I LOKALIZACJI ZAJEZDNI

Oba rozważane problemy są dobrze znanymi zagadnieniami i szeroko opisanymi w literaturze przedmiotu [3]. Jednakże, jak wynika z dokonanego przeglądu literatury, do rozwiązania ich podchodzi się do każdego z osobna, ewentualnie łączone są z innymi problemami. Najczęściej można znaleźć prace, w których rozważa się problem budowy sieci połączeń transportu zbiorowego z ustaleniem częstotliwości / rozkładu jazdy. Do rozwiązania tych problemów proponowane są różne techniki w zależności od szczegółowego zdefiniowania problemu, przykładowo:

- W. Szeto i Y.Wu [11] rozważali problem zaprojektowania linii autobusowych łączących centrum miasta z jego peryferiami. Autorzy sformułowali problem jako minimalizację liczby przesiadek i czasu podróży. W efekcie problem polegał na jednoczesnym ustaleniu przebiegu linii oraz częstotliwości kursowania. Do rozwiązania wykorzystali algorytmy metaheurystyczne – algorytmy genetyczne i przeszukiwanie sąsiedztwa.
- N. Lownes i R. Machemehl [6] dla zaprojektowania częstotliwości obwodowej linii kolejowej, zaproponowali podejście dokładne (programowanie całkowitoliczbowe) – w przypadku sieci średniej wielkości oraz podejście metaheurystyczne (przeszukiwanie tabu) – w przypadku dużych sieci. Problem został sformułowany jako minimalizacja całkowitych kosztów (użytkownika, operatora oraz niezaspokojonego popytu) przy zachowaniu płynnego transferu na inne linie na dworcu kolejowym.
- H. Cancela i in. [2] skupili się na ustaleniu przebiegu linii autobusowych i częstotliwości ich kursowania. W założeniu autorów linie powinny wykorzystywać istniejącą infrastrukturę (sieć drogową ze zbiorem przystanków) oraz zapewniać obsługę występującego popytu (w relacji źródło-cel podróży). Problem został zapisany w postaci programowania mieszanego.

Tematykę ustalenia lokalizacji zajezdni tramwajowych podejmują w swoich pracach P. Sawicki i P. Kupka [5, 9], stosując różne podejście do rozwiązania problemu. Z jednej strony zastosowali w swojej pracy szeregowanie wariantów lokalizacji przy wykorzystaniu metody AHP tj. jednej z metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji [9]. Odmiennie podejście zostało zaprezentowane w innej pracy tych samych autorów tj. ustalenie optymalnej lokalizacji nowej zajezdni (przy już dwóch istniejących) [5]. Problem został sformułowany jako przydział taboru do poszczególnych zajezdni.

1.3. CEL I ZAKRES BADAŃ

Istotą połączenia dwóch rozważanych w pracy problemów tj. ustalenia lokalizacji zajezdni oraz przebiegu linii PTZ, jest zapewnienie najniższych kosztów operacyjnych, przy jednoczesnym zapewnieniu pasażerom oferty przewozowej na jak najwyższym poziomie. Już sam problem ustalenia lokalizacji zajezdni jest problemem o złożonej charakterystyce. Z jednej strony koszty gruntów pod znacznej wielkości inwestycje powodują, że rejony na obrzeżach miast będą bardziej atrakcyjne kosztowo. Jednakże z drugiej strony taka lokalizacja będzie generowała wysokie koszty związane z dojazdem z zajezdni do przystanku początkowego jak również z ostatniego przystanku do zajezdni. Dodatkowe uwzględnienie w rozwiązywaniu tego problemu, planowania przebiegu linii PTZ sprawia, że uzyskane rozwiązanie powinno pozwolić na osiągnięcie optimum globalnego. Skrócenie tzw. pustych przebiegów środków transportu pozwoli zminimalizować koszty ponoszone przez operatora i jednocześnie powinno zaspokoić potrzeby komunikacyjne użytkowników systemu transportowego.

W pracy P. Sawickiego i S. Fierka [7] szczegółowo przedstawiono koncepcję modelu matematycznego i procedury wspólnego sformułowania i rozwiązania problemu ukształtowania linii transportowych i lokalizacji zajezdni. W niniejszym artykule autorzy sformułowali problem badawczy jako *ocenę wpływu wybranych parametrów funkcjonowania*

publicznego transportu zbiorowego, w szczególności sposobu generowania zbioru linii transportowych i komfortu podróżowania, na finalne rozwiązanie analizowanego problemu.

2. METODYKA MODELOWANIA I ROZWIĄZANIA PROBLEMU BADAWCZEGO

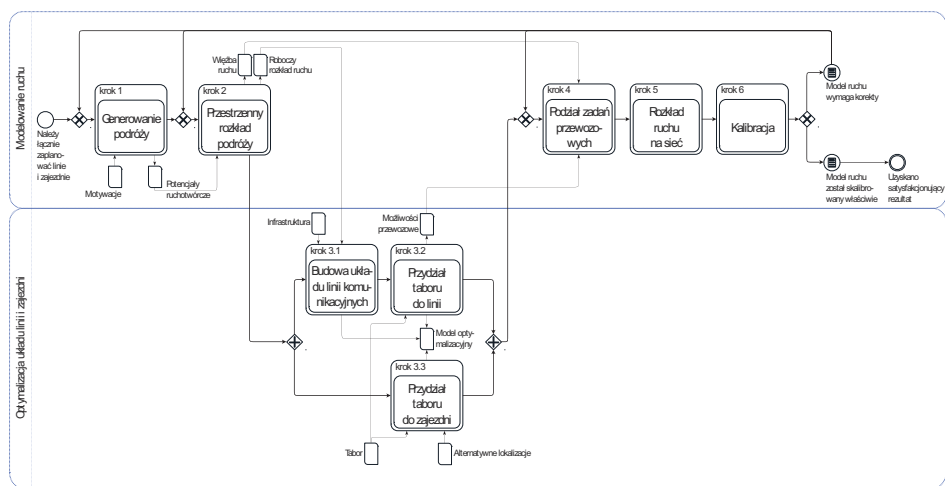
2.1. ZAŁOŻENIA METODYCZNE

Autorzy, we wcześniejszych swoich pracach o podobnej tematyce analizowali problem wyboru lokalizacji zajezdni tramwajowej [5, 9] oraz równoczesnego ustalenia lokalizacji zajezdni dla środków transportu zbiorowego i układu linii PTZ [7]. Jednakże podejście zastosowane w tych pracach było uproszczone, głównie poprzez przyjęcie jako punkt odniesienia obecnego ukształtowania linii transportowych. W niniejszej pracy założono możliwość ingerencji - projektowania linii transportu zbiorowego.

