

Szymon Fierek, Hanna Sawicka, Piotr Sawicki

Politechnika Poznańska, Zakład Systemów Transportowych

WPLYW ZMIAN HARMONOGRAMU PRACY TRANSPORTU ZBIOROWEGO NA PODZIAŁ ZADAŃ PRZEWOZOWYCH

Rękopis dostarczono: maj 2018

Streszczenie: Artykuł dotyczy badania wpływu ukształtowania rozkładów jazdy transportu zbiorowego na podział zadań przewozowych odzwierciedlanych na etapie budowy modelu podróży. Typowym kryterium wyboru środka transportu w tego typu modelach jest czas podróży, który w odniesieniu do transportu indywidualnego wynika przede wszystkim z parametrów infrastruktury oraz stopnia zatłoczenia, łącznie determinujących warunki ruchu w całym modelu. W przypadku transportu zbiorowego czas podróży jest pochodną rozkładu jazdy (lub planowej częstotliwości kursowania), opracowanego przez operatora i odzwierciedlonego w modelu. W konsekwencji, taki sposób modelowania uniezależnia czas przejazdu transportem zbiorowym od natężenia ruchu odwzorowanego w modelu. Autorzy artykułu podjęli się więc przeprowadzenia badań pilotażowych. Zaproponowali w tym zakresie zależność pomiędzy akceptowalną zmianą warunków ruchu w modelu podróży, a dopuszczalną różnicą czasu przejazdu poszczególnymi odcinkami sieci dla transportu indywidualnego i zbiorowego. Na tej podstawie sformułowano pojęcie stabilnego podziału zadań przewozowych, co zostało zobrazowane na przykładzie testowego modelu podróży.

Słowa kluczowe: transport zbiorowy, modelowanie podróży, stabilny podział zadań przewozowych.

1. WPROWADZENIE

1.1. PROCES MODELOWANIA PODRÓŻY

Modelowanie podróży jest procesem leżącym u podstaw planowania i strategicznego zarządzania systemem transportowym. Podstawą takiego działania jest przygotowanie i właściwe zastosowanie *modelu podróży*, który stanowi obraz przemieszczeń mieszkańców analizowanego obszaru. W sensie formalnym model podróży stanowi opis związków zachodzących między komponentami struktury podażowej (głównie infrastruktury i taboru) i popytowej (głównie potrzeb transportowych) oraz jego otoczenia [1, 8, 11].

W pracy [22] dokonano przeglądu stosowanych obecnie narzędzi modelowania podróży, takich jak: Aimsun, Cube, Emme, Minerva, TransCAD oraz Visum, które z punktu widzenia ich funkcjonalności dobierane są do specyficznych zadań planistycznych w ob-

szarze systemów transportowych. W praktyce, z uwagi na dominację na polskim rynku oprogramowania Visum (produkcji PTV Group GmbH), a przede wszystkim z uwagi na duże doświadczenie, najczęściej stosowaną procedurą budowy modelu podróży jest podejście *czterostadiowe* [26]. Model taki powstaje w wyniku czterech następujących po sobie faz (stadiów), do których zalicza się: generację podróży (f_1), przestrzenny rozkład podróży (f_2), podział zadań przewozowych (f_3) oraz rozkład ruchu na sieć transportową (f_4).

W ramach f_1 (generowanie podróży) definiowane są potencjały ruchotwórcze, odwzorowujące całkowite wielkości podróży mających swoje źródła oraz cele, przypisane do określonych rejonów komunikacyjnych. W f_2 (przestrzenny rozkład podróży) następuje rozdział wszystkich podróży realizowanych w danym obszarze pomiędzy pary rejonów: źródłowy i docelowy, a w efekcie uzyskuje się macierz podróży: źródło-cel. W ramach f_3 (podział zadań przewozowych), wyznaczany jest udział podróży realizowanych za pomocą różnych środków transportowych w ogólnej liczbie podróży wykonywanych w danym obszarze. Ostatnia faza f_4 (rozkład ruchu na sieć transportową), stanowi konfrontację popytu i podaży. Jej efektem jest wolumen potoków ruchu na poszczególnych łukach sieci transportowej [1, 26].

Pierwsze trzy fazy (od f_1 do f_3), stanowią podstawy kształtowania modelu popytu, a więc opisują potrzeby transportowe realizowane w wyodrębnionej jednostce terytorialnej, podzielonej na zawarte w jej granicach obszary - rejon komunikacyjny i wydzielone w jej granicach układy transportowe. Wiedza o każdej z tych składowych jest najczęściej pochodną badań i obserwacji. Popyt rozpoznawany jest w oparciu o badania motywacji podróży i weryfikowany badaniami napełnień środków transportowych czy pomiarami natężenia ruchu. Podaż, w przypadku transportu zbiorowego to głównie odzwierciedlenie układu linii i rozkładów jazdy regularnego transportu zbiorowego, które ustalane są przez operatora i organizatora przewozów i bazują głównie na obserwacji napełnień.

W sytuacji odzwierciedlania obecnego stanu systemu transportowego i realizowanych podróży, połączenie obu tych informacji jest zabiegiem celowym, jednakże w zakresie prac planistycznych, których podstawą staje się w naturalny sposób zweryfikowany (skalibrowany) model podróży, rodzi to określone zagrożenia i konsekwencje. Podział zadań przewozowych odbywa się w oparciu o ukształtowane w procesie modelowania funkcje, które pozwalają wyodrębnić podróże realizowane transportem zbiorowy i indywidualnym. O ile zmiana warunków wejściowych, tj. istotne zmiany w popycie i znane przyszłe parametry infrastruktury transportowej pozwolą ustalić nowe warunki dla modelu podróży, o tyle strona podażyowa w zakresie harmonogramu pracy transportu zbiorowego wymaga ponownego zaplanowania i jego aplikacji do modelu. W tym jednak zakresie model podróży zakłada niezależność ruchu dla transportu indywidualnego i zbiorowego, a zatem brak jest możliwości weryfikacji, czy wraz ze zmianą warunków ruchu, głównie po stronie transportu indywidualnego, wykonanie zadań przewozowych przez transport zbiorowy jest możliwe zgodnie z przyjętym harmonogramem, czy też nie.

1.2. STAN WIEDZY W ZAKRESIE MODELOWANIA PODZIAŁU ZADAŃ PRZEWOZOWYCH

W literaturze wyróżniane są cztery podstawowe klasy modelowania podziału zadań przewozowych, w tym modele związane z:

- zachowaniem podróźnych (behawioralne) [4, 10, 25],
- stopniem zróżnicowania środków transportu (celu podróży, ścieżki prowadzącej do celu, modele łączące wcześniejsze podejścia) [7, 10, 25],
- podziałem na strefy, w których są realizowane podróże (modele zagregowane i niezagregowane) [25],
- złożonością modelowanych systemów i rodzajem danych – deterministyczne, stochastyczne (modele analityczne i symulacyjne) [13, 25].

