

Norbert Chamier-Gliszczyński<sup>1</sup>

Zakład Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej Politechniki Koszalińskiej

## Modelowanie miejskiego systemu transportowego

### 1. WPROWADZENIE

Transport miejski wyodrębnić możemy według poziomej klasyfikacji transportu na podstawie kryterium zasięgu i odległości transportu dokonując rozgraniczenia jednostek terytorialnych, w obrębie których dokonywane są poszczególne operacje transportowe [4]. Transport miejski jako zagadnienie ujmowane kompleksowo możemy przedstawiać w postaci systemu. System to określona złożona funkcjonalna całość, składająca się z takiej liczby elementów pozostających ze sobą w ściśle ustalonych powiązaniach (relacjach), która jest niezbędna do tego, by całość pełniła przypisane jej funkcje i umożliwiała osiągnięcie określonego celu [2]. Wyodrębnienie miejskiego systemu transportowego ze środowiska miejskiego (otoczenia) generuje podział system i otoczenie. Kształtując prezentowany system w niniejszej pracy zaakcentowano problem odwzorowania podróży mieszkańców miast i analizę potoku ruchu w miejskim systemie transportowym. Wyszczególnienie tych problemów jest istotne dla prowadzenia badań nad zrównoważeniem miejskich systemów transportowych.

### 2. MIEJSKI SYSTEM TRANSPORTOWY

Miejski system transportowy, którego celem działania jest przemieszczanie osób na obszarach miejskich definiujemy jako uporządkowaną czwórkę postaci:

$$\text{MST} = \langle G, F, P, O \rangle \quad (1)$$

gdzie:

MST – model miejskiego systemu transportowego, G – graf struktury miejskiego systemu transportowego, F – zbiór funkcji określonych na węzłach i łukach grafu G, P – potok ruchu pasażerskiego w miejskim systemie transportowym, O – organizacja miejskiego systemu transportowego.

Odwzorowaniem struktury miejskiego systemu transportowego jest sieć transportowa, której strukturę przedstawić można jako graf G. W grafie tym wierzchołki mają interpretację węzłów sieci transportowej, a łuki to połączenia między tymi węzłami. W takim przypadku graf ten zapisuje się w postaci [1, 2]:

$$G = \langle W, L \rangle \quad (2)$$

gdzie:

G – graf struktury miejskiego systemu transportowego, W – zbiór wierzchołków grafu G, L – zbiór łuków grafu G.

Każdemu wierzchołkowi i łukowi w grafie można przyporządkować zbiór funkcji, które odwzorowują techniczne i ekonomiczne charakterystyki miejskiego systemu transportowego. W efekcie sieć interpretujemy jako uporządkowaną trójkę i zapisujemy jako [1, 2]:

$$S = \langle G, F_W, F_L \rangle \quad (3)$$

gdzie:

S – sieć transportowa miejskiego systemu transportowego, G – graf struktury miejskiego systemu transportowego,  $F_W$  – zbiór funkcji określonych na zbiorze wierzchołków grafu G,  $F_L$  – zbiór funkcji określonych na zbiorze połączeń w grafie G.

<sup>1</sup> norbert.chamier-gliszczyński@tu.koszalin.pl

Zbiór funkcji określonych na zbiorze wierzchołków grafu  $G$  oraz zbiór funkcji określonych na zbiorze połączeń w grafie  $G$  definiujemy jako:

$$F_W = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_u\}, u = 1, 2, \dots, U; F_L = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_z\}, z = 1, 2, \dots, Z \quad (4)$$

gdzie:

$U$  – liczba odwzorowań określonych na zbiorze wierzchołków grafu  $G$ ,  $Z$  – liczba odwzorowań określonych na zbiorze połączeń grafu  $G$ .

