

MARTA GAĞOROWSKA

mgr inż., Gmina Wrocław,
pl. Nowy Targ 1-8, 50-141 Wrocław
tel.: +48 71 777 7840, e-mail:
marta.gagorowska@um.wroc.pl

PIOTR JAN KOJAŁOWICZ

mgr inż., Gmina Wrocław,
pl. Nowy Targ 1-8, 50-141 Wrocław
tel.: +48 71 777 7840, e-mail:
piotr.kojalowicz@um.wroc.pl

RAFAŁ KUCHARSKI

dr inż., Politechnika Krakowska,
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
tel.: +48 12 628 2828, email:
rkucharski@pk.edu.pl

Macierz kosztów uwzględniająca czasy podróży różnymi środkami transportu¹

Streszczenie: W poniższym artykule opisano przykład budowy macierzy kosztów podróży wykorzystanej podczas dystrybucji (rozkładu przestrzennego) podróży, która uwzględnia kilka środków transportu równocześnie. Autorzy przedstawiają kolejne analizy dotyczące wrażliwości poszczególnych miar oporu przestrzeni na wprowadzone do sieci zmiany oraz płynące z nich wnioski. Dodatkowo starają się udowodnić, że macierz zawierająca tylko jeden z systemów transportowych może powodować, że funkcja jest mało wrażliwa na powstawanie nowych inwestycji dedykowanych innym typom pojazdów. Prace nad modelem ruchu Wrocławia pozwoliły na przetestowanie kilku wariantów konstruowania macierzy kosztów podróży, jednak artykuł przedstawia tylko wybrane rozwiązanie, które wydaje się być najbardziej odpowiednie.

Słowa kluczowe: macierz kosztu podróży, dystrybucja podróży, model popytu

Wprowadzenie

Model ruchu, na podstawie którego opracowano poniższy artykuł, składa się z czterech etapów: generacji oraz dystrybucji podróży, podziału zadań przewozowych i rozkładu ruchu na sieć. Poszczególne części modelu umożliwiają znalezienie odpowiedzi na kolejne pytania:

1. Ile podróży odbywa się w danej jednostce czasu?
2. Skąd i dokąd dane osoby mogą się przemieszczać?
3. Jakim środkiem transportu odbywają się podróże?
4. Którędy poruszają się uczestnicy ruchu?

Artykuł jest poświęcony opracowaniu macierzy kosztów podróży używanej w funkcji oporu przestrzeni, która określa, ile z podróży mających źródło w danym rejonie kończy się w innych poszczególnych rejonach. Obliczenie macierzy zawierającej koszty podróży stanowi istotny element pracy nad rozkładem przestrzennym, czyli dystrybucją podróży. W tym opracowaniu za jednostkę kosztu podróży przyjęto tylko czas lub tylko dystans, choć autorzy nie wykluczają również rozwiązania, które wiąże ze sobą obie te miary. Na potrzeby przeprowadzonych analiz zdecydowano się uproszczyć podejście i nie łączyć obu czynników kosztowych.

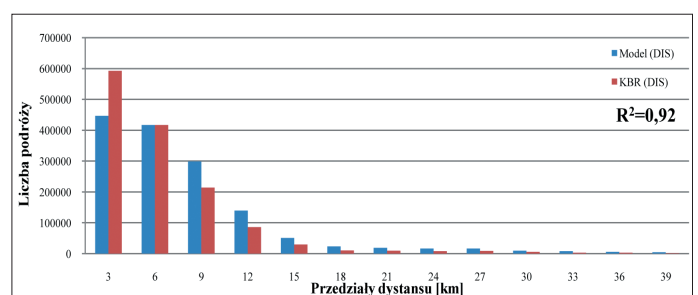
Istnieją odmienne opinie na temat tego, co powinno być miernikiem oporu przestrzeni i co stosuje się w praktyce podczas tworzenia modeli podróży [2], [3], [4]. Różne poglądy dotyczące tego zagadnienia świadczą o tym, że prawdopodobnie nie ma jednego i najlepszego rozwiązania. W tym

referacie autorzy prezentują wyniki jednej ze swoich analiz i płynące z niej wnioski. Celem tego opracowania jest przedstawienie wybranego przez autorów sposobu konstruowania macierzy kosztów podróży, który uwzględnia wybraną miarę odległości i różne środki transportu równocześnie.