Modelowanie podziału zadań przewozowych jest z jednej strony uznawane za jedno z najmniej złożonych zadań, z uwagi na ograniczoną do kilku, liczbę możliwych środków transportu do wyboru przez podróźnych [18]. Z drugiej jednak strony, istotną trudność przy formułowaniu modelu stanowi identyfikacja czynników wpływających na decyzję dotyczącą wyboru środka [6]. Modelowanie podziału zadań przewozowych jest zatem ściśle związane z zachowaniem podróźnych [3, 4, 6, 18]. Badania behawioralne prowadzone w tym zakresie dotyczą takich aspektów, jak [4, 7]: modelowanie podróży do pracy, na zakupy lub w innych celach. Obserwowane są zachowania podróźnych, na podstawie których wnioskowanie dotyczy przyczyn podjętych decyzji dotyczących wyboru środków transportu, a nie badań statystycznych.

Modele *zachowań podróźnych* prezentowane w literaturze mające charakter dyskretnej [4, 6]. Wyrażają one stopień atrakcyjności podróży, określany indywidualnie dla każdego z rozważanych środków transportu, poprzez zbiór kryteriów oceny, np.: dla pojazdów osobowych jest to sieć dróg, dostępne miejsca parkingowe, koszt parkowania, czas jazdy; a dla transportu zbiorowego jest to dostępność, sieć połączeń, częstotliwość połączeń, czas jazdy, itp.

W modelach *różnicujących środki transportu* [18], autorzy odnoszą się do celu podróży (ang. trip-end model), np.: region, miasto, budynek, lub ścieżki prowadzącej do celu. W pierwszym przypadku liczba potencjalnych scenariuszy wyboru środków podróży jest relatywnie niewielka. Są one określane po zamodelowaniu trasy przejazdu, a na wybór środka transportu mają wpływ takie elementy, jak: dochód, gęstość zabudowy, dostęp do transportu zbiorowego oraz posiadania samochodu [25]. Nie są zatem wrażliwe na zmiany w polityce transportowej miasta, np.: zwiększenie częstotliwości kursowania środków transportu zbiorowego. Z kolei modele wyboru ścieżki prowadzącej do celu (ang. trip-change model) uznawane są za bardzo złożone. Wynika to z liczby tras możliwych do realizacji, w szczególności w przypadku miejskich sieci transportowych, które są zazwyczaj silnie zróżnicowane [3]. Model tego typu jest tworzony przed przestrzennym rozkładem podróży, ale po fazie generacji podróży. Podział zadań przewozowych następuje w oparciu o atrakcyjność transportu zbiorowego względem indywidualnego, rozpatrywaną przy każdej zmianie pomiędzy strefami. Odsetek pasażerów, którzy skorzystają z transportu zbiorowego jest najczęściej szacowany na podstawie czasu i kosztów podróży [25] lub prawdopodobieństwa wyboru danego środka podróży [7]. W pierwszym przypadku, czas

podróży jest mierzony jako rzeczywisty czas od momentu rozpoczęcia podróży do jej zakończenia lub jako łączny czas spędzony w środkach transportu. Zazwyczaj jest on przekształcany do postaci kosztowej, obejmującej: zużycia paliwa, opłaty drogowe oraz parkingowe [25]. Model odzwierciedlający prawdopodobieństwo wyboru ścieżki prowadzącej do celu jest przedstawiany w postaci funkcji użyteczności wyrażonej jako regresja logistyczna (model logitowy) lub regresja probitowa (model probitowy) [7]. Ponadto, w literaturze prezentowane są atrybuty mające wpływ na wybór środka podróży, zależne od: podróżnego (np.: wiek, płeć, dochody, wielkości gospodarstwa domowego), środka podróży lub wariantu podróży (np.: koszty transportu, czas transportu, liczba przesiadek), kontekstu podróży lub jej powód (np.: podróż dom-praca, liczba dostępnych miejsc parkingowych), relacji pomiędzy podróżnym, środkiem transportu i celem podróży (np.: koszt podróży odniesiony do przychodu gospodarstwa domowego) [7].

W literaturze prezentowane są także inne podejścia do modelowania podziału zadań przewozowych, np.: model łączący w/w modele celu podróży i ścieżki prowadzącej do celu, tj. trip-interchange model. Zakłada on wykorzystanie podejścia odnoszącego się do celu podróży (ang. trip-end model) dla oszacowania liczby podróżnych nie posiadających dostępu do pojazdów i dodaniu ich do grupy osób podróżujących środkami transportu zbiorowego. Następnie, liczba podróżnych mających wybór pomiędzy środkami transportu publicznego i prywatnego jest szacowana w oparciu o model ścieżki prowadzącej do celu (ang. trip-change model) [25].

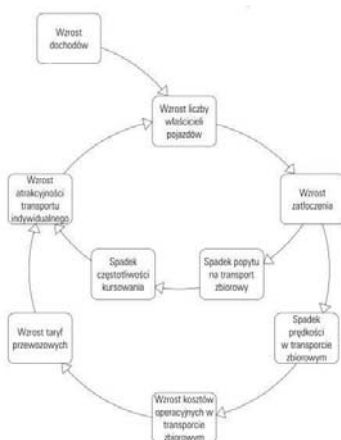
W klasycznym podejściu do modelowania podziału zadań przewozowych uwzględniany jest *podział na strefy*, w których są realizowane podróże (modele zagregowane) [25]. Badania są prowadzone w odniesieniu do gospodarstwa domowego w danej strefie. Prowadzi to do sytuacji, w której założenia dotyczące podziału zadań przewozowych w różnych strefach, są różne. W celu wyeliminowania znaczących różnic dane są uśredniane, co może w istotny sposób zmniejszyć wiarygodność prowadzonych badań i wpłynąć na błędy prognozy. Ponadto modele zagregowane nie są wrażliwe na czynniki zewnętrzne, np.: związane ze zmieniającą się polityką transportową miast, mogące mieć wpływ na decyzje podróżnych dotyczące wyboru środka podróży. Podejściem, które w znacznym stopniu może ograniczyć błędy prognozy jest skoncentrowanie się na badaniu zachowania podróżnych w odniesieniu do gospodarstw domowych – są to modele niezagregowane [25].