Przy ustalaniu metodyki badawczej, autorzy założyli, że:

- przebieg linii PTZ wynika z analizy całkowitej więźby ruchu (bez podziału modalnego) i jej roboczego rozkładu na sieć transportową,
- linie transportu publicznego powinny mieć charakter symetryczny,
- na każdej linii wykorzystywana jest homogeniczna flota tzn. pojemność pojazdów jest jednakowa,
- wielkość planowanej zajezdni jest nieograniczona tj. jej wielkość wynika z postoptymalizacyjnego przypisania pojazdów obsługujących linie PTZ.

Schemat prezentujący procedurę jednoczesnego modelowania i rozwiązania analizowanego problemu przedstawiono na Rys 1. Procedura ta zakłada wykorzystanie dwóch technik tj. modelowania ruchu i optymalizacji. W przypadku pierwszej z nich wykorzystano tzw. podejście czterostadiowe, pozwalające wyznaczyć potencjały ruchotwórcze, macierz ruchu, podział zadań przewozowych i finalnie rozłożenie potoków ruchu w sieci transportowej. Do wspomnianych wyżej stadiów modelowania ruchu została dołączona optymalizacja układu linii PTZ wraz z ustaleniem lokalizacji zajezdni i przydzieleniem taboru do linii PTZ oraz do odpowiedniej zajezdni. Została ona przeprowadzona z wykorzystaniem danych z roboczego rozkładu całkowitej więźby ruchu na sieć transportową. Dzięki takiej kolejności kroków w całej procedurze, możliwe było wyznaczenie podziału zadań przewozowych uwzględniającego optymalny układ linii PTZ oraz zajezdni. To z kolei pozwoliło na zweryfikowanie wyników na podstawie obserwowanych warunków ruchu w sieci transportowej, a także na testowanie różnych założeń.



Rys. 1. Procedura jednoczesnego modelowania i rozwiązania problemu wyznaczania przebiegu linii i lokalizacji zajezdni w systemie transportu zbiorowego (opr. na podstawie [7])

2.2. MODEL MATEMATYCZNY

2.2.1. Oznaczenia, zmienne decyzyjne i parametry

W modelu matematycznym analizowanego problemu, zgodnie z pracą [7], przyjęto następujące oznaczenia:

- *indeksy*: i – linia transportowa ($i = 1, \dots, I$), j – numer początkowego węzła w sieci transportowej ($j = 1, \dots, J$) oraz $j \neq k$, k – numer końcowego węzła w sieci transportowej ($k = 1, \dots, K$) oraz $k \neq j$, l – numer lokalizacji zajezdni ($l = 1, \dots, L$), t – przedział czasu ($t = 1, \dots, T$);
- *zmienne decyzyjne*: x_{ijk} – przydział łuku (j, k) do i -tej linii transportowej [-]; $x_{ijk} \in \{0, 1\}$; y_{ijkt} – liczba kursów wykonywanych na i -tej linii, po łuku (j, k), w przedziale czasu t [poj./h], $y_{ijkt} \in \mathbb{N}$; z_l – usytuowanie zajezdni w l -tej lokalizacji [-], $z_l \in \{0, 1\}$; p_{il} – przydział i -tej linii transportowej do obsługi z l -tej lokalizacji zajezdni [-], $p_{il} \in \{0, 1\}$;
- *parametry*: c_{ijk} – jednostkowy koszt pracy przewoźowej na łuku (j, k), należącym do i -tej linii transportowej [zł/poj.km], c_{il} – stały koszt pracy przewoźowej pomiędzy l -tą zajezdnią a i -tą linią transportową [zł/poj.km/doba], d_{jk} – długość łuku (j, k) [km], q_i – pojemność środka transportu przydzielonego do i -tej linii [pas.], λ_i – wskaźnik komfortu podróży na i -tej linii [-], q_l – pojemność l -tej zajezdni [poj.], P_{jkt} – potok pasażerów realizowany na łuku (j, k) w przedziale czasu t [pas./h], d_{il}^p – odległość pomiędzy l -tą zajezdnią i pierwszym przystankiem na i -tej linii transportowej [km], d_{il}^k – odległość pomiędzy l -tą zajezdnią i ostatnim przystankiem na i -tej linii transportowej [km], N – maksymalna liczba zajezdni w systemie transportowym

[–], r_{il} – liczba pojazdów niezbędnych do obsługi i -tej linii transportowej z l -tej zajezdni [poj.]; s – liczba godzin pracy systemu transportowego w ciągu doby [h/doba]; v_{it} – prędkość pojazdów na i -tej linii transportowej w przedziale czasu t , przy uwzględnieniu aktualnych warunków drogowych [km/h].

2.2.2. Funkcja celu

Funkcja celu w analizowanym problemie, stanowiąca modyfikację zapisu przedstawionego wcześniej przez autorów [7], została zapisana w postaci zależności (1), jako minimalizowana funkcja kosztowa C . Zestawienie zastosowanych oznaczeń, indeksów, parametrów i zmiennych decyzyjnych przedstawiono w rozdz. 2.2.1.

$$C(x_{ijk}, y_{ijkt}, z_l, p_{il}) = \left(\left(\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K d_{jk} \cdot \sum_{i=1}^I c_{ijk} \cdot x_{ijk} \cdot \sum_{t=1}^T y_{ijkt} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{s} \left(\sum_{l=1}^L z_l \cdot \sum_{i=1}^I p_{il} \cdot c_{il} \cdot (d_{il}^p + d_{il}^k) \cdot r_{il} \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} \right) \right); \left[\frac{zl}{h} \right] \quad (1)$$

Pierwsza składowa funkcji celu stanowi koszt realizacji przewozów pasażerskich na wyznaczonych liniach transportowych, drugi zaś jest kosztem pustych przebiegów pomiędzy wyznaczanymi lokalizacjami zajezdni a kształtowanymi liniami transportowymi. O ile pierwsza składowa jest kosztem zmiennym w czasie, zależnym od intensywności potoków pasażerskich w jednostce czasu, o tyle druga składowa jest kosztem stałym w skali doby (dojazd z i powrót do zajezdni). Z tego powodu, dla ujednoczenia jednostek obu składowych przyjęto przelicznik s , który pozwala na odniesienie kosztów dobowych do godzinowego przedziału czasu pracy systemu transportowego w ciągu doby.

