

# Zastosowanie ograniczeń przepustowości sieci transportu publicznego w makroskopowym modelu rozkładu ruchu<sup>1</sup>

**ARKADIUSZ DRABICKI**

mgr inż., Politechnika Krakowska,  
ul. Warszawska 24, 31-155  
Kraków, tel.: +48 12 628 2326,  
e-mail: adrabicki@pk.edu.pl

**RAFAŁ KUCHARSKI**

dr inż., Politechnika Krakowska,  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
tel.: +48 12 628 2326,  
e-mail: rkucharski@pk.edu.pl

**ANDRZEJ SZARATA**

dr hab. inż. prof. PK, Politechnika  
Krakowska, ul. Warszawska 24,  
31-155 Kraków, tel.: +48 12 628  
2326, e-mail: aszarata@pk.edu.pl

**Streszczenie:** Ograniczenia przepustowości sieci transportu zbiorowego są przedmiotem wielu prac badawczych z zakresu modelowania podróży, a jednocześnie były dotąd w niewielkim stopniu wdrożone w modelach symulacyjnych – przykładowo, funkcjonalność ta została zastosowana dopiero w najnowszych wersjach programu PTV VISUM (z ang. *public transport capacity constraints*). W artykule pokazano zmiany zachodzące w rozkładzie ruchu w przykładowych modelach makroskopowych, w których system komunikacji zbiorowej podlega ograniczeniom przepustowości wynikającym z pojemności pojazdów, a także podjęto próbę oceny wiarygodności otrzymanych wyników i możliwości dalszej kalibracji modelu. Model wyboru ścieżki jest domyślnie wypadkową czasów podróży i częstotliwości kursowania, a dodatkowym istotnym czynnikiem może być także zróżnicowanie pojemności (pasażerskiej) pojazdów transportu zbiorowego – np. w przypadku uwzględnienia w modelach ruchu systemów transportowych o zróżnicowanych możliwościach przewozowych (kolej aglomeracyjna, metro, monorail).

**Słowa kluczowe:** transport publiczny, rozkład ruchu, ograniczenia przepustowości, zatłoczenie pasażerskie, PTV VISUM

## Wprowadzenie

Ograniczenia przepustowości sieci transportu zbiorowego (z ang. *public transport capacity constraints*) stanowią coraz istotniejsze zagadnienie we współczesnych sieciach transportowych, zwłaszcza dużych miast i aglomeracji. Narastające zatłoczenie pasażerskie w transporcie publicznym dotyczy nie tylko pojedynczych wydarzeń (np. imprez masowych czy tymczasowego zamknięcia sieci), ale jest także widocznym i nawracającym problemem w codziennym funkcjonowaniu sieci transportowych, przybierając na sile regularnie w godzinach ruchu szczytowego. W [2] zauważono ciekawą analogię do zjawiska dobrze rozpoznanego w systemach transportu indywidualnego: inwestycje w transport zbiorowy, mające na celu podniesienie jego atrakcyjności i możliwości przewozowych, skutkują wzrostem potoków pasażerskich, co przekłada się na wzrost zatłoczenia w sieci (i co za tym idzie, dyskomfortu pasażera). Co ważne, w przypadku największych metropolii często zauważa się, że w dłuższej perspektywie powoduje to pełne wykorzystanie przepustowości systemu transportu zbiorowego – który mimo znacznie wyższej wydajności niż transport drogowy nie jest w stanie podołać stale rosnącemu zapotrzebowaniu

(np. skutek ruchu wzbudzonego) – i konieczna jest dalsza rozbudowa sieci.