Z uwagi na *złożoność analizowanych systemów transportowych* w literaturze wyróżniane są analityczne i symulacyjne modele podziału zadań przewozowych [13, 25]. Pierwsze z wymienionych umożliwiają uzyskanie rozwiązania dokładnego. Jednakże w przypadku analizy złożonych systemów, modele te często nie prowadzą do rozwiązania problemu. Stąd wykorzystywane są modele symulacyjne. Ich zaletą jest możliwość odzwierciedlenia zjawisk o charakterze dynamicznym oraz losowym.

Niezależnie od wybranej metody modelowania podziału zadań przewozowych, modele podlegają walidacji i kalibracji. W ramach walidacji, rozumianej jako ocena stopnia wiarygodności modelu wobec systemu rzeczywistego [13], wyniki badań są porównywane z danymi rzeczywistymi zebranymi najczęściej na podstawie badań kwestionariuszowych na analizowanym obszarze. Kalibracja, czyli szacowanie parametrów modelu, polega na takim dostosowaniu modelu systemu, aby wyniki pochodzące z eksperymentów symulacyjnych były wystarczająco zgodne z wynikami obserwowanej rzeczywistości [13, 15]. Walidacja i kalibracja modelu są ze sobą ściśle powiązane i w wielu przypadkach są realizowane kilka

razy podczas badań. Przyjmuje się, że powinny być przeprowadzane we wszystkich stadiach konstruowania modelu, ponieważ działania te minimalizują błąd propagacji. W wielu opracowaniach zbieżność na poziomie 85% jest uznawana za zadowalającą.

Należy podkreślić, że modele są tworzone, aby osiągnąć założone cele badawcze. Oznacza to, że jeśli wynik walidacji i kalibracji modelu jest zadowalający, niekoniecznie będzie on pozytywny z uwagi na pozostałe aspekty funkcjonowania modelu. Jak wynika z wcześniejszych rozważań, aspekty, które najczęściej nie są brane pod uwagę w modelach podziału zadań przewozowych dotyczą zmian w polityce transportowej. Biorąc pod uwagę, że modele te ze swej istoty mają charakter strategiczny, powinny być zatem wrażliwe na zmiany w tym obszarze. W przeciwnym razie istotne aspekty modelowanego systemu transportowego, w tym również podziału zadań przewozowych, mogą zostać zmarginalizowane podczas analiz. Prowadzić to może do sytuacji tzw. błędnego koła [5], zaprezentowanego na rys. 1.



Rys. 1. Błędne koło w transporcie indywidualnym i zbiorowym [5]

Zjawisko to zostało opisane w postaci zbioru zależności przyczynowo-skutkowych, w których wzrost ekonomiczny staje się przyczyną wielu zmian, w tym także podziału zadań przewozowych. Pierwszym ogniwem są właściciele pojazdów, których liczba rośnie wraz ze wzrostem ekonomicznym. Tym samym wzrasta zatłoczenie, ale jednocześnie spada zapotrzebowanie na przewozy realizowane środkami transportu zbiorowego, maleje prędkość przewozów tymi środkami (tym samym wzrastają koszty operacyjne, prowadzące do podniesienia stawek przewozowych) oraz jest obniżana częstotliwość kursowania. W efekcie podróże własnymi pojazdami stają się bardzo atrakcyjnym środkiem transportu, stąd liczba ich użytkowników wzrasta. Modele podziału zadań przewozowych, w których pomijane są aspekty po stronie podażowej, znacznie odbiegają od rzeczywistości, przez co stają się mniej wiarygodne (pomimo spełnienia postulatów walidacji i kalibracji modelu na założonym poziomie). Ma to szczególne znaczenie w kontekście prowadzonej od wielu lat polityki zmierzającej do upowszechnienia transportu zbiorowego przy jednoczesnej minimalizacji transportu indywidualnego.

1.3. CEL I ZAKRES BADAŃ

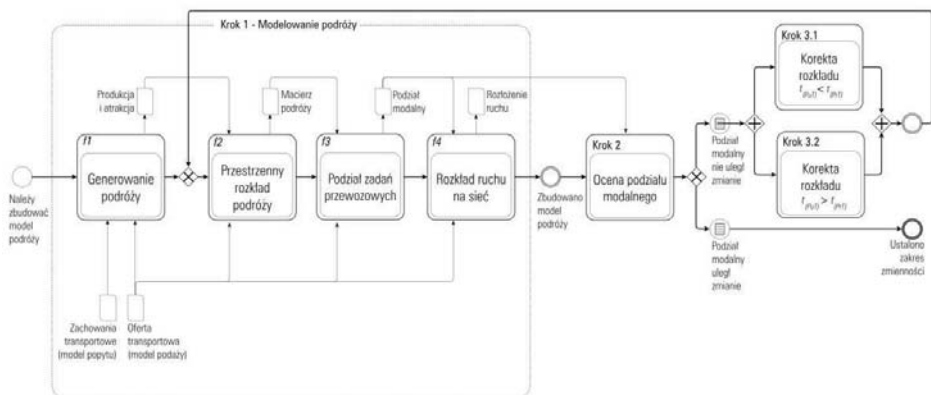
W niniejszym artykule analizowany jest problem odzwierciedlenia harmonogramu transportu zbiorowego w procesie planowania i modelowania podróży z wykorzystaniem podejścia czterostadiowego i przy zastosowaniu narzędzia Visum. Ocena tego procesu prowadzona jest w kierunku identyfikacji wpływu zmian w harmonogramie kursowania transportu zbiorowego na zdefiniowanej wcześniej sieci połączeń (linii transportowych), na podział zadań przewozowych.

Zamierzeniem autorów jest poddanie szczegółowej identyfikacji warunków i zależności zachodzących pomiędzy obciążeniem sieci środkami transportu indywidualnego i zbiorowego, na realność wykonania zakładanego harmonogramu kursowania transportu zbiorowego.

2. METODYKA BADAŃ

2.1. PROPOZYCJA METODYKI BADAŃ

W artykule zaproponowano realizację badań opartą na 3 zasadniczych krokach, przedstawionych na rys. 2, zgodnie z notacją zapisu procesów BPMN [24]. Zakłada się, że krok 1 stanowi rutynowe postępowanie prowadzące do zbudowania modelu podróży, według procedury czterostadiowej. Rozwinięciem tego postępowania są dodatkowe kroki, tj. krok 2 i krok 3 (w tym 3.1 i 3.2).



Rys. 2. Główne kroki metodyki badawczej (Opr. własne)

W ramach opracowanej metodyki przyjęto następujące założenia brzegowe:

- metodyka docelowo ma mieć charakter uniwersalny (szersze zastosowanie narzędzi modelowania podróży), jednak na tym etapie badania podlegają mechanizmy dostępne w narzędziu klasy Visum – najpowszechniej stosowanym w zakresie budowy modeli podróży;
- zastosowany model podróży ma charakter doświadczalny, w którym przyjmuje się spójność warunków ruchu dla transportu indywidualnego i zbiorowego, poprzez dostosowanie harmonogramu kursowania transportu zbiorowego do prędkości dla transportu indywidualnego – czasy przejazdu pomiędzy węzłami sieci są identyczne, co określane jest mianem czasu zrównoważenia;
- funkcja użyteczności określająca podział zadań przewozowych (zastosowana w ramach f_3 procedury czterostadiowej) zależna jest wyłącznie od czasu trwania podróży.