2.2.3. Ograniczenia

Zbiór rozwiązań dopuszczalnych dla analizowanego problemu ustalony jest na podstawie następującego zestawu ograniczeń:

- całkowita pojemność środków transportowych oraz częstotliwość ich kursowania stanowią kluczowy wyróżnik obsługi pasażerów na poszczególnych łukach sieci (j, k) na l -tej linii transportowej,
- całkowita liczba zajezdni N w systemie transportowym jest ograniczona do jednej lokalizacji,
- wszystkie środki transportu w systemie transportowym (przydzielone do obsługi poszczególnych linii transportowych) muszą zostać przydzielone wyłącznie do dostępnych lokalizacji zajezdni,
- maksymalna liczba pojazdów przypisanej do obsługi i -tej linii transportowej jest zależna od częstotliwości kursowania, długości trasy i prędkości eksploatacyjnej w systemie transportu zbiorowego.

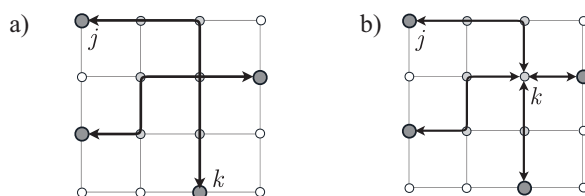
Zapis formalny poszczególnych ograniczeń został przedstawiony w pracy [7].

2.2.4. Generowanie zbioru linii transportowych

Zgodnie z przedstawionym wcześniej celem badawczym autorzy założyli, że cykl eksperymentów obliczeniowych zostanie przeprowadzony dla różnych sposobów generowania zbioru i -tych linii na grafie $G=\langle j, k \rangle$ systemu transportowego. W tym zakresie proponowane są następujące strategie generowania dwóch alternatywnych zbiorów linii:

- łączenia skrajnych przeciwległych węzłów sieci transportowej – typ ZLT1,
- łączenie skrajnego i wewnętrznego węzłów sieci transportowej – typ ZLT2.

Zaproponowane strategie generowania zbioru linii transportowych przedstawiono schematycznie na rys. 2, poniżej.



Rys. 2. Zasada tworzenia zbioru linii transportowych: a) typu ZLT1, b) typu ZLT2

3. EKSPERYMENTY OBLICZENIOWE

3.1. KLUCZOWE ZAŁOŻENIA

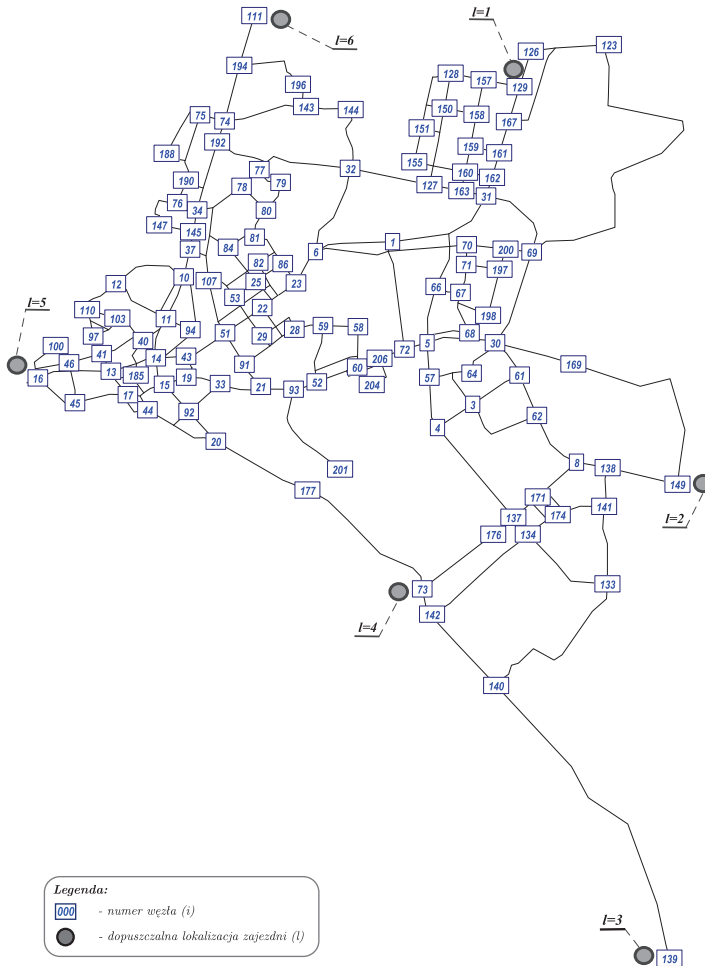
3.1.1. Charakterystyka analizowanej sieci transportowej i lokalizacji zajezdni

Poszukiwanie docelowego rozwiązania, tj. jednocześnie najkorzystniejszego układu linii transportowych oraz lokalizacji zajezdni zostało przeprowadzone dla przypadku testowej sieci transportowej, typowej dla miasta zamieszkałego przez ponad 60 tys. ludzi i obejmującego obszar ok. 47 km².

W przyjętej metodyce budowę modelu sieci (infrastruktury) transportowej przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzia PTV Visum, choć dostępny jest zestaw alternatywnych narzędzi tego rodzaju, jak np. Emme lub Aimsun. Analizę przydatności poszczególnych narzędzi, w tym również PTV Visum, autorzy pracy przedstawili w pracy [8].

Model sieci transportowej obejmuje 210 ponumerowanych węzłów (por. rys. 3) i 381 łuków (j, k); dla każdego z nich określono kluczowe parametry, takie jak: długość d_{jk} (wartości przedstawione w tab. 1) oraz przepustowość q_{jk} .

W związku z rozważaniami przedstawionymi w rozdz. 1.1, potencjalne (dopuszczalne) lokalizacje zajezdni wskazano poza ścisłym centrum analizowanego obszaru. Jest to sześć lokalizacji, oznaczonych odpowiednio jako $l = 1, 2, \dots, 6$ (por. rys. 3).



Rys. 3. Model analizowanej sieci transportowej

3.1.2. Parametry modelu matematycznego

W modelu optymalizacyjnym przyjęto zestaw parametrów i założeń przedstawionych w tab. 1.