Artykuł podzielony jest na dwa etapy. Pierwsza część opisuje różne proste podejścia do budowy macierzy kosztów oraz proponowany przez autorów sposób uwzględniający kilka środków transportu równocześnie i ten rodzaj kosztów, który według nich najlepiej odzwierciedla wpływ zmian w sieci na opór przestrzeni. Druga część zawiera analizy wrażliwości opisanych wcześniej kosztów na zmiany wprowadzone do sieci.

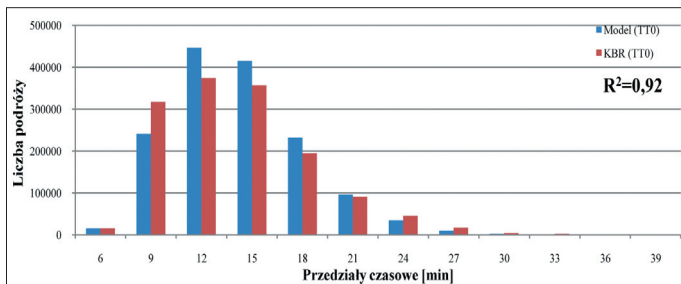
Proste macierze kosztów podróży

Pierwsze formuły opisujące macierz kosztów podróży we wrocławskim modelu zawierały tylko dystans (macierz DIS) lub czas podróży samochodem osobowym po obciążonej sieci (macierz TTC) lub czas podróży po nieobciążonej sieci (macierz TT0). Dla sprawdzenia zgodności wszystkich rozkładów podróży modelu z rozkładem wynikającym z Kompleksowych Badań Ruchu (KBR) [5] użyto współczynnika determinacji (R^2). Ze względu na nierzeczywiste wartości deklarowane w ankietach wykorzystano wartości modelowe, tzn. dystans (DIS) i czasy (TT0 i TTC) policzone po sieci modelowej. Po przeprowadzeniu rozkładu przestrzennego z użyciem jako kosztu podróży dystansu (rys. 1) i drugiego z użyciem czasu w ruchu swobodnym (rys. 2) otrzymano dużą zgodność z wynikami KBR, a R^2 w obu przypadkach wynosił 0,92. Jednakże użycie jako kosztu podróży czasu po obciążonej sieci (rys. 3) dawało mniej satysfakcjonujące wyniki i R^2 wynosił 0,73. Oznacza

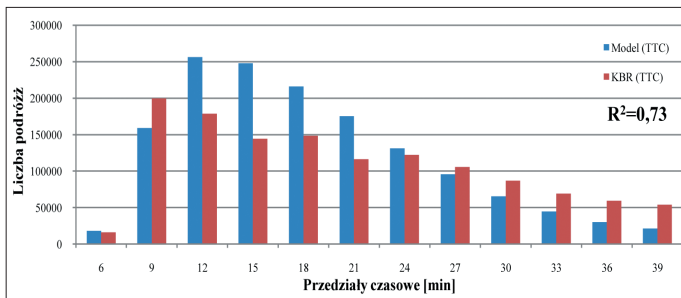


Rys. 1. Rozkłady podróży w dystansie wg modelu i KBR
Źródło: opracowanie własne

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: M. Gągorowska 40%, P. Kojalowicz 40%, R. Kucharski 20%.



Rys. 2. Rozkłady podróży w czasie po nieobciążonej sieci wg modelu i KBR
Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Rozkłady podróży w czasie po obciążonej sieci wg modelu i KBR
Źródło: opracowanie własne

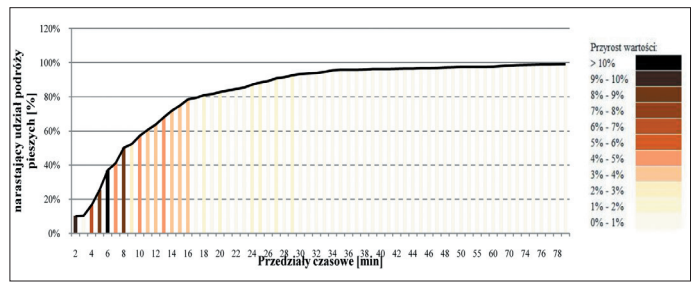
to, że w sytuacji wykorzystania czasu po obciążonej sieci wymagane jest podejście iteracyjne, które może pociągać za sobą zbyt duże nakłady pracy i jest czasochłonne. Wobec tego zdecydowano się na poszukanie innego rozwiązania, które w krótkim czasie dawałoby satysfakcjonujące wyniki rozkładu przestrzennego.