2.2. CHARAKTERYSTYKA GŁÓWNYCH KROKÓW METODYKI

2.2.1. Krok 1 – Modelowanie ruchu

Zastosowany model, oparty na opisanej wcześniej procedurze czterostadiowej, zakłada wykorzystanie losowych wartości danych wejściowych – w szczególności zmiennych objaśniających, służących do wyznaczenia potencjałów ruchotwórczych (w ramach f_1). W przypadku f_2 wykorzystano model grawitacyjny [8], do wyznaczenia którego podstawę stanowiła odległość między rejonami komunikacyjnymi, wyznaczona po odcinkach sieci transportowej w postaci funkcji użyteczności (1):

$$f(U_{(a,b)}) = mU_{(a,b)}^n e^{rU_{(a,b)}} \quad (1)$$

gdzie:

$U_{(a,b)}$ – użyteczność dla podróży z rejonu a do rejonu b ,
 m, n, r – parametry modelu.

W fazie f_3 wykorzystano model logitowy [8], w którym użyteczność decydującą o wyborze środka transportu, stanowi czas podróży pomiędzy rejonem źródłowym a oraz rejonem docelowym b , środkiem transportu p . Funkcja użyteczności w tym przypadku przyjmuje następującą postać (2):

$$f(U_{(a,b)}^p) = e^{kU_{(a,b)}^p} \quad (2)$$

gdzie:

$U_{(a,b)}^p$ – użyteczność dla podróży z rejonu a do rejonu b , środkiem transportu p ,
 k – parametr modelu.

Poprzez zastosowanie procedur obliczeniowych wykorzystujących przedstawione wyżej założenia, definiowany jest zestaw parametrów opisujących zarówno warunki ruchu (np. czas przejazdu poszczególnymi odcinkami w sieci transportowej w sieci obciążonej, natężenia ruchu itp.), jak również system transportowy (np. podział zadań przewozowych).

2.2.2. Krok 2 i 3 – Ocena podziału modalnego i korekta harmonogramów kursowania transportu zbiorowego

Sieć transportowa na której prowadzone jest odzwierciedlenie podróży jest najczęściej opisywana grafem [9, 14, 28], w postaci (3):

$$G = \langle W, L \rangle \quad (3)$$

gdzie:

- W – zbiór wierzchołków grafu, będący odzwierciedleniem węzłów sieci transportowej, $W = \{w : w = 1, \dots, \omega\}$, przy czym ω jest liczebnością zbioru W ,
- L – zbiór łuków grafu G , stanowiących połączenia pomiędzy wierzchołkami, tj. $(w, w') \in W$ oraz $L = \{(w, w') : (w, w') \in W \times W, w \neq w'\}$.

W modelowaniu podróży zbiór wierzchołków dekomponowany jest na trzy podzbiory A, B oraz V . Podzbiór A zawiera wierzchołki grafu (węzły), w których generowane są podróże, $A = \{a : a \in W\}$. Podzbiór B zawiera wierzchołki grafu (węzły), w których absorbowane są podróże, $B = \{b : b \in W\}$, natomiast podzbiór V zawiera wierzchołki pośrednie grafu (węzły), przez które realizowane są podróże w relacji (a, b) , tj. $V = \{v : (v, v') \in W, v \neq v'\}$. Spełnione są również następujące warunki: $W = A \cup V \cup B$, $A \cap V = \emptyset$, $B \cap V = \emptyset$ oraz $A \cap B = \emptyset$.

Podział modalny (zadań przewozowych) w analizowanej sieci transportowej rozumiany jest jako struktura podróży realizowanych pomiędzy rejonami komunikacyjnymi, reprezentowanymi przez wierzchołki (a, b) , z wykorzystaniem transportu zbiorowego i indywidualnego. Udział podróży spełnia zależność (4):

$$P_{PrT(a,b)} + P_{PuT(a,b)} = 1 \quad (4)$$

gdzie:

- $P_{PrT(a,b)}$ – udział podróży realizowanych pomiędzy wierzchołkiem (rejonem) a oraz b , z wykorzystaniem transportu indywidualnego,
- $P_{PuT(a,b)}$ – udział podróży realizowanych pomiędzy wierzchołkiem (rejonem) a oraz b , z wykorzystaniem transportu zbiorowego.

W kroku 2 metodyki prowadzona jest ocena udziału zadań przewozowych realizowanych z wykorzystaniem transportu zbiorowego P_{PuT} , w funkcji zmian czasu przejazdu odcinkiem (w, w') , przy czym udział ten wyznaczany jest z zależności (5):

$$P_{PuT} = \frac{\sum_{(a,b) \in W} L_{PuT(a,b)}(t_{PuT(w,w')}, t_{PrT(w,w')})}{\sum_{(a,b) \in W} L_{(a,b)}}, \quad \forall (w, w') \in W, L_{(a,b)} > 0, [-] \quad (5)$$

gdzie:

- P_{PuT} – udział podróży realizowanych z wykorzystaniem transportu zbiorowego [-],
- $L_{PuT(a,b)}$ – liczba podróży realizowanych pomiędzy wierzchołkami (a, b) , z wykorzystaniem transportu zbiorowego [podróż],
- $L_{(a,b)}$ – łączna liczba podróży zrealizowanych na odcinkach pomiędzy wierzchołkami

(a, b) [podróże],

$t_{PuT(w,w')}$ – czas przejazdu środkiem transportu zbiorowego na odcinku pomiędzy węzłami (w, w') [min],

$t_{PrT(w,w')}$ – czas przejazdu środkiem transportu indywidualnego na odcinku pomiędzy węzłami (w, w') [min].