Tab. 1

Zestawienie parametrów modelu optymalizacyjnego

| Parametr | | | Komentarz |
|------------|-------------|-------------------|--|
| Oznaczenie | Jednostka | Wartość | |
| c_{jk} | [zł/poj.km] | 5,2 | Koszt jednostkowy realizacji pracy przewozowej dla średniej wielkości operatora PTZ. |
| q_i | [pas.] | 105 | Całkowita pojemność przykładowego autobusu miejskiego – Solaris Urbino12. |
| s | [h/doba] | 18 | Czas pracy systemu transportowego. |
| v_{it} | [km/h] | 25 | Przeciętna wartość dla miast średniej wielkości. |
| d_{jk} | [km] | $d_{jk} = d_{kj}$ | Zakładana jest symetryczność przebiegu tras, a w związku z tym długość poszczególnych odcinków (j, k) oraz (k, j) jest identyczna. |
| N | [-] | 1 | Ograniczona liczba zajezdni w systemie transportowym. |

3.2. UZYSKANE REZULTATY**Krok 1 – Generowanie podróży**

Generowanie podróży przeprowadzono, podobnie jak w przypadku budowy modelu sieci transportowej, z zastosowaniem narzędzia PTV Visum. Dla tak zbudowanego wcześniej modelu infrastruktury transportowej wyznaczono 13 rejonów komunikacyjnych, dla których zostały określone wielkości potencjałów ruchotwórczych, tj. produkcji i atrakcji. Przebieg tego typu postępowania został szczegółowo przedstawiony w pracy autorów [1].

Krok 2 – Generowanie podróży

Na podstawie potencjałów ruchotwórczych, wyznaczonych w kroku 1, została zbudowana macierz podróży O-D (źródło – O, cel – D podróży) pomiędzy wszystkimi wyodrębnionymi rejonami komunikacyjnymi. W efekcie, dzięki określonej macierzy podróży oraz sparametryzowanemu modelowi sieci transportowej ustalono wstępne rozłożenie ruchu na sieć w jednostce czasu, tj. P_{jkt} oraz P_{kjt} . Fragment wynikowych potoków na sieci transportowej przedstawiono w tab. 2. Z uwagi na to, że jest to wstępne rozłożenie ruchu na sieci transportowej, jest on niezależne od ukształtowania zbioru linii transportowych (ZLT1 oraz ZLT2), które definiowane są w kolejnym kroku.

Krok 3.1 – Budowa układu linii komunikacyjnych

Kształtując podaż w zależności od stwierdzonych potrzeb przewozowych (bezpośrednim rezultatem jest wstępne rozłożenie ruchu na sieć transportową – krok 2), określane jest ukształtowanie linii transportowych. Na tym etapie budowano dwa alternatywne zbiory linii transportowych – ZLT1 i ZLT2, których strategia generowania została opisana w rozdziale 2.2.4 i polega na możliwie najkorzystniejszym zaspokojeniu popytu wyrażonego w postaci rozłożenia ruchu na sieć. Wygenerowany przebieg linii dla obu zbiorów został przedstawiony w tab. 3.

Tab. 2

Fragment roboczego rozłożenia potoków na sieć transportową

| Węzły | | Potok [pas./24h] | | d_{jk} [km] | Węzły | | Potok [pas./24h] | | d_{jk} [km] |
|-------|-----|---------------------|-----------|------------------|-------|-----|---------------------|-----------|------------------|
| j | k | P_{jkt} | P_{kjt} | | j | k | P_{jkt} | P_{kjt} | |
| 1 | 2 | 95 | 35 | 0,11 | 140 | 133 | 1143 | 720 | 1,61 |
| 1 | 6 | 811 | 889 | 0,80 | 140 | 139 | 2868 | 4439 | 3,31 |
| 1 | 115 | 816 | 799 | 0,58 | 140 | 142 | 2907 | 1662 | 0,98 |
| 2 | 6 | 851 | 931 | 0,74 | 141 | 133 | 480 | 645 | 0,80 |
| 3 | 62 | 1620 | 1675 | 0,87 | 141 | 138 | 1119 | 1021 | 0,40 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 70 | 71 | 614 | 600 | 0,20 | 207 | 52 | 1638 | 1731 | 0,32 |
| 70 | 116 | 913 | 894 | 0,17 | 207 | 60 | 639 | 639 | 0,11 |
| 70 | 200 | 280 | 313 | 0,40 | 208 | 207 | 999 | 1091 | 0,06 |
| 71 | 67 | 473 | 400 | 0,30 | 209 | 204 | 891 | 713 | 0,17 |
| 71 | 197 | 141 | 200 | 0,35 | 209 | 208 | 999 | 1091 | 0,17 |
| 72 | 2 | 42 | 173 | 1,02 | 209 | 210 | 201 | 286 | 0,20 |
| 72 | 5 | 2207 | 2260 | 0,24 | 210 | 205 | 536 | 333 | 0,15 |
| 72 | 206 | 2242 | 2057 | 0,28 | 210 | 206 | 73 | 360 | 0,06 |

Tab. 3

Alternatywne zbiory linii transportowych – ZLT1 oraz ZLT2

| ZLT1 | | | ZLT2 | | |
|---------------|--|----------------------|---------------|--|----------------------|
| Nr linii ċ | Linie (sekwencja węzłów) | Dł. linii [km] | Nr linii ċ | Linie (sekwencja węzłów) | Dł. linii [km] |
| 1 | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 10, 11, 118, 14, 15, 92, 20, 177, 73, 142, 140, 139 | 12,0 | 1a | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 10, 11, 118, 14, 15 | 4,0 |
| 2 | 149 , 138, 8, 62, 61, 30, 5, 72, 206, 60, 207, 52, 93, 21, 33, 19, 15, 18, 17, 45, 16, 122 | 8,0 | 1b | 15 , 92, 20, 177, 73, 142, 140, 139 | 8,0 |
| 3 | 111 , 194, 196, 143, 144, 32, 127, 163, 31, 69, 30, 61, 62, 8, 138, 149 | 8,3 | 3a | 111 , 194, 196, 143, 144, 32, 127, 163, 31 | 4,0 |
| 4 | 149 , 138, 8, 172, 171, 170, 137, 176, 73, 142, 140, 139 | 7,7 | 3b | 31 , 69, 30, 61, 62, 8, 138, 149 | 4,3 |
| 5 | 129 , 167, 161, 162, 31, 115, 1, 6, 23, 86, 85, 88, 87, 26, 22, 24, 51, 43, 181, 19, 15, 18, 17, 45, 16, 112 | 7,7 | 5a | 129 , 167, 161, 162, 31, 115, 1, 6 | 3,1 |
| 6 | 129 , 167, 161, 162, 31, 115, 116, 66, 56, 5, 57, 4, 137, 134, 133 | 6,2 | 5b | 6 , 23, 86, 85, 88, 27, 26, 22, 24, 51, 43, 181, 19, 15, 18, 17, 45, 16, 112 | 4,6 |
| 7 | 112 , 16, 45, 17, 18, 44, 101, 20, 177, 73, 176, 137, 170, 171, 172, 8, 138, 149 | 8,0 | 7a | 112 , 16, 45, 17, 18, 44, 101, 20, 177, 73 | 4,9 |

Tab. 3 (cd.)