W tym miejscu można przywołać przykład sieci transportowej Londynu – a ściślej rzecz biorąc jego dużych projektów inwestycyjnych, w których uwzględnienie pojawiającego się efektu zatłoczenia pasażerskiego zasadniczo zmienia wyniki analiz transportowych. Kosztem ok. 17 miliardów funtów powstaje tzw. *Crossrail* (kolej średnicowa), która ma na celu zwiększyć przepustowości całej sieci transportu zbiorowego aż o 10% – jednakże przewiduje się, że już w 1. roku funkcjonowania pociągi kolei średnicowej będą całkowicie „wypełnione” w godzinach szczytu<sup>2</sup>, a po 10 latach od jej uruchomienia zatłoczenie w skali sieci transportu publicznego Londynu będzie na gorszym poziomie niż obecnie, stąd już teraz należy planować budowę następnej linii (*Crossrail 2*) [1]. Zauważono także, że rozbudowa najbardziej ruchliwej linii metra *Northern Line* i zwiększenie możliwości przewozowych o ok. 30% nie przyniesie poprawy w kontekście poziomów zatłoczenia – które tuż po otwarciu będą na gorszym poziomie niż obecnie [13]. Z badań ankietowych wynika, że zatłoczenie pasażerskie stanowi istotny powód rezygnacji z podróżowania w godzinach szczytu w motywacjach nieobligatoryjnych (w centrum Londynu), a dla 22% podróżnych powoduje to długofalowo zmianę trasy i środka podróży [9]. Co ciekawe, pewna część regularnie podróżujących koleją z obszaru aglomeracji przyznaje, że jest gotowa przejechać 1–2 stacje w przeciwnym kierunku – tylko po to, żeby zająć miejsce siedzące w pociągu w kierunku celu podróży.

Problem zatłoczenia sieci w transporcie publicznym (co prawda w mniejszej skali niż powyżej) można także obserwować w systemach transportowych miast Polski, np. w kontekście rozwijanych systemów kolei aglomeracyjnych czy metra. Problem też może dotyczyć rozwijanych i modernizowanych linii autobusowych oraz tramwajowych, w których zwiększenie atrakcyjności podróżowania (nowoczesne składy, bilet aglomeracyjny, kampania promocyjna) skutkuje większym przepływem pasażerów niż wynika to z konwencjonalnych modeli transportowych. Doświadczenia zebrane z systemów transportowych polskich aglomeracji pokazują, że podniesienie standardu komfortu podróżowania jest istotnym i powracającym postulatem wśród pasażerów

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: A. Drabicki 70%, R. Kucharski 20%, A. Szarata 10%.

<sup>2</sup> Cyt. za sir Peter Handy, wówczas jednego z głównych planistów transportowych Londynu (*Commissioner of Transport for the Metropolis*)

rów – który można opisać funkcją wpływu na dodatkowy przyrost potoków pasażerskich, niewynikającego z samego tylko polepszenia czasów podróży [11].

W tym kontekście poważnym zagadnieniem jest właściwe odwzorowanie środków transportu publicznego w modelach symulacyjnych, a zwłaszcza ich możliwości przewozowych uwarunkowanych pojemnością pojazdów oraz (w pewnym stopniu) zróżnicowania stopnia atrakcyjności, warunkowanego m. in. poziomem (dys)komfortu pasażera. Zagadnienie to, dotychczas pomijane w modelach symulacyjnych, jest obecnie przedmiotem wielu prac badawczych, w ramach których jest wdrażane pilotażowo w algorytmach i testowane na pojedynczych sieciach – jednakże w powszechnie używanych i dostępnych modelach symulacyjnych jest ono dotychczas pomijane lub uwzględnione w sposób relatywnie uproszczony.

Przedmiotem publikacji jest analiza odwzorowania ograniczeń przepustowości transportu zbiorowego w programie PTV VISUM. W pierwszej części przedstawiono w zarysie przegląd literatury związanej z metodą tzw. *implicit capacity constraints*, zastosowaną w algorytmie; w dalszej – wyniki własnych prac symulacyjnych na przykładzie modeli transportowych Rzeszowa i Krakowa; w końcowym etapie podjęto próbę sformułowania wniosków dotyczących wiarygodności i możliwości zastosowania modelu ograniczeń przepustowości transportu zbiorowego (oraz ewentualnej kalibracji) w makroskopowych modelach ruchu w PTV VISUM.