$Z$  kolei odwzorowaniem przemieszczania się osób w miejskim systemie transportowym jest potok ruchu przepływający przez węzły i łuki w sieci transportowej. Potok ruchu pojawiający się na wejściach (węzłach) będących źródłami ruchu, przemieszcza się przez węzły i wypływa przez węzły będące punktami ujścia ruchu. Związek pomiędzy uporządkowaną parą węzłów źródło i ujście stanowi relację podróży mieszkańców miast:

$$T \subset A \times B = \{(a, b): a \in A, b \in B\} \quad (5)$$

gdzie:

$T$  – zbiór relacji podróży mieszkańców miast,  $A$  – zbiór węzłów będących źródłami potoku ruchu,  $B$  – zbiór węzłów będących ujściami potoku ruchu.

Zbiór węzłów struktury miejskiego systemu transportowego, przez które przepływa potok ruchu przemieszczający się ze źródła do ujścia to zbiór węzłów pośrednich. Uwzględniając rolę jaką ma do spełnienia każdy węzeł w przepływie potoku ruchu w miejskim systemie transportowym możemy zapisać warunek:

$$W = A \cup V \cup B \quad (6)$$

gdzie:

$W$  – zbiór węzłów w miejskim systemie transportowym,  $A$  – zbiór węzłów będących źródłem potoku ruchu,  $V$  – zbiór węzłów pośrednich,  $B$  – zbiór węzłów będących ujściem potoku ruchu.

Organizacja jako kolejny element modelu miejskiego systemu transportowego ujmuje związki między elementami analizowanego systemu a potokiem ruchu przepływającym przez węzły sieci transportowej. Odzwierciedleniem rozłożenia potoku ruchu w miejskiej sieci transportowej, spełniającego warunek realizacji zapotrzebowania na przewóz jest organizacja ruchu. Zadaniem organizacji ruchu jest ustalenie między innymi dróg przemieszczania potoku ruchu. Ponieważ z relacji podróży mieszkańców miast nie wynika, jakimi drogami będą się przemieszczać. Dla każdej relacji ich podróży zadany jest zbiór dróg łączących węzły początkowe i końcowe, który możemy zapisać jako [2]:

$$P = \bigcup_{(a,b) \in T} P^{ab} \quad (7)$$

gdzie:

$P$  – zbiór dróg w miejskiej sieci transportowej,  $P^{ab}$  – zbiór dróg w relacji  $(a,b)$  podróży mieszkańców miast.

### 3. ODWZOROWANIE PODRÓŻY MIESZKAŃCÓW MIAST

Analizę podróży mieszkańców miast realizowanych na obszarach miejskich przeprowadzono w oparciu o wyniki raportu [3] dotyczącego monitorowania zachowań transportowych mieszkańców miast. Badaniu poddano wyodrębnioną grupę mieszkańców z 94 polskich miast, do której zaliczono mieszkańców miast wykonujących przynajmniej pięć podróży samochodem osobowych (nie służbowo) w ciągu tygodnia na obszarach miejskich. W prowadzonych badaniach relację  $(a, b)$  podróży interpretuje się jako każde przemieszczenie się dowolnym środkiem transportu lub pieszo, na odległość co najmniej 500 metrów z punktu  $a$  będącego początkiem podróży (źródłem) do punktu  $b$  będącego celem podróży (ujściem).

Badania podzielono na cztery niezależne etapy, co pozwoliło na wyszczególnienie dla każdego etapu oddzielnych relacji podróży mieszkańców miast.

### Etap 1

Na tym etapie zbiór punktów  $A_1$  będących początkiem podróży mieszkańców miast jest zbiorem jednoelementowym (8), a zbiór punktów  $B_1$  będących celem podróży mieszkańców miast jest zbiorem siedmioelementowym (9).

$$A_1 = \{a_1\} \quad (8)$$

$$B_1 = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7\} \quad (9)$$

gdzie:

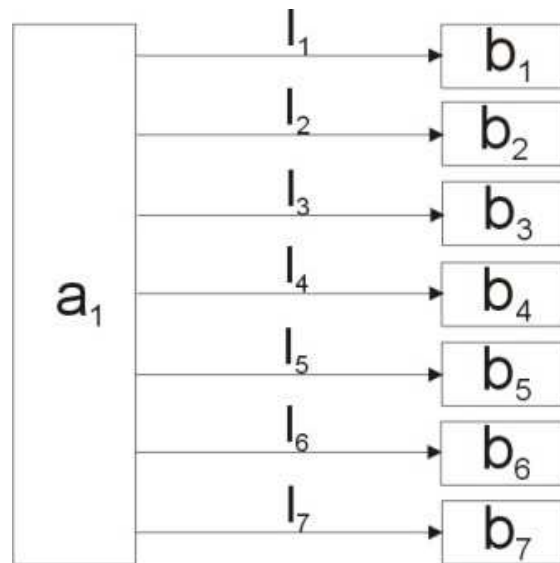
$A_1$  – zbiór punktów będących początkiem podróży mieszkańców miast dla etapu 1,  $a_1$  – dom,  $B_1$  – zbiór punktów będących celem podróży mieszkańców miast dla etapu 1,  $b_1$  – praca,  $b_2$  – zakupy,  $b_3$  – nauka (szkoła),  $b_4$  – wizyty towarzyskie,  $b_5$  – podwożenie,  $b_6$  – rozrywka,  $b_7$  – inne cele.

Połączenia poszczególnych punktów interpretujemy jako relacje podróży, czyli podróże realizowane przez mieszkańców miast między wyszczególnionymi punktami podróży (rys. 1):

$$L_1 = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7\} \quad (10)$$

gdzie:

$L_1$  – zbiór połączeń punktów podróży mieszkańców miast dla etapu 1,  $l_1$  – podróż w relacji  $a_1$ - $b_1$  (dom-praca),  $l_2$  – podróż w relacji  $a_1$ - $b_2$  (dom-zakupy),  $l_3$  – podróż w relacji  $a_1$ - $b_3$  (dom-nauka (szkoła)),  $l_4$  – podróż w relacji  $a_1$ - $b_4$  (dom-wizyty towarzyskie),  $l_5$  – podróż w relacji  $a_1$ - $b_5$  (dom-podwożenie),  $l_6$  – podróż w relacji  $a_1$ - $b_6$  (dom-rozrywka),  $l_7$  – podróż w relacji  $a_1$ - $b_7$  (dom-inne cele).



Rys. 1. Graf relacji podróży mieszkańców miast dla etapu 1:  $a_1$  – dom,  $b_1$  – praca,  $b_2$  – zakupy,  $b_3$  – nauka (szkoła),  $b_4$  – wizyty towarzyskie,  $b_5$  – podwożenie,  $b_6$  – rozrywka,  $b_7$  – inne cele,  $l_1, l_2, \dots, l_7$  – relacje podróży mieszkańców miast.

Źródło: opracowanie własne.

### Etap 2

Na tym etapie wyszczególniono zbiór  $A_2$  (11) i  $B_2$  (12) punktów będących początkiem i celem podróży mieszkańców miast.

$$A_2 = \{a_2\} \quad (11)$$

$$B_2 = \{b_2, b_8, b_9\} \quad (12)$$

gdzie:

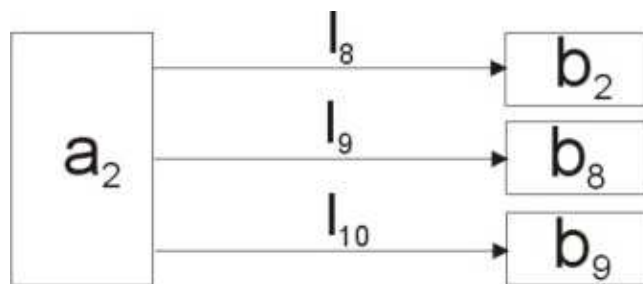
$A_2$  – zbiór punktów będących początkiem podróży mieszkańców miast dla etapu 2,  $a_2$  – praca,  $B_2$  – zbiór punktów będących celem podróży mieszkańców miast dla etapu 2,  $b_2$  – zakupy,  $b_8$  – kolejna praca,  $b_9$  – dom.