| ZLT1 | | | ZLT2 | | |
|----------------|--|----------------------|----------------|---|----------------------|
| Nr linii #: | Linie (sekwencja węzłów) | Dł. linii [km] | Nr linii #: | Linie (sekwencja węzłów) | Dł. linii [km] |
| 8 | 139 , 140, 142, 73, 176, 137, 170, 171, 172, 8, 62, 61, 30, 5, 72, 206, 60, 207, 52, 93, 21, 33, 19, 15, 18, 17, 45, 16, 112 | 13,6 | 7b | 73 , 176, 137, 170, 171, 172, 8, 138, 149 | 3,1 |
| 9 | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 38, 107, 54, 51, 91, 21, 93, 52, 207, 60, 206, 72, 5, 30, 61, 62, 8, 138, 149 | 9,2 | 8a | 139 , 140, 142, 73, 176, 137, 170, 171, 172, 8 | 6,6 |
| 10 | 111 , 194, 196, 143, 144, 32, 127, 163, 31, 69, 30, 5, 72, 206, 60, 207, 52, 93, 21, 33, 19, 15, 18, 17, 45, 16, 112 | 11,2 | 8b | 8 , 62, 61, 30, 5, 72, 206, 60, 207, 52, 93, 21, 33, 19, 15, 18, 17, 45, 16, 112 | 7,0 |
| 11 | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 10, 11, 118, 14, 15, 18, 17, 45, 16, 112 | 5,9 | 9a | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 38, 107, 54, 51, 91, 21 | 4,2 |
| 12 | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 38, 107, 54, 51, 91, 21, 93, 52, 207, 60, 206, 72, 5, 57, 4, 137, 134, 133 | 9,3 | 9b | 21 , 93, 52, 207, 60, 206, 72, 5, 30, 61, 62, 8, 138, 149 | 5,1 |
| 13 | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 10, 11, 118, 14, 15, 92, 20, 177, 73, 176, 137, 170, 171, 172, 8, 138, 149 | 10,6 | 10a | 111 , 194, 196, 143, 144, 32, 127, 163, 31, 69, 30 | 5,8 |
| 14 | 129 , 167, 161, 162, 31, 69, 30, 61, 62, 8, 138, 149 | 5,5 | 10b | 30 , 5, 72, 206, 60, 207, 52, 93, 21, 33, 19, 15, 18, 17, 45, 16, 112 | 5,4 |
| 15 | 129 , 167, 161, 162, 31, 115, 116, 66, 56, 5, 57, 4, 137, 176, 73, 142, 140, 139 | 10,7 | 12a | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 38, 107, 54, 51, 91, 21, 93, 52, 207, 60, 206, 72, 5 | 6,0 |
| 16 | 129 , 167, 161, 162, 31, 69, 30, 5, 57, 4, 137, 176, 73, 142, 140, 139 | 11,5 | 12b | 5 , 57, 4, 137, 134, 133 | 3,3 |
| 17 | 112 , 16, 45, 17, 18, 15, 19, 33, 21, 93, 52, 207, 60, 206, 72, 5, 57, 4, 137, 134, 133 | 8,0 | 15a | 129 , 167, 161, 162, 31, 115, 116, 66, 56, 5 | 2,9 |
| 18 | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 38, 107, 54, 51, 43, 181, 19, 15, 92, 20, 177, 73, 142, 140, 139 | 12,5 | 16a | 129 , 167, 161, 162, 31, 69, 30 | 2,9 |
| 19 | 30 , 5, 72, 206, 60, 207, 52, 93, 21, 33, 19, 15, 92, 20, 177, 73, 142, 140, 139 | 11,6 | 16b | 30 , 5, 57, 4, 137, 176, 73, 142, 140, 139 | 8,6 |
| 20 | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 38, 107, 54, 51, 91, 21, 93, 52, 207, 60, 206, 72, 5, 30 | 6,7 | 21a | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 38, 107, 54, 51, 24, 22, 26, 27, 88, 85, 86, 23, 6, 1, 115, 116, 66, 56, 5 | 7,8 |
| 21 | 111 , 194, 74, 192, 191, 34, 145, 37, 38, 107, 54, 51, 24, 22, 26, 27, 88, 85, 86, 23, 6, 1, 115, 116, 66, 56, 5, 30, 61, 62, 8, 172, 171, 170, 137, 176, 73 | 12,1 | 21b | 5 , 30, 61, 62, 8, 172, 171, 170, 137, 176, 73 | 4,3 |
| 22 | 129 , 167, 161, 162, 31, 69, 30, 61, 62, 8, 172, 171, 170, 137, 176, 73 | 6,5 | 22b | 30 , 61, 62, 8, 172, 171, 170, 137, 176, 73 | 3,6 |
| 23 | 30 , 5, 56, 66, 116, 115, 1, 6, 23, 86, 85, 88, 27, 26, 22, 24, 51, 43, 181, 19, 15, 92, 20, 177, 73, 176, 137, 170, 171, 172, 8, 138, 149 | 12,5 | 24a | 129 , 167, 161, 162, 31, 115, 1, 6, 23, 86, 85, 88, 27, 26, 22, 24, 51, 43, 181, 19, 15 | 5,8 |
| 24 | 129 , 167, 161, 162, 31, 115, 1, 6, 23, 86, 85, 88, 27, 26, 22, 24, 51, 43, 181, 19, 15, 92, 20, 177, 73, 176, 137, 170, 171, 172, 8, 138, 149 | 12,4 | 24b | 15 , 92, 20, 177, 73, 176, 137, 170, 171, 172, 8, 138, 149 | 6,6 |

Odległości pomiędzy poszczególnymi liniami, a zbiorem rozważanych lokalizacji zajezdni, $l = 1, 2, \dots, 6$, przedstawiono w tab. 4.