## Przeгляд literatury

Ograniczenia przepustowości stanowią mniej rozpoznane zagadnienie w modelach sieci transportu zbiorowego, w których są one często pomijane lub uwzględniane w sposób uproszczony. W powszechnie stosowanych modelach symulacyjnych (np. PTV VISUM) wybór ścieżki przez pasażera jest wypadkową czasu podróży (i częstotliwości kursowania), natomiast pomija się kwestie fizycznej pojemności pojazdów transportu zbiorowego. Jest to na tyle istotne, że w przeciwieństwie do modeli sieci drogowych modele podaży transportu zbiorowego są bardziej dyskretne (nieciągłe) w kontekście opisujących ich ograniczeń dostępności przestrzennej (punktowo – stacje i przystanki) i czasowej (punktowo – odjazdy pojedynczych pojazdów). Wpływ zatłoczenia pasażerskiego (z ang. *public transport congestion* lub *passenger overcrowding*) na wybór trasy przejazdu można opisać według trzech głównych kategorii [6]:

- ograniczenia fizyczne pojazdów transportu zbiorowego,
- sprzężenie zwrotne między potokami podróży (modelu popytu) a funkcjonowaniem sieci (modelu podaży),
- dyskomfort pasażera w warunkach narastającego zatłoczenia.

W obecnie stosowanych makroskopowych modelach sieci transportu zbiorowego dostępna jest przede wszystkim możliwość odwzorowania ograniczeń przepustowości w sposób uproszczony („niejawny”), tzw. *implicit capacity constraints*. Metoda ta opiera się na analogicznym algorytmie obliczeniowym jak funkcja *VDF* (*volume-delay function*)

dla sieci drogowych – w procedurze iteracyjnej wylicza koszt ścieżki pasażera jako funkcję potoków pasażerskich w stosunku do możliwości przewozowych danych elementów sieci (tzw. *volume-to-capacity ratio*), a ostateczny rozkład ruchu jest wynikiem relatywnych kosztów ścieżek alternatywnych w momencie osiągnięcia stanu równowagi sieci [8]. Funkcja kosztów umożliwia uwzględnienie wpływu zatłoczenia sieci na wybór ścieżki w modelu pod 2 aspektami – dyskomfortu pasażera (*crowding discomfort*) oraz prognozy możliwości przewozowych (*crush capacity*).

W pierwszej kolejności przyrost potoków pasażerskich powoduje stopniowy wzrost kosztu ścieżki, co odzwierciedla rosnący dyskomfort pasażera w warunkach większego zatłoczenia pojazdów transportu publicznego. Uwzględnienie czynnika dyskomfortu służy m.in. pokazaniu tendencji wśród pasażerów do wyboru (w dłuższej perspektywie) mniej zatłoczonych i mniej popularnych połączeń w transporcie zbiorowym, a także dostosowania czasu podróżowania (odjazdu) do przedziałów czasowych, w których pojazdy nie są aż tak wypełnione potokami pasażerskimi (np. wybór wcześniejszych połączeń) [4]. Co więcej, dyskomfort może mieć wpływ nie tylko na wybór ścieżki, ale długofalowo także i na wybór środka podróży – co pokazują badania prowadzone wśród pasażerów systemów kolei aglomeracyjnej [12], [15]. Zasadniczo wpływ dyskomfortu uwzględnia się jako dodatkowy mnożnik czasu przejazdu (tj. sumy czasów spędzonych w pojazdach). Wartość mnożnika dyskomfortu w literaturze podaje się w przedziale około 1,2–1,7 czasu przejazdu [7], [11], a jej wartość rośnie stopniowo wraz z potokiem pasażerskim. W szczegółowych analizach [12] podkreśla się, że współczynnik dyskomfortu należy różnicować m.in. osobno dla pasażerów siedzących i stojących, a także ze względu na długość i odległość podróży.

Powyżej wartości progowej równej możliwości przewozowej danego odcinka sieci transportu publicznego następuje gwałtowny przyrost kosztu ścieżki, często o rząd wielkości większy niż w poprzednim przedziale funkcji; próg ten w literaturze nazywany jest *crush capacity*. Osiągnięcie prognozy możliwości przewozowej nie blokuje możliwości pojawienia się kolejnych pasażerów, ale w takim przypadku koszt ścieżki powinien osiągnąć wartość na tyle „zaporową”, że jej atrakcyjność (oraz prawdopodobieństwo wyboru przez każdego kolejnego pasażera) gwałtownie spadnie – „zmuszając” niejako pasażerów do wyboru innej alternatywy podróży. [14] podaje przykładowo wartość mnożnika kosztu ścieżki równą 10,0. Wartość *crush capacity* jest przyjmowana umownie dla każdego typu pojazdu i określana najczęściej w odniesieniu do liczby miejsc siedzących w jeździe ([3], [14]).