Proponowana macierz kosztów podróży

W toku prac nad modelem ruchu autorzy testowali różne wersje formuły opisującej macierz kosztów. Niniejszy artykuł przedstawia jedynie wariant, który został uznany za najlepszy.

Macierz kosztów używana jest na etapie rozkładu przestrzennego, którego wynikiem są macierze podróży dla poszczególnych motywacji. W związku z tym, że macierze te zawierają wszystkie rodzaje podróży: piesze, samochodem osobowym i komunikacją zbiorową, to właśnie takie typy transportu powinny być zawarte już w macierzy kosztów. W związku z tym formuła ją opisująca powinna uwzględniać czas podróży pieszej, czas podróży samochodem osobowym i czas podróży komunikacją zbiorową. W przypadku podróży samochodem osobowym, ze względu na wspomniane wcześniej iteracyjne podejście wymagane przy użyciu czasu po obciążonej sieci, zdecydowano się na wykorzystanie czasu w ruchu swobodnym.

Rozważania nad formułą opisującą macierz kosztów rozpoczęto od pytania: Kiedy podróż wykonywana jest pieszo? Odpowiedź wydaje się prosta: w większości przypadków kiedy jest ona krótka. Na podstawie KBR ustalono przedział czasowy, w którym następuje spowolnienie przyrostu liczby podróży pieszych (nagły spadek z około 3,5% na mniej niż 1%) i jest to 16 minuta, co prezentuje rysunek 4. Do tego momentu odbywa się około 80% wszystkich podróży pieszych.



Rys. 4. Narastająca suma liczby podróży pieszych i procentowe przyrosty w przedziałach czasowych
Źródło: opracowanie własne

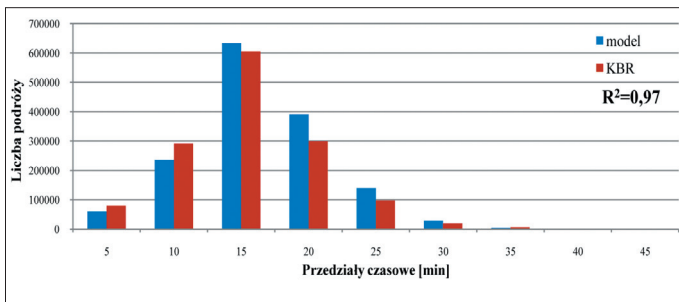
Kolejnym pytaniem, które postawili sobie autorzy było: Kiedy podróż odbywa się samochodem osobowym, a kiedy komunikacją zbiorową? Bardzo prawdopodobne wydaje się stwierdzenie, że w przypadku bezwzględnego porównania czasu trwania podróży z punktu A do punktu B w dużej części przypadków czas podróży samochodem osobowym będzie krótszy niż czas podróży komunikacją zbiorową. Założono jednak, że dłuższy czas podróży transportem publicznym jest akceptowany w podobnym stopniu co krótszy czas podróży samochodem. Wynika to z faktu, że nie wszyscy posiadają prywatny samochód lub mają utrudniony dostęp do miejsc parkingowych w pobliżu celu podróży, decydują się więc na podróż komunikacją zbiorową bez względu na czas jej trwania. Wybór środka transportu może wynikać również z przyzwyczajenia, statusu ekonomicznego, wieku czy bardziej lub mniej proekologicznego stylu życia [1]. Wobec tego przyjęto wskaźnik korygujący, który powoduje, że dłuższy czas podróży komunikacją zbiorową jest porównywalny z krótszym czasem podróży samochodem osobowym. Jest to stosunek średniego czasu podróży komunikacją zbiorową do średniego czasu podróży samochodem osobowym i wynosi on: 19 minut/14 minut. Takie założenia pozwoliły stworzyć wzór macierzy kosztów:

$$M = \begin{cases} M(P) & \text{dla } M(P) < 16 \\ M(KZ) & \text{dla } M(SO) \cdot \frac{19}{14} > M(KZ) \\ M(SO) & \text{dla } M(SO) \cdot \frac{19}{14} \leq M(KZ) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

- $M(P)$ – czas podróży pieszej
- $M(SO)$ – czas podróży samochodem osobowym po nieobciążonej sieci
- $M(KZ)$ – czas podróży komunikacją zbiorową.