Tab. 4

Odległości pomiędzy liniami a lokalizacjami zajezdni, dla ZLT1 i ZLT2

| | | ZLT1 | | | | | | | | ZLT2 | | | | | |
|----------|---|---|------|------|------|------|------|----------|---|---|------|-------|------|------|------|
| Nr linii | Ł | Odległość* pomiędzy węzłem linii a lokalizacją l -tej zajezdni [km] | | | | | | Nr linii | Ł | Odległość* pomiędzy węzłem linii a lokalizacją l -tej zajezdni [km] | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | | 3,98 | 3,12 | 0,25 | 0,25 | 1,84 | 0,25 | 1a | | 3,98 | 6,08 | 8,04 | 3,48 | 1,84 | 0,25 |
| 2 | | 2,85 | 0,25 | 6,62 | 2,06 | 0,25 | 3,97 | 1b | | 5,26 | 3,12 | 0,25 | 0,25 | 1,84 | 3,97 |
| 3 | | 1,2 | 0,25 | 6,62 | 2,06 | 5,36 | 0,25 | 3a | | 4,39 | 4,32 | 9,54 | 4,98 | 6,34 | 0,25 |
| 4 | | 4,43 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 4,91 | 7,45 | 3b | | 4,39 | 0,25 | 6,62 | 2,06 | 5,36 | 4,01 |
| 5 | | 0,25 | 4,43 | 8,04 | 3,48 | 0,25 | 3,97 | 5a | | 0,25 | 4,32 | 10,72 | 5,42 | 4,52 | 3,51 |
| 6 | | 0,25 | 1,93 | 5,75 | 1,19 | 4,64 | 4,01 | 5b | | 3,1 | 4,43 | 8,04 | 2,74 | 0,25 | 3,97 |
| 7 | | 4,43 | 0,25 | 4,56 | 0,25 | 0,25 | 4,26 | 7a | | 5,26 | 3,12 | 4,56 | 0,25 | 0,25 | 3,97 |
| 8 | | 2,85 | 1,06 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 3,97 | 7b | | 4,43 | 0,25 | 4,56 | 0,25 | 2,76 | 7,36 |
| 9 | | 3,98 | 0,25 | 6,62 | 2,06 | 2,85 | 0,25 | 8a | | 4,43 | 1,06 | 0,25 | 0,25 | 2,76 | 7,36 |
| 10 | | 1,18 | 2,56 | 8,12 | 3,56 | 0,25 | 0,25 | 8b | | 2,93 | 1,06 | 6,62 | 2,74 | 0,25 | 3,97 |
| 11 | | 3,98 | 6,08 | 8,04 | 3,48 | 0,25 | 0,25 | 9a | | 3,98 | 3,28 | 7,84 | 3,16 | 2,85 | 0,25 |
| 12 | | 3,98 | 1,93 | 5,75 | 1,19 | 2,85 | 0,25 | 9b | | 2,93 | 0,25 | 6,62 | 3,16 | 2,85 | 4,15 |
| 13 | | 3,98 | 0,25 | 4,56 | 0,25 | 1,84 | 0,25 | 10a | | 4,39 | 2,56 | 8,12 | 3,56 | 5,36 | 0,25 |
| 14 | | 0,25 | 0,25 | 6,62 | 2,06 | 5,36 | 4,01 | 10b | | 2,93 | 2,56 | 7,84 | 2,74 | 0,25 | 3,97 |
| 15 | | 0,25 | 1,93 | 0,25 | 0,25 | 4,64 | 4,01 | 12a | | 2,87 | 3,28 | 7,84 | 3,28 | 2,85 | 0,25 |
| 16 | | 0,25 | 1,93 | 5,75 | 1,19 | 4,64 | 4,01 | 12b | | 2,87 | 1,93 | 5,75 | 1,19 | 4,64 | 5,95 |
| 17 | | 2,87 | 1,93 | 5,75 | 1,19 | 0,25 | 3,97 | 15a | | 0,25 | 3,28 | 7,84 | 3,28 | 4,64 | 4,01 |
| 18 | | 3,98 | 3,12 | 0,25 | 0,25 | 1,84 | 0,25 | 16a | | 0,25 | 2,56 | 8,12 | 3,56 | 5,36 | 4,01 |
| 19 | | 2,87 | 2,56 | 0,25 | 0,25 | 1,84 | 3,97 | 16b | | 2,98 | 1,93 | 5,75 | 1,19 | 4,64 | 5,95 |
| 20 | | 2,87 | 2,56 | 8,12 | 3,56 | 2,85 | 0,25 | 21a | | 1,72 | 3,28 | 7,84 | 3,28 | 3,32 | 0,25 |
| 21 | | 1,72 | 1,06 | 4,56 | 0,25 | 2,76 | 0,25 | 21b | | 2,87 | 1,06 | 4,56 | 0,25 | 2,76 | 5,95 |
| 22 | | 0,25 | 1,06 | 4,56 | 0,25 | 5,36 | 4,01 | 22b | | 2,93 | 1,06 | 4,56 | 0,25 | 2,76 | 7,36 |
| 23 | | 1,72 | 0,25 | 4,56 | 0,25 | 1,84 | 3,97 | 24a | | 0,25 | 4,32 | 8,04 | 2,74 | 1,84 | 3,51 |
| 24 | | 0,25 | 0,25 | 4,56 | 0,25 | 1,84 | 3,97 | 24b | | 4,43 | 0,25 | 4,56 | 0,25 | 1,84 | 3,97 |

* - najkrótsza trasa na zdefiniowanej sieci transportowej

Krok 3.2 i 3.3 – Przydział taboru do linii oraz do zajezdni

W procedurze optymalizacyjnej wybór przebiegu linii transportowych mogących zaspokoić zapotrzebowanie na przewozy pasażerskie (wynikające ze wstępnego rozłożenia ruchu na sieć transportową), ustalany jest wspólnie z liczebnością pojazdów (wielkością floty) na każdej z linii. Z uwagi na ograniczoną objętość artykułu syntetyczne zestawienie linii, liczby pojazdów niezbędnych do ich obsługi oraz wynikowa wartość funkcji celu, zostały przedstawione w tab. 5.

Tab. 5

Zestawienie rezultatów optymalizacji dla ZLT1 i ZLT2

| Rezultaty | jedn. | ZLT1 | | | ZLT2 | | |
|-----------------------|--------|--|--|--|---|--|---|
| | | $\lambda_i = 0,7$ [-] | $\lambda_i = 0,75$ [-] | $\lambda_i = 0,8$ [-] | $\lambda_i = 0,7$ [-] | $\lambda_i = 0,75$ [-] | $\lambda_i = 0,8$ [-] |
| Linie | | | | | | | |
| liczba | [szt.] | 14 | 15 | 16 | 18 | 19 | 20 |
| numery i : | [-] | {1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 18, 21, 23} | {1, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 18, 20, 21, 23} | {1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 18, 21, 23, 24} | {1a, 1b, 3a, 3b, 5b, 7a, 7b, 8a, 8b, 9a, 9b, 10a, 10b, 12b, 15a, 16b, 21a, 24a} | {1a, 1b, 3b, 5b, 7a, 7b, 8a, 8b, 9a, 9b, 10a, 10b, 12a, 12b, 15a, 16b, 22b, 24a, 24b} | {1a, 1b, 3a, 3b, 5b, 7a, 7b, 8a, 8b, 9a, 9b, 10a, 12a, 12b, 15a, 16b, 21a, 22b, 24a, 24b} |
| Flota | [poj.] | 72 | 75 | 68 | 78 | 78 | 71 |
| Liczba kursów | [szt.] | 173 | 159 | 148 | 305 | 305 | 268 |
| Lokal. zajezdni l : | [-] | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Funkcja celu C | [zł/h] | 18 051 | 16 785 | 15 785 | 18 047 | 17 596 | 16 100 |

Krok 4 – Podział zadań przewozowych

W ramach tego kroku wyznaczono udział poszczególnych podróży realizowanych z wykorzystaniem środków transportu zbiorowego i indywidualnego. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o czas podróży pomiędzy poszczególnymi rejonami komunikacyjnymi, ściśle związany z parametrami strony podaźowej, tj. infrastruktury transportowej, częstotliwości kursowania transportu zbiorowego i warunki ruchu drogowego.