W pracach badawczych podkreśla się różnice w wynikach rozkładu ruchu na sieć transportu zbiorowego pomiędzy modelami niewrażliwymi na zatłoczenie pasażerskie a modelami uwzględniającymi ograniczenia przepustowości. W [12] zauważono, że brak uwzględnienia czynnika dyskomfortu skutkuje pominięciem istotnego wpływu zatłoczenia na udział danego środka transportu w codziennych podróżach i podaje przykład kolei aglomeracyjnej w Sydney: w modelu

niewrażliwym (tj. bez dyskomfortu) udział w podróżach wynosi niezmiennie około 5,5%, podczas gdy w modelu wrażliwym na dyskomfort waha się od 2,5% do 8% w zależności od wartości opisującej tzw. *volume-to-capacity ratio*. Wyniki przedstawione przez [14] dla systemu transportowego Hagi wskazują na ważne różnice pojawiające się przy zastosowaniu ograniczeń przepustowości metodą *implicit capacity constraints* i wprowadzenia zróżnicowanej pojemności pojazdów autobusowych i tramwajowych. W pierwszym przykładzie zwiększenie częstotliwości kursowania linii tramwajowej (z 6 do 8 pojazdów/godz.) prognozowany przyrost potoków wynosi 240 pasażerów/godzinę (tj. z funkcją zatłoczenia) zamiast dotychczasowych 165 pasażerów/godzinę (bez zatłoczenia). W drugim przypadku założono zastąpienie linii autobusowej połączeniem tramwajowym i spadek częstotliwości kursowania w korytarzu z 8 do 6 pojazdów/godzinę i pokazano ciekawą korelację: w modelu symulacyjnym bez zatłoczenia obserwuje się nieznaczny spadek popytu w wysokości 50 pasażerów w ciągu dnia roboczego, jednakże w przypadku uwzględnienia możliwości przewozowych taboru – potoki pasażerskie nieznacznie wzrastają w godzinach szczytu, a sumaryczny wzrost wynosi 260 pasażerów w ciągu dnia roboczego. Wyższa pojemność tramwaju kompensuje spadek częstotliwości kursowania, a także wykazuje większą atrakcyjność dla potencjalnych pasażerów w kontekście komfortu podróży. W przeprowadzonych analizach dla systemu kolei w Szwajcarii [8] przy uwzględnieniu stopnia zatłoczenia pasażerskiego wyniki symulacji wykazują dodatkowy przepływ potoków między kolejną regionalną i dalekobieżną w godzinie szczytu a zastosowanie algorytmu *implicit capacity constraints* zmniejsza skalę przeszacowania potencjału pasażerskiego o 30%, dając rezultat bliższy stanowi rzeczywistości.

Uwzględnienie czynnika ograniczeń przepustowości sieci transportu zbiorowego wprowadza zatem kolejną istotną zmienną w wyborze ścieżki i środka podróży w modelach symulacyjnych. Jak pokazują powyższe przykłady, zastosowanie nawet relatywnie uproszczonego podejścia w modelach większych sieci transportowych, jakim jest metoda *implicit capacity constraints*, pozwala odwzorować pewne różnice pojawiające się w przepływach podróży – w zależności od użytego algorytmu symulacyjnego.

### Model ograniczenia przepustowości transportu zbiorowego w PTV VISUM

Ograniczenie przepustowości sieci transportu zbiorowego metodą *implicit capacity constraints* zostało udostępnione w najnowszych wersjach modelu makroskopowego PTV VISUM (tj. począwszy od wersji 12.5) i możliwa jest do zastosowania tylko dla modelu bazującego na rozkładach jazdy, tzw. *timetable-based assignment*. W procedurze tej ograniczenie przepustowości sieci pojawia się na kolejnym etapie po wyszukiwaniu i preselekcji dostępnych połączeń źródło-cel (*connection search*), kiedy obliczany jest opór (*impedance*) indywidualnych ścieżek – jako dodatkowy mnożnik w funkcji oporu ścieżki opisywany w odniesieniu do stosunku potoków pasażerskich do zakładanej przepustowości