Połączenia poszczególnych punktów interpretujemy jako relacje podróży (rys. 2):

$$L_2 = \{l_8, l_9, l_{10}\} \quad (13)$$

gdzie:

$L_2$  – zbiór połączeń punktów podróży mieszkańców miast dla etapu 2,  $l_8$  – podróż w relacji  $a_2$ - $b_2$  (praca-zakupy),  $l_9$  – podróż w relacji  $a_2$ - $b_8$  (praca-kolejna praca),  $l_{10}$  – podróż w relacji  $a_2$ - $b_9$  (praca-dom).



Rys. 2. Graf relacji podróży mieszkańców miast dla etapu 2:  $a_2$  – praca,  $b_2$  – zakupy,  $b_8$  – kolejna praca,  $b_9$  – dom,  $l_8, l_9, l_{10}$  – relacje podróży mieszkańców miast.

Źródło: opracowanie własne.

### Etap 3

Na tym etapie wyszczególniono zbiór  $A_3$  (14) i  $B_3$  (15) punktów będących początkiem i celem podróży mieszkańców miast.

$$A_3 = \{a_3\} \quad (14)$$

$$B_3 = \{b_9, b_{10}\} \quad (15)$$

gdzie:

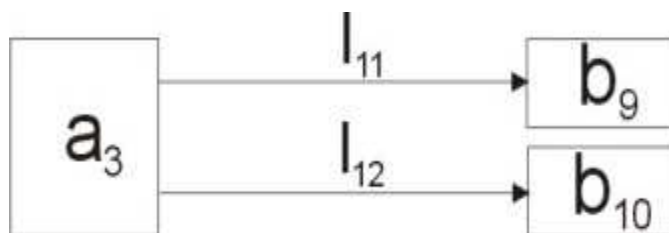
$A_3$  – zbiór punktów będących początkiem podróży mieszkańców miast dla etapu 3,  $a_3$  – zakupy,  $B_3$  – zbiór punktów będących celem podróży mieszkańców miast dla etapu 3,  $b_9$  – dom,  $b_{10}$  – kolejna zakupy.

Połączenia poszczególnych punktów interpretujemy jako relacje podróży (rys. 3):

$$L_3 = \{l_{11}, l_{12}\} \quad (16)$$

gdzie:

$L_3$  – zbiór połączeń punktów podróży mieszkańców miast dla etapu 3,  $l_{11}$  – podróż w relacji  $a_3$ - $b_9$  (zakupy-dom),  $l_{12}$  – podróż w relacji  $a_3$ - $b_{10}$  (zakupy-kolejne zakupy).



Rys. 3. Graf relacji podróży mieszkańców miast dla etapu 3:  $a_3$  – zakupy,  $b_9$  – dom,  $b_{10}$  – kolejne zakupy,  $l_{11}, l_{12}$  – relacje podróży mieszkańców miast.

Źródło: opracowanie własne.

**Etap 4**

Na tym etapie wyszczególniono zbiór A4 (17) i B4 (18) punktów będących początkiem i celem podróży mieszkańców miast.

$$A_4 = \{a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9\} \tag{17}$$

$$B_4 = \{b_9\} \tag{18}$$

gdzie:

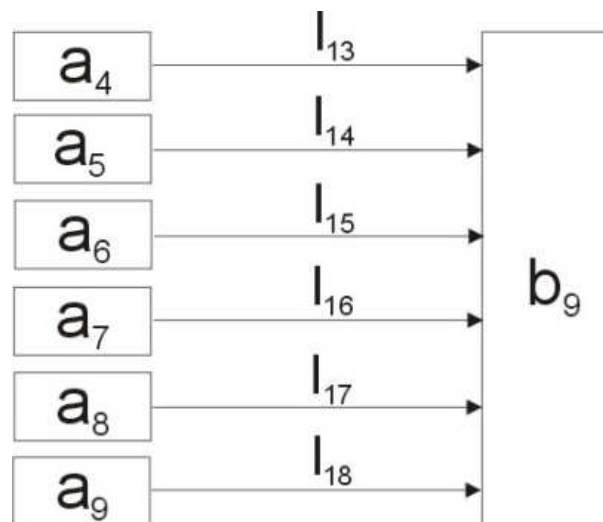
A<sub>4</sub> – zbiór punktów będących początkiem podróży mieszkańców miast dla etapu 4, a<sub>4</sub> – kolejne zakupy, a<sub>5</sub> – nauka (szkoła), a<sub>6</sub> – wizyty towarzyskie, a<sub>7</sub> – podwożenie, a<sub>8</sub> – rozrywka, a<sub>9</sub> – inne cele, B<sub>4</sub> – zbiór punktów będących celem podróży mieszkańców miast dla etapu 4, b<sub>9</sub> – dom.

Połączenia poszczególnych punktów interpretujemy jako relacje podróży (rys. 4):

$$L_4 = \{l_{13}, l_{14}, l_{15}, l_{16}, l_{17}, l_{18}\} \tag{19}$$

gdzie:

L<sub>4</sub> – zbiór połączeń punktów podróży mieszkańców miast dla etapu 4, l<sub>13</sub> – podróż w relacji a<sub>4</sub>-b<sub>9</sub> (kolejne zakupy-dom), l<sub>14</sub> – podróż w relacji a<sub>5</sub>-b<sub>9</sub> (nauka(szkoła)-dom), l<sub>15</sub> – podróż w relacji a<sub>6</sub>-b<sub>9</sub> (wizyty towarzyskie-dom), l<sub>16</sub> – podróż w relacji a<sub>7</sub>-b<sub>9</sub> (podwożenie-dom), l<sub>17</sub> – podróż w relacji a<sub>8</sub>-b<sub>9</sub> (rozrywka-dom), l<sub>18</sub> – podróż w relacji a<sub>9</sub>-b<sub>9</sub> (inne cele-dom).



Rys. 4. Graf relacji podróży mieszkańców miast dla etapu 4: a<sub>4</sub> – kolejne zakupy, a<sub>5</sub> – nauka (szkoła), a<sub>6</sub> – wizyty towarzyskie, a<sub>7</sub> – podwożenie, a<sub>8</sub> – rozrywka, a<sub>9</sub> – inne cele, b<sub>9</sub> – dom, l<sub>13</sub>, l<sub>14</sub>, l<sub>15</sub>, l<sub>16</sub>, l<sub>17</sub>, l<sub>18</sub> – relacje podróży mieszkańców miast.

Źródło: opracowanie własne.

Dodatkowo wszystkie podróże realizowane na poszczególnych etapach w zależności od długości drogi przebytej można podzielić na krótkie i długie. Dla potrzeb analizowanego miejskiego systemu transportowego zdefiniowano zbiór odległości transportowych D, w którym wyróżniono dwie odległości niezależnie od wielkości miasta:

$$D = \{d_1, d_2\} \tag{20}$$

gdzie:

D – zbiór odległości transportowych, d<sub>1</sub> – odległość transportowa do 5 km, d<sub>2</sub> – odległość transportowa powyżej 5 km.

Ponadto podróże mogą być realizowane różnymi środkami transportu dla potrzeb analizowanego miejskiego systemu transportowego zdefiniowano zbiór środków transportu:

$$K = \{k_1, k_2, k_3, k_4\} \tag{21}$$

gdzie:

$K$  – zbiór środków transportu,  $k_1$  – samochód osobowy,  $k_2$  – środki transportu publicznego,  $k_3$  – pieszo,  $k_4$  – inne.