Rezultatem tego kroku jest podział macierzy podróży O-D na dwie rozłączne dla środków transportu zbiorowego i indywidualnego. W analizowanym przypadku udziały te wyniosły odpowiednio: 42 i 58%.

Krok 5 – Rozkład ruchu na sieć

Na podstawie ustalonego podziału zadań przewozowych przeprowadzono dopasowanie popytu do podaży w analizowanej sieci transportowej. Zważywszy, że przy roboczym rozkładzie ruchu na sieć (krok 2) podział zadań przewozowych nie był możliwy, na tym etapie konieczne jest dokonanie ponownego rozkładu ruchu i wyznaczenia układu linii oraz lokalizacji zajezdni – uwzględniających podział modalny przyjęty w kroku 4.

W rezultacie, w tab. 6 przedstawiono fragment rozkładu ruchu na sieć transportową, z uwzględnieniem podziału modalnego. Wartości przedstawione w tab. 6 dotyczą porannego szczytu komunikacyjnego (pomiędzy 7:00 a 8:00), co stanowi ok. 12,9% dobowego potoku ruchu dla transportu zbiorowego.

Na podstawie kolejnej iteracji rozłożenia ruchu na sieć transportową, przedstawionego w tab. 5, przeprowadzono ponowną optymalizację ukształtowania linii transportowych i lokalizacji zajezdni. Uwzględniono przy tym zarówno dwa alternatywne zbiory potencjalnych linii transportowych (ZLT1 oraz ZLT2), jak również zróżnicowany wskaźnik komfortu podróży, $\lambda_i = 0,7; 0,75; 0,8$. Uzyskane rezultaty zestawiono syntetycznie w tab. 7.

Tab. 6

Fragment godzinowego rozłożenia potoku na sieć transportową w trakcie porannego szczytu komunikacyjnego (7:00-8:00) dla transportu zbiorowego

| Węzły | | Potok przy ZLT1 [pas./h] | | | | | | Potok przy ZLT2 [pas./h] | | | | | |
|----------|----------|--------------------------|-----------|------------------------|-----------|-----------------------|-----------|--------------------------|-----------|------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| <i>j</i> | <i>k</i> | $\lambda_i = 0,7$ [-] | | $\lambda_i = 0,75$ [-] | | $\lambda_i = 0,8$ [-] | | $\lambda_i = 0,7$ [-] | | $\lambda_i = 0,75$ [-] | | $\lambda_i = 0,8$ [-] | |
| | | P_{jkt} | P_{kjt} | P_{jkt} | P_{kjt} | P_{jkt} | P_{kjt} | P_{jkt} | P_{kjt} | P_{jkt} | P_{kjt} | P_{jkt} | P_{kjt} |
| 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 6 | 54 | 62 | 53 | 58 | 54 | 62 | 60 | 57 | 47 | 42 | 49 | 51 |
| 1 | 11 | 62 | 54 | 58 | 53 | 54 | 54 | 57 | 60 | 42 | 47 | 51 | 49 |
| | 5 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 62 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 140 | 13 | 125 | 196 | 125 | 196 | 125 | 196 | 121 | 187 | 121 | 188 | 122 | 189 |
| | 9 | | | | | | | | | | | | |
| 140 | 14 | 180 | 105 | 180 | 105 | 180 | 105 | 172 | 101 | 172 | 102 | 173 | 103 |
| | 2 | | | | | | | | | | | | |
| 141 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | | | | | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 210 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 9 | | | | | | | | | | | | |

Tab. 7

Zestawienie rezultatów dla obu analizowanych zbiorów linii transportowych ZLT1 i ZLT2

| Rezultaty | jedn. | ZLT1 | | | ZLT2 | | |
|------------------------------------|--------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--|-------------------------------------|------------------------------------|
| | | $\lambda_i = 0,7$ [-] | $\lambda_i = 0,75$ [-] | $\lambda_i = 0,8$ [-] | $\lambda_i = 0,7$ [-] | $\lambda_i = 0,75$ [-] | $\lambda_i = 0,8$ [-] |
| Linie transportowe | | | | | | | |
| liczba | [szt.] | 8 | 8 | 9 | 9 | 8 | 8 |
| numery <i>l</i> | [-] | {3, 7, 9, 10, 11, 15, 18, 24} | {3, 7, 8, 11, 12, 15, 18, 23} | {3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 18, 24} | {1a, 1b, 3a, 3b, 5a, 7a, 9b, 15a, 24a} | {1a, 3a, 5a, 7a, 9b, 15a, 16b, 24a} | {1a, 3a, 5a, 7a, 8b, 9b, 12a, 21b} |
| Flota (suma <i>r_i</i>) | [poj.] | 11 | 10 | 10 | 11 | 10 | 10 |
| Liczba kursów (suma ν_{ijk}) | [szt.] | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 10 |
| Lokaliz. zajezdni <i>l</i> | [-] | 4 | 4 | 4 | 2 | 4 | 6 |
| Funkcja celu <i>C</i> | [zł/h] | 1 222 | 1 177 | 1 125 | 1 226 | 1 222 | 1 211 |

Porównanie wyników eksperymentów na tym etapie dowodzi znaczącego wpływu obu analizowanych elementów metodyki na generowany rezultat. O ile funkcja celu oraz liczba linii transportowych w każdym z analizowanych przypadków jest na zbliżonym poziomie, tj. dla funkcji celu (1 177 – 1 226 [zł/h]), przy 8-9 liniach transportowych i 10-11 [poj.] do

ich obsługi, o tyle przebieg poszczególnych linii oraz lokalizacja zajezdni różnią się znacząco pomiędzy ZLT1 i ZLT2. Dla ZLT1 wskazywana jest lokalizacja zajezdni dla $l = 4$, a częścią wspólną zbioru linii są cztery przebiegi linii, tj. $i = \{3, 7, 11, 18\}$. W przypadku ZLT2, w każdym z trzech rozważanych przypadków komfortu podróży (λ_i) wskazywane są różne lokalizacje zajezdni, tj. $l = \{2, 4, 6\}$, a częścią wspólną zbioru linii jest 5 z 8-9 przebiegów linii, tj. $i = \{1a, 3a, 5a, 7a, 9b\}$.