Porównując czas przejazdu transportu zbiorowego i indywidualnego na odcinku sieci między wierzchołkami (w, w') , można zdefiniować *wskaźnik zróżnicowania czasu przejazdu*, tak dla transportu zbiorowego $g_{PuT(w,w')}$, jak również dla transportu indywidualnego $g_{PrT(w,w')}$, co zostało przedstawione w postaci zależności (6) i (7):

$$g_{PuT(w,w')} = \frac{t_{PuT(w,w')}}{t_{PrT(w,w')}}, \quad \forall (w, w') \in W; t_{PrT(w,w')} > 0, [-] \quad (6)$$

$$g_{PrT(w,w')} = \frac{t_{PrT(w,w')}}{t_{PuT(w,w')}} = \frac{1}{g_{PuT(w,w')}}, \quad \forall (w, w') \in W; t_{PuT(w,w')} > 0, [-] \quad (7)$$

gdzie:

$g_{PuT(w,w')}$ – wskaźnik zróżnicowania czasu przejazdu środkiem transportu zbiorowego względem indywidualnego na odcinku (w, w') [-],

$g_{PrT(w,w')}$ – wskaźnik zróżnicowania czasu przejazdu środkiem transportu indywidualnego względem zbiorowego na odcinku (w, w') [-],

$t_{PuT(w,w')}$ – czas przejazdu środkiem transportu zbiorowego, na odcinku pomiędzy węzłami (w, w') ,

$t_{PrT(w,w')}$ – czas przejazdu środkiem transportu indywidualnego, na odcinku pomiędzy węzłami (w, w') .

Równoważąc czas przejazdu na odcinku (w, w') transportem zbiorowym i indywidualnym, można wprowadzić pojęcie *czasu zrównoważenia* - $t_{(w,w')}^b$, opisanego zależnością (8):

$$t_{(w,w')}^b \Rightarrow (t_{PuT(w,w')} = t_{PrT(w,w')}), \quad \forall (w, w') \in W, [\text{min}] \quad (8)$$

gdzie:

$t_{(w,w')}^b$ – czas zrównoważenia przejazdu na odcinku (w, w') transportem indywidualnym i zbiorowym [min],

pozostałe oznaczenia jak wcześniej.

Wskaźnik $g_{PuT(w,w')}$ można nazwać *zrównoważonym* - $g_{PuT(w,w')}^b$, jeżeli spełniony jest warunek (9):

$$g_{PuT(w,w')}^b \Rightarrow (t_{PuT(w,w')} - t_{(w,w')}^b) = 0 \wedge (t_{PrT(w,w')} - t_{(w,w')}^b) = 0, \quad \forall (w, w') \in W \quad (9)$$

gdzie:

$g_{PuT(w,w')}^b$ – zrównoważony wskaźnik zróżnicowania czasu przejazdu na odcinku (w, w') transportem zbiorowym względem indywidualnego [-],

pozostałe oznaczenia jak wcześniej.

Zakładając występowanie naturalnych odchyłek od stanu zrównoważenia $g_{PuT(w,w')}^b$, które nie prowadzą do istotnego zaburzenia odzwierciedlanych warunków ruchu w modelu podróży, zostaje wprowadzona definicja stabilności. Stabilnym wskaźnikiem zróżnicowania czasu przejazdu odcinkiem (w, w') , oznaczonym jako $g_{PuT(w,w')}^{stab}$, jest wartość przedziałowa opisana w postaci (10):

$$g_{PuT(w,w')}^{stab} \in \left\langle g_{PuT(w,w')}^<; g_{PuT(w,w')}^> \right\rangle, \quad \forall (w, w') \in W, [-] \quad (10)$$

gdzie:

$g_{PuT(w,w')}^{stab}$ – stabilny wskaźnik zróżnicowania czasu przejazdu na odcinku (w, w') transportem zbiorowym [-],

$g_{PuT(w,w')}^<$ – dolna graniczna wartość wskaźnika $g_{PuT(w,w')}$ ustalana eksperymentalnie na podstawie funkcji $g_{PuT(w,w')}^< = f(v_{PrT}^<)$ [-],

$g_{PuT(w,w')}^>$ – górna graniczna wartość wskaźnika $g_{PuT(w,w')}$ ustalana eksperymentalnie na podstawie funkcji $g_{PuT(w,w')}^> = f(v_{PrT}^>)$ [-],

przy czym

$$v_{PrT}^< = v_{PrT}^{st} - v_{PrT}^- \text{ oraz } v_{PrT}^> = v_{PrT}^{st} + v_{PrT}^+, [-] \quad (11)$$

gdzie:

$v_{PrT}^<$ – dolna graniczna wartość prędkości transportu indywidualnego w sieci obciążonej [km/h],

$v_{PrT}^>$ – górna graniczna wartość prędkości transportu indywidualnego w sieci obciążonej [km/h],

v_{PrT}^{st} – średnia prędkość transportu indywidualnego w sieci obciążonej [km/h],

v_{PrT}^- – dolna odchyłka, względem wartości średniej, prędkości transportu indywidualnego w sieci obciążonej [km/h],

v_{PrT}^+ – górna odchyłka, względem wartości średniej, prędkości transportu indywidualnego w sieci obciążonej [km/h].

Zgodnie ze schematem przebiegu prac badawczych, przedstawionym w podrozdziale 2.1, w kroku 2 iteracyjnej zmianie podlega odcinkowy czas przejazdu środków transportu zbiorowego $t_{PuT(w,w')}$, korygując w ten sposób założony wstępnie (rozkładowy) czas przejazdu międzyprzystankowego. W ten sposób stopniowo zwiększana jest, a następnie zmniejszana, wzajemna relacja czasu przejazdu w sieci obciążonej, względem czasu zrównoważenia $t_{(w,w')}^b$. W każdej tak rozumianej iteracji obserwowana jest wynikowa zmiana podziału zadań przewozowych, skutkująca zmianą struktury potoków pojazdów i pasażerów, a także średnia prędkość w sieci – dla transportu indywidualnego v_{PrT}^{st} , stanowiąca wyznacznik zmiany obecnych warunków ruchu.

Finalnie, wyodrębniany jest obszar tolerancji podziału modalnego, nazywany *stabilnym podziałem modalnym* dla transportu zbiorowego P_{PuT}^{stab} i indywidualnego P_{PrT}^{stab} . W przypadku transportu zbiorowego definiowany jest w postaci zależności (12), jako:

$$v_{PrT}^{stab} \in \left\langle v_{PrT}^<; v_{PrT}^> \right\rangle \Rightarrow g_{PuT}^{stab} \in \left\langle g_{PuT}^<; g_{PuT}^> \right\rangle \Rightarrow P_{PuT}^{stab} \quad (12)$$

gdzie:

v_{PrT}^{stab} – dopuszczalna (niedeterministyczna) wartość prędkości transportu indywidualnego w sieci obciążonej, uznana za stabilną [km/h],

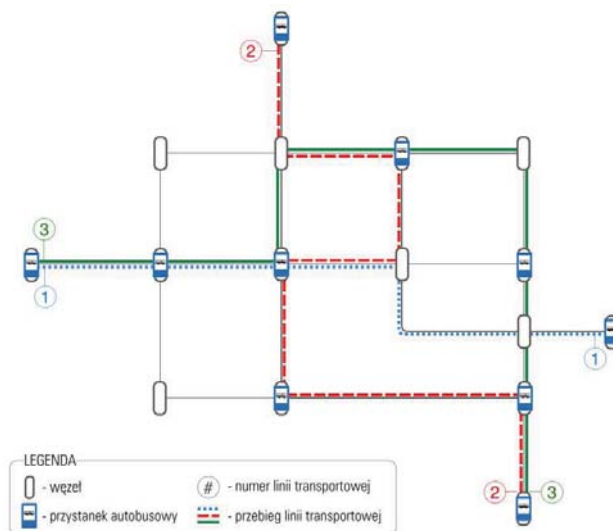
pozostałe oznaczenia jak wcześniej.