danego połączenia tzw. *Vol/Cap ratio-dependent impedance*. Parametr ten oznaczony jest w dalszej części algorytmu symbolem  $WV$  i obliczany jest jako iloraz  $AV$  potoku pasażerskiego do możliwości przewozowej (w pas.) na danym odcinku pojedynczego kursu (tj. *vehicle journey item*). W kolejnym etapie tak wyliczona wartość oporu ścieżki jest podstawą obliczenia modelu wyboru ścieżki (*connection choice*). W tym miejscu w algorytmie uwzględniającym *capacity constraints* pojawia się procedura iteracyjna analogiczna do funkcji *VDF* w modelach transportu indywidualnego przebiegająca w następujących krokach:

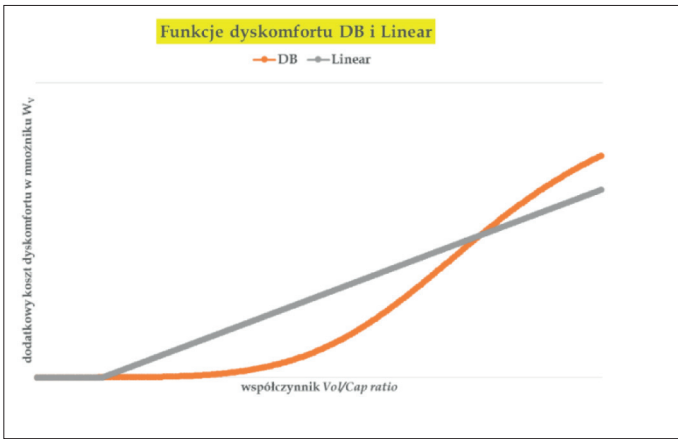
- na etapie wyszukiwania połączeń opcjonalnie można założyć ponowne przeszukanie sieci, z uwzględnieniem współczynnika *Vol/Cap ratio* w koszcie ścieżki – pozwala to zaktualizować sieć wyszukanych połączeń o alternatywy wcześniej niewidoczne, które teraz mogą być bardziej „atrakcyjne”;
- opór ścieżki jest wyliczany najpierw niezależnie od funkcji ograniczenia przepustowości, a następnie zwiększony w odniesieniu do bieżącej wartości  $W_v$  w danej iteracji; dodatkowa opcja algorytmu pozwala na zniwelowanie efektu oscylacji pomiędzy najbardziej zatłoczonymi ścieżkami w kolejnych iteracjach – m.in. metodą interpolacji lub metodą kolejnych średnich;
- na etapie wyboru ścieżki następuje rozkład potoków pasażerskich na sieć zgodnie z przyjętą funkcją probabilistyczną – i w oparciu o zaktualizowane parametry zatłoczenia sieci  $W_v$ ;
- następuje sprawdzenie kryterium zbieżności wyników potoków pasażerskich na połączeniach w sieci: jeżeli różnice wartości  $A_v$ ,  $W_v$  w porównaniu do poprzedniej iteracji są większe od zadanej wartości progowej lub nie osiągnięto wymaganej liczby iteracji, algorytm powraca do etapu obliczania oporu ścieżki.

Ostateczne potoki pasażerskie w modelu sieci transportu zbiorowego otrzymuje się po osiągnięciu wymaganego stanu równowagi w kolejnych iteracjach.

W algorytmie PTV VISUM dostępne są trzy funkcje opisujące wartość mnożnika  $W_v$  w stosunku do poziomów zatłoczenia sieci transportu zbiorowego  $A_v$ . Funkcja DB oraz funkcja liniowa (rysunek 1) pozwalają zamodelować pojawiający się efekt dyskomfortu w stosunku do zwiększającego się poziomu napełnienia pojazdu, natomiast nie pozwalają na wprowadzenie skokowej zmiany wartości w celu potencjalnego „odcięcia” potoków pasażerskich powyżej danej wartości. Ponadto, jak pokazują wyniki symulacji przeprowadzonych przez jednego z autorów na przykładowej sieci [5], zastosowanie funkcji liniowej może skutkować proporcjonalnie zbliżonym przyrostem potoków na wszystkich alternatywach – tj. wynik rozkładu ruchu może być bardziej zbliżony do modelu bez ograniczeń przepustowości sieci.