#### 4. ANALIZA POTOKU RUCHU W MIEJSKIM SYSTEMIE TRANSPORTOWYM

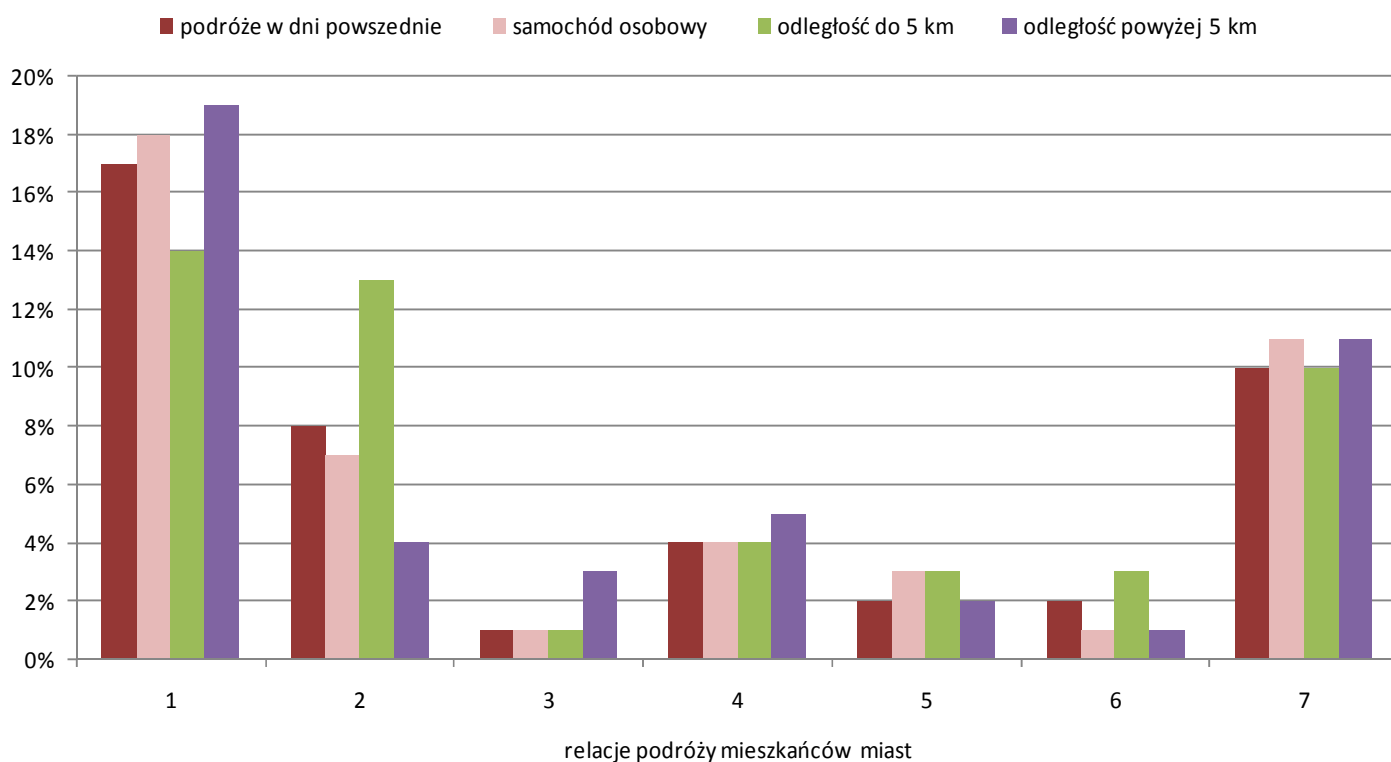
Analizując potok ruchu w miejskim systemie transportowym w odniesieniu do pierwszego etapu (rys. 5), na którym generowane jest 44% całodziennego potoku w dni powszednie największy odsetek podróżnych przemieszcza się w relacji dom-praca (17%) oraz dom-zakupy (8%). Ponadto w relacjach tych dominującym środkiem transportu jest samochód osobowy odpowiednio 18% i 7%, a także w relacji dom-praca 14% i dom-zakupy 13% to podróże realizowane na odległościach do 5 km (rys. 5).