3. PRZEBIEG BADAŃ I REZULTATY

3.1. ZAŁOŻENIA DO REALIZACJI BADAŃ

Obliczenia w ramach przyjętej metodyki zrealizowano w oparciu o następujący zestaw danych wejściowych i założeń:

- badania przeprowadzono na testowym modelu ruchu obejmującym: 17 węzłów i 21 odcinków, o układzie przedstawionym na rys. 3;
- w sieci transportowej występują wspólne odcinki dla transportu indywidualnego i zbiorowego – brak jest wyodrębnionych pasów;
- na sieci transportowej zdefiniowano 3 autobusowe linie transportu zbiorowego, pokrywające większość odcinków sieci (przebieg każdej z nich przedstawiono na rys. 3); częstotliwość kursowania w obrębie każdej linii wynosi 30 [min], przez cały okres analizy;



Rys. 3. Układ analizowanej sieci transportowej (Opr. własne)

- harmonogram pracy (rozkład jazdy) transportu zbiorowego ustalony jest w sposób zapewniający osiągnięcie pełnej zgodności prędkości w sieci obciążonej dla transportu indywidualnego i zbiorowego;
- wszystkie punkty przystankowe (łącznie 10 lokalizacji) zdefiniowane są w węzłach sieci transportowej;
- dla obu funkcji użyteczności określonych w postaci zależności (1) i (2) przyjęto para-

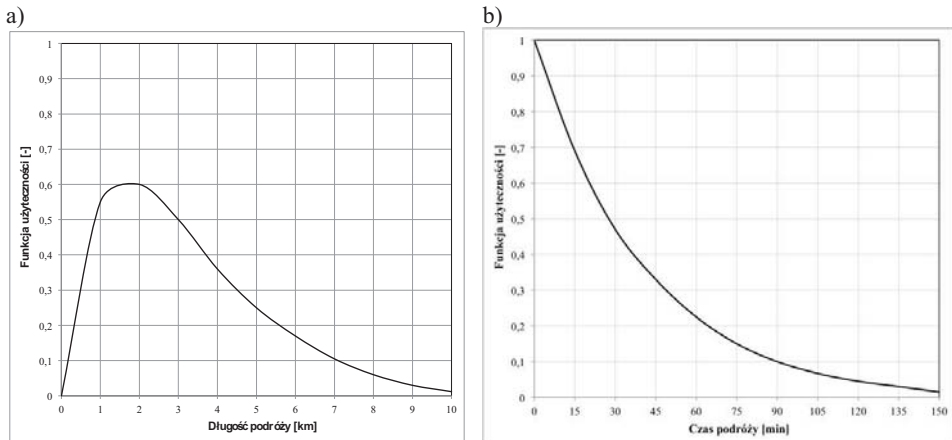
metry zbliżone do stosowanych dla rzeczywistych sieci transportowych i modeli podróży (np. [2, 16, 17, 27]); zestawienie parametrów zawiera tab. 1.

Tablica 1

Zestawienie parametrów funkcji użyteczności

Parametr modelu	Funkcja użyteczności	
	model grawitacyjny $f(U_{(a,b)})$	model logitowy $f(U_{(a,b)}^p)$
m	1,0	–
n	1,0	–
r	-0,6	–
k	–	-0,025

W oparciu o przyjęte parametry ustalono przebieg obu funkcji użyteczności, co przedstawiono na rys. 4 a) dla przestrzennego rozkładu podróży i rys. 4 b) dla podziału zadań przewozowych. Model podróży został zbudowany w narzędziu Visum 14.0 firmy PTV Group GmbH.



Rys. 4. Przebieg funkcji użyteczności: a) model grawitacyjny - wyznaczenie rozkładu przestrzennego podróży, b) model logitowy - wyznaczenie podziału zadań przewozowych (Opr. własne)

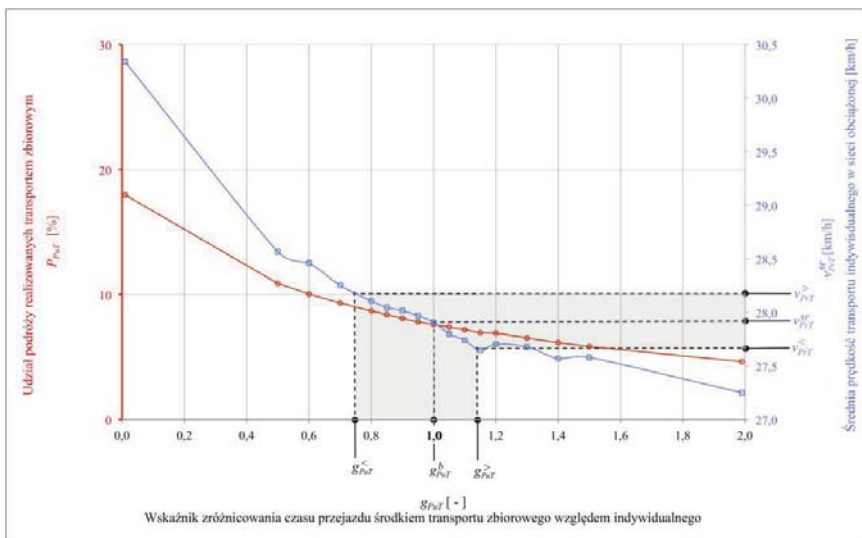
3.2. INTERPRETACJA UZYSKANYCH REZULTATÓW

Wynikowy przebieg funkcji podziału zadań przewozowych, w szczególności udział podróży realizowanych transportem zbiorowym $P_{p,T}$, dla analizowanej sieci transportowej został przedstawiony na rys. 5 (przebieg funkcji oznaczony jest kolorem czerwonym). Dla

analizowanych warunków sieci transportowej i ruchu funkcja ta przyjmuje postać wielomianu 3-go stopnia, opisanego zależnością (11):

$$P_{PuT} = -2,29g_{PuT}^3 + 10,65g_{PuT}^2 - 18,90g_{PuT} + 18,12 \quad (11)$$

W rezultacie zmian wymuszonych w systemie transportowym, poprzez zmianę odcinkowego czasu przejazdu środków transportu zbiorowego, zmianie ulegają również warunki ruchu dla transportu indywidualnego. Jest to obserwowane w postaci zmian odcinkowych czasów przejazdu dla transportu indywidualnego dla kolejnych iteracji generowania podziału zadań przewozowych. Na rys. 5, kolorem niebieskim oznaczono przebieg funkcji odzwierciedlającej średnią prędkość odcinkową w sieci obciążonej dla transportu indywidualnego v_{PuT}^{ST} .