Krok 6 – Kalibracja modelu ruchu

Ostatnim krokiem metodyki jest przeprowadzenie kalibracji modelu ruchu, przy czym kalibracja prowadzona jest w oparciu o pomiary rzeczywistych potoków. Z uwagi na fakt, że zastosowanie zaproponowanej metodyki przeprowadzono dla testowej sieci transportowej, kalibracja nie była możliwa.

Według przyjętej metodyki, po kalibracji możliwe jest przeprowadzenie kolejnych iteracji rozłożenia ruchu na sieć oraz optymalizacji obu problemów decyzyjnych, aż do uzyskania satysfakcjonującego stopnia kalibracji modelu.

4. PODSUMOWANIE

Problem poruszany w pracy dotyczy równoczesnego rozwiązania problemu ustalenia przebiegu linii transportowych oraz wyznaczenia lokalizacji zajezdni w systemie transportowym miasta. Procedura rozwiązania tak postawionego problemu wykorzystuje efekt synergii pomiędzy makroskopowym modelowaniem ruchu i technikami optymalizacji. W publikacji przedstawiono ocenę wpływu wybranych dwóch elementów tej metodyki na rozwiązanie problemu decyzyjnego, tj. strategii generowania zbioru linii transportowych oraz komfortu podróży, rozumianego jako stopień zapelnienia dostępnej pojemności środków transportu.

W rezultacie przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych stwierdzono znaczącą zależność pomiędzy strategią generowania zbioru linii transportowych a wskazywaną lokalizacją zajezdni, w szczególności:

- dla zbioru ZLT1, charakteryzującego się przebiegiem linii będących połączeniem skrajnych węzłów początkowych i końcowych (trasy charakteryzują się znaczną długością; zakres zmienności długości: 5,5-13,6 km), wybór lokalizacji zajezdni jest jednoznaczny ($l = 4$);
- dla zbioru ZLT2, którego trasy stanowią połączenie skrajnego węzła początkowego i węzła znajdującego się wewnątrz sieci (trasy zdecydowanie krótsze względem ZLT1; zakres zmienności długości: 2,9-8,0 km), wybór lokalizacji zajezdni jest silnie uzależniony od wybranego podzbioru linii, np. dla $i = (1a, 1b, 3a, 3b, 5a, 7a, 9b, 15a, 24a) \rightarrow l = 2$, natomiast dla $i = (1a, 3a, 5a, 7a, 8b, 9b, 12a, 21b) \rightarrow l = 6$.

Można zatem stwierdzić, że w przyjętej metodyce postępowania istnieje znacząca zależność pomiędzy sposobem kształtowania linii transportowych (ich przebiegiem na sieci transportowej), a lokalizacją zajezdni.

Dalsze prace badawcze, poza obszarem wytyczonym w autorskiej publikacji [7], zmie-

rzają w stronę rozbudowy modelu optymalizacyjnego o zróżnicowaną wielkość środków transportowych, a zatem wspólne rozwiązanie problemu wyznaczenia przebiegu linii, lokalizacji zajezdni oraz kompozycji taboru.

Bibliografia

1. Bieńczyk M., Fierek S., Kiciński M., Sawicki P.: Regionalne plany zrównoważonego rozwoju publicznego transportu zbiorowego w lokalnym transporcie publicznym. W: Krych A. (red.), Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego. Celowość, efektywność i skuteczność projektu transportowego. Logika interwencji. Materiały X Poznańskiej Konferencji Naukowo-Technicznej SITK. Rosnówko 17-19 czerwca 2015, 195-205.
2. Cancela H., Mauttone A., Urquhart M.E.: Mathematical programming formulations for transit network design. *Transportation Research Part B*, 2015, 77, 17-37.
3. Ceder A.: *Public Transit Planning and Operation: Theory, Modelling and Practice*. Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd, Oxford, 2007.
4. Eberlein, X.J., Wilson, N.H.M., Barnhart, C., Bernstein, D.: The Real-Time Deadheading Problem in Transit Operations Control. *Transportation Research - Part B: Methodological*, 1998, 32(2), 77-100.
5. Kupka P., Sawicki P.: Optymalizacja lokalizacji zajezdni tramwajowej w systemie komunikacji miejskiej. *Logistyka*, 2015, 2, 462-472.
6. Lowmes N., Machemehl R. B.: Exact and heuristic methods for public transit circulator design. *Transportation Research Part B*, 2010, 44 (2), 309-318.
7. Sawicki P., Fierek S.: Mixed Public Transport Lines Construction and Vehicle's Depots Location Problems. W: Macioszek E., Sierpiński G., (Eds.), *Recent Advances in Traffic Engineering and Transport Networks and Systems. TSTP 2017, Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, 2018, 21, 213-224.
8. Sawicki P., Kiciński M., Fierek S.: Selection of the most adequate trip-modelling tool for an integrated transport planning system. *The Archives of Transport*, 2016, 37(1), 55-66.
9. Sawicki P., Kupka P.: Ustalenie lokalizacji zajezdni tramwajowej w systemie komunikacji miejskiej z zastosowaniem metody wspomaganie decyzji. *Transport Miejski i Regionalny*, 2016, 6, 6-11.
10. Schöbel A.: Line planning in public transportation: models and methods. *OR Spectrum*, 2012, 34, 491-510.
11. Szeto W.Y., Wu Y.: A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong. *European Journal of Operational Research*, 2011, 209 (2), 141-155.

THE PUBLIC TRANSPORT LINES CONSTRUCTION AND VEHICLE'S DEPOTS LOCATION MIXED PROBLEM

Summary: The paper deals with the problem of simultaneous consideration of two decision problems related to the public transport system, i.e. line routes construction and decision on vehicle's depots location in the public transport system. It is assumed that the location of depots in the transport system is not only related to the current configuration of the transportation lines, but it also interacts each other in order to minimize the total cost of fleet operating. Thus, the cost function results from both, line service and empty routes between depots and transport lines. The paper is a developed research of the previous works and is focused on the assessment of the methodological issues of two components, i.e. a) generation of the set of transport lines, and b) traveling comfort. As a result of the work, it was found that both those elements have a significant influence on the level of generated solution.

Keywords: Public transport, Transport lines design, Depots location, Traveling comfort