Powiązanie danych odnośnie wyboru środka transportu i odległości przemieszczania pozwala zauważyć, że mieszkańcy miast do przemieszczeń na krótkich trasach wybierają indywidualny środek transportu. Wybór ten kształtują indywidualne motywacje i preferencje, które wyszczególniono jako elementy zbioru MP:

$$MP = \{mp_1, mp_2, mp_3, mp_4, mp_5, mp_6, mp_7\} \quad (22)$$

gdzie:

MP – zbiór motywacji i preferencji,  $mp_1$  – wygoda,  $mp_2$  – oszczędność czasu,  $mp_3$  – bezpośredni dojazd,  $mp_4$  – niezależność,  $mp_5$  – brak możliwości dojazdu innymi środkami transportu,  $mp_6$  – niezawodność,  $mp_7$  – inne.

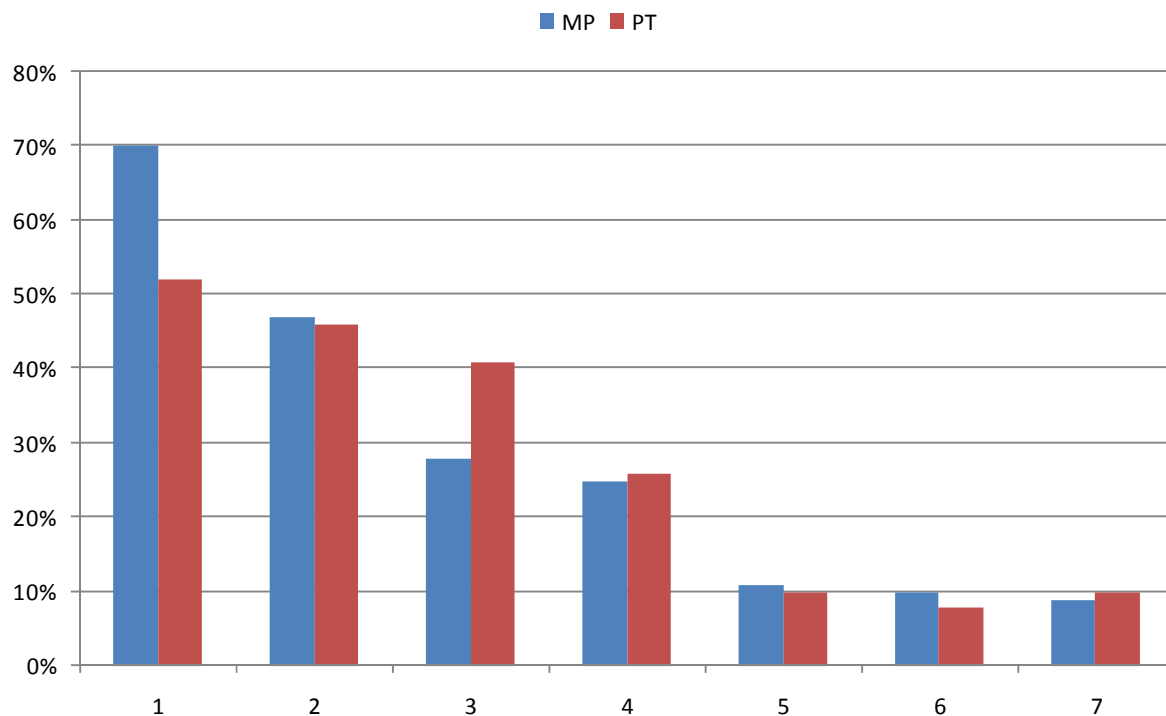


Rys. 5. Potok ruchu w miejskim systemie transportowym w dni powszednie dla etapu 1: 1 – relacje podróży  $l_1$ , 2 – relacje podróży  $l_2$ , 3 – relacje podróży  $l_3$ , 4 – relacje podróży  $l_4$ , 5 – relacje podróży  $l_5$ , 6 – relacje podróży  $l_6$ , 7 – relacje podróży  $l_7$ .

Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu [3].

Równocześnie jak pokazały badania [3] mieszkańcy miast równie często wskazywali na zalety i wady z eksploatacji samochodu osobowego na obszarach miejskich. Przykładem tego jest parametr oszczędność czasu, na który wskazało 47% mieszkańców (rys. 6). Z kolei na kongestię, która w dużej mierze przyczynia

się do wydłużenia podróży samochodem osobowym, czyli strat czasu jako problem wskazało 46% kierowców (rys. 6). Pozostałe wyniki odnośnie motywacji i preferencji oraz problemów i trudności związanych z eksploatacją samochodu osobowego na obszarach miejskich zostały pokazane na rysunku 6.



Rys. 6. Motywacje i preferencja oraz problemy i trudności z eksploatacją samochodów osobowych na obszarach miejskich: MP – motywacje i preferencje, PT – problemy i trudności, 1 – wygoda/zły stan dróg, 2 – oszczędność czasu/kongestia, 3 – bezpośredni dojazd/wysokie koszty, 4 – niezależność/trudności parkingowe, 5 – brak możliwości dojazdu innymi środkami transportu/usterki techniczne, 6 – niezawodność/kolizje i wypadki drogowe, 7 – inne/inne.

Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu [3].

## 5. WNIOSKI

Przedstawiony w pracy proces kształtowania miejskiego systemu transportowego to zapoczątkowany przez autora etap badań prowadzonych nad zrównoważeniem miejskich systemów transportowych w polskich miastach. Dlatego w niniejszej pracy przedstawiono etapy związane z modelowaniem jak i pokazano wyniki badań z monitorowania zachowań transportowych mieszkańców miast. Wyniki badań pokazały, że dominującym środkiem transportu w podróżach realizowanych na obszarach miejskich wśród badanej grupy mieszkańców jest samochód osobowy, co niekorzystnie wpływa na proces równoważenia transportu w miastach.

## Streszczenie

W pracy zaprezentowano zagadnienie kształtowania miejskiego systemu transportowego w aspekcie odwzorowania podróży mieszkańców miast oraz potoku ruchu. Czteroetapowe badania odwzorowania podróży mieszkańców miast przeprowadzono w oparciu o wyniki raportu [3] dotyczącego monitorowania zachowań transportowych mieszkańców miast. Analizując potok ruchu w miejskim systemie transportowym wyszczególniono potok ruchu w dni powszednie w zależności od relacji. Zwrócono również uwagę na motywacje i preferencje oraz problemy i trudności z eksploatacją samochodów na obszarach miejskich.

Słowa kluczowe: miejski system transportowy, relacje podróży, potok ruchu

## Modelling of urban transport system

### Abstract

The present study covers issues of the modelling of urban transport system in relation to an analysis presented of the transport behavior of the dwellers of Polish cities. The analysis was conducted taking into consideration the relation of city travels that are realized by city dwellers on weekdays (Monday through Friday). The results presented of the investigations into the transport behavior of city dwellers are related to the group of those people (i.e. drivers) who travel in passenger cars (not on business) at least five times in a week. The following criteria were taken into account: the type of the means of transport as well as the distance covered while travelling in a city.

Key words: urban transport system, travel relations, traffic flow.

## LITERATURA

- [1] Ambroziak T.: Modelowanie systemów i procesów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [2] Jacyna M.: Modelowanie i ocena systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [3] Raport: Monitorowanie postaw społecznych w zakresie zrównoważonego transport. Pierwszy etap. PBS DGA/Ministerstwo Środowiska, Sopot 06.2010.
- [4] Rydzkowski W., Wojewódzka-Król K., Transport, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
- [5] Wyszomirski O., Transport miejski ekonomika i organizacja, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2008.