Formułę tę należy rozumieć w ten sposób, że jeśli czas pieszy jest mniejszy lub równy 16 minutom, to zawsze wtedy jest wybierany do macierzy kosztów. W pozostałych przypadkach porównuje się ze sobą skorygowany czas podróży samochodem osobowym i czas podróży komunikacją zbiorową. Jeśli krótszy jest ten pierwszy, to do macierzy kosztów wybierany jest czas podróży samochodem osobowym, a jeśli drugi – to czas podróży komunikacją zbiorową. Wynik rozkładu podróży w czasie prezentuje rysunek 5.



Rys. 5. Rozkłady podróży w czasie wg modelu i KBR

Źródło: opracowanie własne

Współczynnik determinacji dla takiego rozkładu podróży w czasie wynosi 0,97. Wobec tego jest najwyższy spośród badanych wariantów.

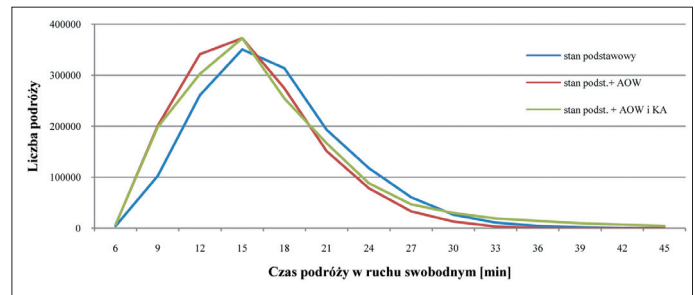
Zmiany w sieci i ich wpływ na czas i dystans podróży

Podczas dalszych prac nad modelem autorom nasunęły się jednak pytania: Która ze wszystkich wspomnianych wcześniej macierzy będzie odpowiednia do opisu stanów prognozowanych? Jak dystans i czas reagują na wprowadzenie do sieci modyfikacji? Poniższy tekst jest wynikiem analiz wrażliwości na zmiany w sieci poszczególnych kosztów podróży. Za wrażliwość uznano zmiany w rozkładzie przestrzennym po wprowadzeniu do istniejącej sieci nowej inwestycji. Im bardziej różnią się od siebie wykresy rozkładów liczby podróży w stanie istniejącym i projektowanym, tym wrażliwość uznano za większą. Pod uwagę wzięto trzy stany sieci transportowej modelu:

1. Stan podstawowy.
2. Stan pośredni – stan podstawowy z dodaną Autostradową Obwodnicą Wrocławia (AOW), czyli zmianą w sieci drogowej.
3. Stan docelowy – stan podstawowy z dodaną AOW i przykładowym rozwiązaniem kolei aglomeracyjnej (KA), czyli jednoczesnymi zmianami w sieci drogowej i kolejowej. Wprowadzenie kolei polegało na uruchomieniu nowych przystanków kolejowych i zamkniętych dotychczas dla ruchu pasażerskiego odcinków torów oraz zwiększeniu dziennej liczby kursów i ich częstotliwości w stosunku do stanu obecnego.

Pierwszą analizą było zbadanie wpływu modyfikacji w sieci na dystans podróży samochodem osobowym, co przedstawia rysunek 6. Po wprowadzeniu do układu AOW można dostrzec zmianę w kształcie wykresu, ponieważ obwodnica, dzięki swoim wysokim parametrom, znacznie skróciła czas podróży. Po wprowadzeniu kolei aglomeracyjnej nastąpiły jedynie drobne zmiany w wykresie w stosunku do stanu pośredniego. Oznacza to, że pomimo wprowadzenia dużych modyfikacji dystans jako koszt podróży nie jest wrażliwy na zmiany w sieci komunikacji zbiorowej. Dodatkowo wszystkie trzy rozkłady swój najwyższy punkt osiągają w tym samym przedziale, czyli do 15 minut.

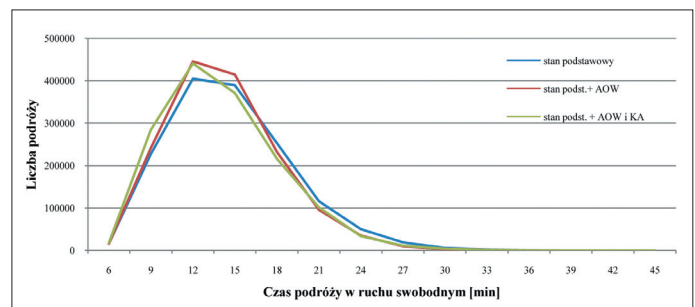
Kolejnym krokiem badania wrażliwości kosztów podróży była analiza wpływu zmian w sieci na czas podróży samochodem osobowym mierzonym w ruchu swobodnym.