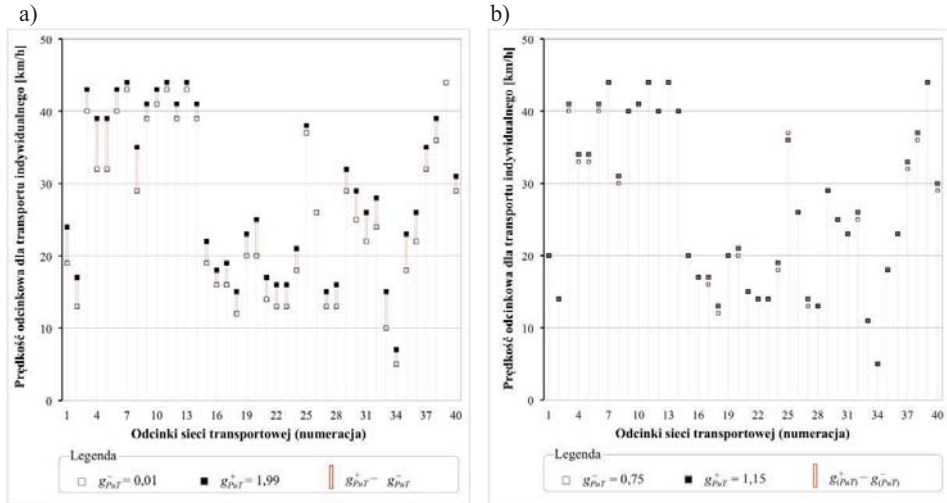


Rys. 5. Przebieg zależności zmian udziału przewozów realizowanych z wykorzystaniem transportu zbiorowego w funkcji różnicy czasu przemieszczania się na poszczególnych odcinkach sieci obciążonej (Opr. własne)

Przyjmując wartości dopuszczalnych odchyłek średniego czasu przejazdu odcinkami sieci obciążonej, tj. odchyłkę dolną $v_{PuT}^- = 0,25$ [km/h] i górną $v_{PuT}^+ = 0,25$ [km/h], wyznaczony został zakres tolerancji (akceptowany) zmian prędkości wynoszący 0,5 [km/h]. Według zależności (10) przy $v_{PuT}^{st} = 27,9$ [km/h] stabilna wartość prędkości w sieci obciążonej zawiera się w przedziale $v_{PuT}^{stab} \in \langle 27,65; 28,15 \rangle$ [km/h]. Zatem, zgodnie z tą samą zależnością (10) za stabilny podział zadań transportowych można uznać taki, w którym odchyłka czasu przejazdu na odcinku (w, w') transportem zbiorowym względem indywidualnego, wynosi $g_{PuT} \in \langle 0,75; 1,13 \rangle$. Wartość ta jest uzasadniona dla analizowanych warunków ruchu, wielkości popytu i dostępnego potencjału przewozowego odzwierciedlonego w eksperymentalnym modelu podróży. Przedział ten został również oznaczony na rys. 5 (w postaci wyodrębnio-

nego zakresu tolerancji g_{PuT}).

Na podstawie szczegółowych zestawień prędkości odcinkowych w ramach każdego z analizowanych punktów pomiarowych (por. rys. 5) dokonano oceny różnic pomiędzy prędkościami odcinkowymi dla transportu indywidualnego, wymuszanych zmianami w harmonogramie kursowania transportu zbiorowego na sieci transportowej. Zestawienia dla skrajnego zakresu zmienności – zakresu analizy, przedstawiono na rys. 6a), natomiast przedział zmian dla ostatecznie przyjętego zakresu tolerancji zaprezentowano na rys. 6b).



Rys. 6. Zestawienie prędkości odcinkowych w sieci transportowej dla transportu indywidualnego: a) dla skrajnego zakresu zmienności analizy $g_{PuT} \in \langle 0,01; 1,99 \rangle$, b) dla przedziału zmienności zapewniającego stabilny podział zadań przewozowych, tj. $g_{PuT}^{stab} \in \langle 0,75; 1,15 \rangle$, (Opr. własne)

4. PODSUMOWANIE

4.1. OCENA UZYSKANYCH REZULTATÓW

W artykule przedstawiono metodykę ustalenia stabilnego podziału zadań przewozowych, który wynika z uzależnienia rozkładu jazdy środków transportu zbiorowego od warunków ruchu, determinowanych w głównej mierze parametrami dla transportu indywidualnego. W artykule wykazano eksperymentalnie, że różnice występujące pomiędzy odcinkowym czasem przemieszczania środków transportu zbiorowego i indywidualnego wpływają zarówno na zmianę warunków ruchu, jak również w znaczący sposób na podział zadań przewozowych w modelu podróży. Ta właśnie zależność jest często pomijana

w pracach prowadzonych na modelach podróży. Podstawowym założeniem jest bowiem fakt, że odzwierciedlenie obowiązujących rozkładów jazdy dla transportu zbiorowego jest słuszne w każdych warunkach.

O ile budowa modelu podróży dla stanu obecnego pozwala na etapie kalibracji zniwelować powstające różnice, o tyle wykorzystanie tak zbudowanego modelu dla celów prognostycznych zostanie obciążone błędem. Problem staje się tym bardziej jaskrawy, gdy: *i*) linie transportu zbiorowego są współbieżne z transportem indywidualnym, np. komunikacja autobusowa bez wyodrębnionych pasów drogowych, *ii*) model podróży miałby zastosowanie do projektowania ramowego rozkładu jazdy – częstotliwości kursowania.

W efekcie podjętych prac zaproponowano zależności pozwalające na określenie granicznych wartości różnicy czasów odcinkowych, przy których wynikowe zmiany warunków ruchu nie przekroczą dopuszczalnego (zakładanego a priori) zakresu zmienności średniej prędkości w całej analizowanej sieci transportowej.

Przedstawione badania mają charakter pilotażowy, głównie w zakresie zastosowania modelu testowego, jak również stopnia złożoności modelu sieci transportowej. Dodatkowo założono wyłącznie dwa rodzaje środków transportu, którymi może być realizowana podróż.