Dodatkowa funkcjonalność pojawia się w funkcji SBB, w której możliwe jest opisanie trzech następujących przedziałów przyrostu mnożnika  $W_v$  [8]:

- powolny, ale stopniowy (wykładniczy) wzrost poziomu dyskomfortu w pierwszym interwale;



Rys. 1. Krzywe funkcji zatłoczenia sieci typu DB oraz liniowej (Linear) w modelu PTV VISUM  
Źródło: [10]

- skokowy wzrost wartości  $W_v$  w interwale środkowym (przejściowym);
- stała wartość mnożnika dyskomfortu w końcowym interwale – niezależnie od  $A_v$ .

Wprowadzenie dwóch ostatnich przedziałów w funkcji SBB pozwala teoretycznie na zamodelowanie efektu tzw. *crush capacity* i drastyczne zwiększenie kosztu dyskomfortu w warunkach nominalnego przekroczenia możliwości przewozowych sieci – a także powolny przyrost funkcji kosztu jeszcze w warunkach nieprzekroczonej pojemności pojazdu. Z tego względu parametry funkcji SBB wydają się najbardziej zbliżone do założeń *implicit capacity constraints* w innych pracach naukowych i odpowiednie do odwzorowania efektu ograniczeń przepustowości w modelu makroskopowym PTV VISUM.

### Wyniki symulacji w modelach miejskich sieci transportowych – Kraków, Rzeszów

W celu określenia wpływu uwzględnienia dyskomfortu i ograniczeń przepustowości sieci transportu zbiorowego przeprowadzono badania symulacyjne na modelach transportowych miast Krakowa i Rzeszowa zakodowanych w PTV VISUM. Dla obydwu miast przeanalizowano trzy warianty stanu (rozwoju) sieci transportowej, w których podstawowym celem była obserwacja zmian w rozkładzie ruchu na sieć miejskiego transportu zbiorowego, a ściślej mówiąc – różnic w przepływie potoków pasażerskich pomiędzy poszczególnymi systemami transportu (autobus, tramwaj, metro lub monorail) dla przyjętych wartości pojemności przewozowej taboru komunikacji zbiorowej (tabela 1) oraz zmian sumarycznych parametrów funkcjonowania sieci (prace przewozowe, czas podróży).

Tabela 1

| Pojemności pojazdów transportu zbiorowego przyjęte w modelach PTV VISUM dla Krakowa i Rzeszowa |                |                    |                |                            |
|--|----------------|--------------------|----------------|----------------------------|
| Max. pojemność (pas.)  | Autobus zwykły | Autobus przegubowy | Tramwaj        | Tramwaj wydłużony          |
|  | 100            | 180                | 200            | 250                        |
|  | Pociąg (kolej) | Mikrobus           | Pociąg (metro) | Kolej nadziemna (monorail) |
|  | 1050           | 50                 | 1400           | 70                         |

Źródło: opracowanie własne

W każdym z wariantów sieci oceny dokonano na podstawie porównania wyników symulacyjnych pomiędzy:

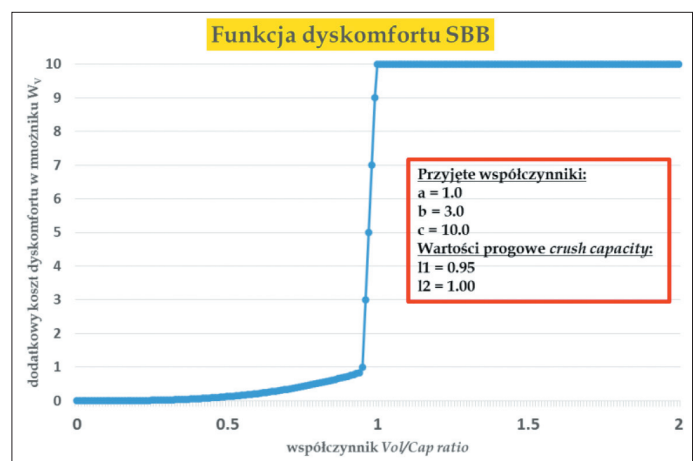
- modelem rozkładu ruchu niewrażliwego na zatłoczenie pasażerskie (tj. standardowa procedura symulacyjna PTV VISUM),
- modelem rozkładu ruchu wrażliwym na zatłoczenie pasażerskie – metodą *implicit capacity constraints* – funkcja kosztów (dyskomfortu) SBB.