Rys. 6. Rozkłady podróży w czasie po nieobciążonej sieci, gdzie za koszt wzięto dystans

Źródło: opracowanie własne

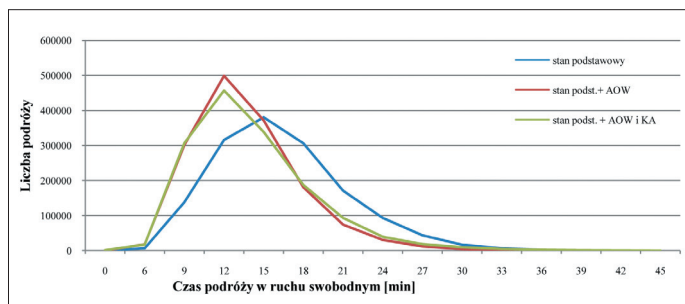
Wyniki analizy przedstawia rysunek 7. W tym przypadku dodanie obwodnicy nieznacznie przesunęło wykres w górę, co oznacza wzrost liczby podróży o krótkim czasie trwania. Również w tym wariantcie dodanie kolei aglomeracyjnej nie spowodowało dużych zmian w wykresie rozkładu podróży, wobec tego czas podróży samochodem osobowym w ruchu swobodnym jest niewystarczająco wrażliwy na modyfikacje w sieci komunikacji zbiorowej. Poza tym, podobnie jak w pierwszej analizie, najwięcej podróży we wszystkich stacjach sieci odbywało się w tym samym przedziale czasowym, czyli do 12 minut.



Rys. 7. Rozkłady podróży w czasie po nieobciążonej sieci, gdzie za koszt wzięto czas podróży po nieobciążonej sieci

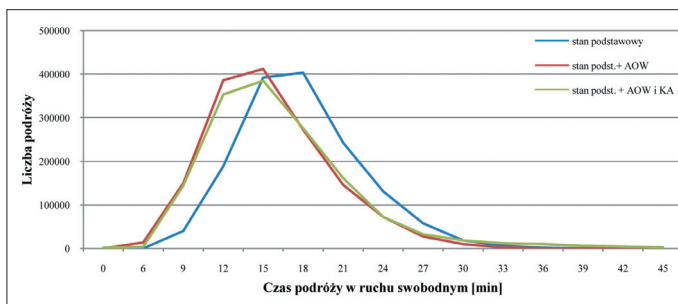
Źródło: opracowanie własne

Trzecia analiza dotyczyła zbadania wrażliwości czasu podróży samochodem osobowym po obciążonej sieci na modyfikacje wprowadzone do tej sieci. Wyniki prezentuje rysunek 8. W tym wypadku można dostrzec wyraźną zmianę w kształcie wykresu po wprowadzeniu do układu AOW. Czasy podróży skróciły się, a ich największy udział przesunął się z 15 na 12 minut. Po uruchomieniu kolei aglomeracyjnej zauważalny jest spadek liczby podróży w szczytowym punkcie, co oznacza, że pojawiło się więcej podróży o dłuższym czasie trwania. Prawdopodobnie znaczy to również, że jakaś część użytkowników sieci przesiadła się z samochodu osobowego na komunikację zbiorową. W związku z tym można stwierdzić, że czas podróży po obciążonej sieci uwzględnia zmiany w elementach sieci dotyczących różnych środków transportu, czyli jest wrażliwy na wprowadzone w tej analizie zmiany. Jednakże ze względu na wspomniane wcześniej podejście iteracyjne stosowane przy rozkładzie opartym na czasie podróży po obciążonej sieci, postanowiono poszukać alternatywnego rozwiązania.