4.2. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

W związku z pilotażowym charakterem badań planowane są dalsze kroki zmierzające do rozwoju zaproponowanej metodyki. Badania te zostaną podjęte w następujących obszarach:

- przeprowadzenie badań w zakresie ustalenia obszaru stabilności podziału zadań przewozowych w sytuacji występowania różnych co do znaku, odchyłek g_{puT} , czasów odcinkowych w sieci transportowej;
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych na rzeczywistych modelach podróży, w których dominują linie transportowe ze wspólnymi pasami ruchu transportu zbiorowego i indywidualnego;
- opracowanie procedury oceny wykonalności harmonogramu przewozów transportem zbiorowym dla zadanych warunków popytu w planowanym horyzoncie czasu oraz budowa stabilnego (wykonalnego) harmonogramu przewozów w oparciu o planowane warunki ruchu;
- sprzężenie uzyskanych efektów metodycznych z dotychczasowymi pracami autorów w zakresie rozwiązywania mieszanych problemów planowania linii transportu zbiorowego oraz wyznaczania lokalizacji baz transportowych (zajezdni), które są oparte na prognostycznych modelach podróży.

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. Biuro Inżynierii Transportu, Millward Brown: Badania i opracowanie planu transportowego Aglomeracji Poznańskiej. Raport z drugiego etapu opracowania - badania modelowe, Poznań, 2014.
 3. Bovy P.H.L.: On Modelling Route Choice Sets in Transportation Networks: A Synthesis. *Transport Reviews*, 2009, 29(1): 43-68.
 4. Chuen O.C., Karim M. R., Yusoff S.: Mode Choice between Private and Public Transport in Klang Valley, Malaysia. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014, ID: 394587,
 5. De Dios Ortuzar J., Willumsen L.G: *Modelling Transport*. John Wiley & Sons, Chichester, 2011.
 6. Drliciac M.: Modal Split in the Zilina Transport Model. *Perners's Contacts*, 2016, 11(4): 5-12.
 7. Findley D.J., Schroeder B.J., Cunningham C.M., Brown T.H.: *Highway Engineering: Planning, Design, and Operations*. Elsevier, Oxford, 2016
 8. Hensher D.A., Button K., J. (red.): *Handbook of Transport Modeling*. Elsevier, Oxford, 2000.
 9. Jacyna M.: *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
 10. Jastrzębski W.: Dylematy i błędy w modelach i prognozach ruchu. *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, Oddział w Krakowie*, 2014, 1(103): 137-164.
 11. Krych A., Kaczkowski M.: *Słownictwo kompleksowych badań i modelowania potoków ruchu*, Poznań, 2010.
 12. Kupka P., Sawicki P.: Optymalizacja lokalizacji zajezdni tramwajowej w systemie komunikacji miejskiej. *Logistyka*, 2015, 2, 462-472.
 13. Law A.M., Kelton W. D.: *Simulation, Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, Boston, 2000.
 14. Leszczyński, J., *Modelowanie systemów i procesów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
 15. Mądry W., Zieliński W., Rozbicki J., Wyszyński Z.: Kalibracja i ocena działania symulacyjnych modeli roślin uprawnych. *Roczniki Nauk Rolniczych, Seria A*, 114, 1999, 25-40.
 16. PBS Sp. z o.o., Politechnika Krakowska - Zakładu Systemów Komunikacyjnych, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu: *Warszawskie Badanie Ruchu 2015 wraz z opracowaniem modelu ruchu Raport z etapu IV Model ruchu*.
 17. Politechnika Krakowska, PBS Sp. z o.o., Jan Friedberg, Projektowanie dróg i doradztwo w zarządzaniu, EKKOM Sp. z o.o. oraz International Management Services Sp. z o.o.: *Krakowski Model Ruchu*. Kraków 2014.
 18. Prato C.G.: Route Choice Modeling: Past, Present and Future Research Directions. *Journal of Choice Modelling*, 2009, 2(1): 65-100.
 19. 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.
 20. Sawicki P., Fierek S.: Problem jednoczesnego wyznaczania przebiegu linii i lokalizacji zajezdni w systemie transportu zbiorowego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - Transport*, 2017, 119: 429-444.
 21. Sawicki P., Fierek S.: The impact of a long-term travel demand changes on mixed problems of mass transit lines construction and vehicles' depots location. *Technical Transactions*, 2018, 6 (przyjęty).
 22. 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.
 23. Sawicki P., Kupka P.: Ustalanie lokalizacji zajezdni tramwajowej w systemie komunikacji miejskiej z zastosowaniem metody wspomagania decyzji. *Transport Miejski i Regionalny*, 2016, 6: 6-11.
 24. Sawicki P.: *Wielokryterialna optymalizacja procesów w transporcie*. Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo ITE, Radom, 2013, ISBN: 978-83-7789-222-0.
 25. Stefancic G., Nogic N., Bago D.: *Models in Planning Urban Public Passenger Transport*. *Promet - Traffic and Transportation*, 2007, 19(4): 259-262.
 26. Szarata A.: *Modelowanie podróży wzbudzonych oraz tłumionych zmianą stanu infrastruktury transportowej*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Seria – Inżynieria Lądowa, Monografia 439, Kraków 2013.
 27. WYG International Sp. z o.o.: *Kompleksowe Badanie Ruchu w Szczecinie 2016. Raport z wykonania Etapu V KBR 2016*, Warszawa 2016.
 28. Żochowska R., *Model struktury sieci miejskiej dla potrzeb oceny wariantów organizacji ruchu w czasie zajęcia pasa drogowego*, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej - Transport*, 2013, 97: 555-564.

Oświadczenie

Niniejsza praca stanowi rezultat badań prowadzonych przez autorów w ramach projektu badawczego finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w ramach badań statutowych, Nr 05/51/DSPB/3553.

THE IMPACT OF MASS TRANSIT SCHEDULES ON THE MODAL SPLIT

Summary: The paper deals with the problem of the impact analysis of mass transit system timetables parameters on the modal split, which is reflected in a traffic model. A typical criterion of selecting transport mode in this kind of model is a journey time, which is mostly moderated by an individual transport. It mostly results from infrastructure parameters and the travel demand, both defining the traffic conditions in the whole transport network. Considering mass transit system, a journey time derives from timetable (or frequency of running), which is first defined by the operator and then reflected in the traffic model. As a consequence, this modelling practice makes the journey time via mass transit system independent from general traffic volume reflected in the model. Thus, the authors have started a pilot study on this phenomenon. They have proposed a relationship between an acceptable change in traffic conditions of the traffic model and a resulted difference of a journey time of public transport vs. individual one. On this basis, the concept of a stable modal split was formulated, and it is experimentally tested.

Keywords: Mass transit system, traffic modelling, stable modal split.