Rys. 8. Rozkłady podróży w czasie po nieobciążonej sieci, gdzie za koszt wzięto czas podróży po obciążonej sieci

Źródło: opracowanie własne



Rys. 9. Rozkłady podróży w czasie po nieobciążonej sieci, gdzie za koszt wzięto macierz zawierającą funkcję czasów podróży różnymi środkami transportu

Źródło: opracowanie własne

Ostatnia analiza badała wrażliwość proponowanej przez autorów macierzy kosztu podróży, zbudowanej z czasów kilku środków transportu. Jej wyniki prezentuje rysunek 9. Widać na nim wyraźne przesunięcie wykresu w lewo po wprowadzeniu AOW, co świadczy o pojawieniu się większej liczby podróży o krótszym czasie trwania. Dodatkowo uruchomienie kolei, podobnie jak w przypadku użycia jako kosztu czasu po obciążonej sieci, spowodowało spadek liczby podróży w szczytowym punkcie. Zwiększyła się natomiast liczba podróży dłuższych, co może sugerować zmianę środka transportu z samochodu osobowego na komunikację zbiorową. Wobec tego macierz, która zawiera koszty podróży różnymi środkami transportu, równocześnie umożliwia otrzymanie równie satysfakcjonujących wyników, co w przypadku macierzy kosztów zawierającej czas podróży samochodem po obciążonej sieci.

Zestawiając ze sobą wyniki wszystkich analiz, można stwierdzić, że dystans podróży i czas podróży samochodem osobowym w ruchu swobodnym mogą nie oddawać zmian w sieci komunikacji zbiorowej. Czas podróży samochodem po obciążonej sieci jest bardziej wrażliwy na zmiany zarówno w sieci drogowej, jak i komunikacji zbiorowej. Reaguje on na zatłoczenie w sieci oraz zmiany środków transportu przez użytkowników. Dla przykładu – im więcej osób wybierze samochód osobowy, tym większe będą korki i dłuższy czas podróży, natomiast im większe korki, tym więcej osób wybierze komunikację zbiorową itd. Wobec tego czas podróży po obciążonej sieci pozwala uwzględnić atrakcyjność połączeń będących alternatywami dla zatłoczonych odcinków, która polega na skróceniu czasu przejazdu względem zakorkowanych połączeń. Równie dobrze na zmiany w sieci reaguje macierz, która zawiera w sobie czasy przejazdu różnymi środkami transportu. Pomimo wykorzystania w niej czasu po nieobciążonej sieci, pozwala ona uzyskać wiarygodny rozkład podróży i dodatkowo pozwala zaoszczędzić czas pracy, bo nie wymaga stosowania podejścia iteracyjnego. Wobec tego autorzy rekomendują ją jako najbardziej odpowiednią do użycia w dystrybucji podróży.

Podsumowanie

Zestawienie wyników wszystkich analiz prezentuje tabela nr 1.

Tabela 1

Podsumowanie analiz				
	DIS	TTO	TCur	Funkcja czasów podróży różnymi środkami transportu
współczynnik determinacji R2	0,92	0,92	0,73	0,97
wrażliwość na zmiany w różnych sieciach transportowych	brak	brak	występuje	występuje

(Źródło: opracowanie własne)

Na ich podstawie autorzy wyciągnęli następujące wnioski:

1. Nie ma jednoznacznej odpowiedzi na pytanie: Co powinno być miernikiem oporu przestrzeni w dystrybucji podróży?
2. Podczas tworzenia modelu prognostycznego należy wybrać taki koszt rozkładu przestrzennego, który jest wrażliwy na zmiany we wszystkich systemach transportowych.
3. Jako koszt podróży w modelach prognostycznych zaleca się użycie jednej z wymienionych niżej macierzy:
 - a. Macierz czasu podróży samochodem osobowym po obciążonej sieci, choć wymaga to zastosowania podejścia iteracyjnego;
 - b. Macierz zawierającą formułę, która uwzględnia czasy podróży wszystkich środków transportu używanych w modelu.

Literatura

1. Birr K., *Analiza zmiennych objaśniających i rozbudowa modelu wyboru środka transportu*, Materiały X Konferencji Naukowo-Technicznej z cyklu: Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, Poznań/Rosnówko 2015.
2. Jastrzębski W., *Dylematy i błędy w modelach prognozowania ruchu*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK RP w Krakowie”, 2014, nr 1.
3. Rudnicki A., *Porównanie modeli podróży wybranych dużych polskich miast*, „Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK RP w Krakowie”, 2014, nr 1.
4. Szarata A., *Struktura regionalnych symulacyjnych modeli transportowych*, Materiały X Konferencji Naukowo-Technicznej z cyklu: Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, Poznań/Rosnówko 2015.
5. Thiem J., Hanelik M. i in., *Kompleksowe Badania Ruchu – Wrocław 2010*, Poznań 2011.