W rozkładzie ruchu na sieć transportu zbiorowego uwzględnienie zatłoczenia sieci możliwe jest tylko w procedurze bazującej na rozkładach jazdy (*timetable-based assignment*), którą zastosowano w każdym wariantcie symulacji. W równaniu oporu ścieżki przypisano dwukrotną „karę” dla czasów oczekiwania oraz czasów przejścia pieszego (pozostawiając jednokrotność dla czasów przejazdu), a także zmniejszono „karę” czasową przypisaną do liczby przesiadek.

W symulacjach uwzględniających efekty zatłoczenia na etapie rozkładu ruchu w sieci przyjęto funkcję kosztów zatłoczenia typu SBB (opisanej przez [8]), która pozwala odwzorować efekt analogiczny do funkcji *VDF* ograniczających przepustowość sieci drogowej w modelach makroskopowych. Założona parametryzacja funkcji SBB (rysunek 2) reprezentuje następujący wpływ wzrastających potoków pasażerskich na mnożnik kosztów czasu przejazdu  $W_v$ :

- w niskich przedziałach napełnienia pojazdów transportu zbiorowego wpływ dyskomfortu jest marginalny: przy *Vol/Cap ratio* równym 0,50 wartość  $W_v$  wynosi około 1,1;
- w wyższych przedziałach koszt dyskomfortu wzrasta w sposób wykładniczy: dla *Vol/Cap ratio* równego 0,70 mnożnik  $W_v$  osiąga wartość około 1,3, a przy współczynniku napełnienia 0,90 wynosi już 1,7;
- gdy poziom potoku pasażerskiego osiąga zakładane możliwości przewozowe (*crush capacity*), wartość mnożnika  $W_v$  wzrasta skokowo do stałej wartości 11,0.

W równaniu funkcji SBB współczynniki  $a$ ,  $b$  opisują stopniowy, wykładniczy wzrost dyskomfortu analogicznie jak w funkcji DB powyżej. Współczynnik  $c$  opisuje stałą wartość kosztu powyżej pewnego przedziału, a przyjmowa-



Rys. 2. Przyjęta parametryzacja funkcji zatłoczenia sieci typu SBB w modelu PTV VISUM  
Źródło: opracowanie własne na podst. [10]

ne współczynniki progowe  $l_1$ ,  $l_2$  odnoszą się do wartości  $Vol/Cap$  ratio, przy których następuje skokowa zmiana funkcji kosztu dyskomfortu (rysunek 2).

W opisanych poniżej wariantach symulacyjnych opisano najważniejsze wyniki w rozkładzie ruchu w przypadku zastosowania funkcji zatłoczenia sieci transportu zbiorowego – w kontekście następujących zagadnień:

- symulacja dla stanu istniejącego i zgodność potoków z wynikami pomiarów,
- zwiększenie popytu (macierz podróży) oraz zmniejszenie podaży (takt kursowania) w modelu transportu zbiorowego,
- wprowadzenie w danym korytarzu nowego środka transportowego o wysokim takcie kursowania oraz małej (monorail) lub dużej (metro) pojemności pasażerskiej.

Poniżej zestawione plansze przedstawiają pojawiające się różnice w potokach pasażerskich, które opisano kolorem zielonym (tj. spadek ruchu w modelu z zatłoczeniem sieci) oraz kolorem czerwonym (tj. wzrost ruchu w modelu z zatłoczeniem sieci). Obrazowo można te porównania interpretować jako „ryzyko” niedoszacowania (kolor czerwony) lub przeszacowania (kolor zielony) potencjału pasażerskiego w przypadku nieuwzględnienia ograniczeń przepustowości sieci transportu zbiorowego.

### Stan obecny sieci i zmiany w rozkładzie potoków pasażerskich (Kraków)

Dla symulacji przeprowadzonym w modelu transportowym Krakowa w stanie aktualnym na 2014 rok (rysunek 3), w modelu uwzględniającym funkcję zatłoczenia sieci obserwuje się spadek liczby pasażerów na najbardziej popularnych ciągach autobusowych (Aleje Trzech Wieszców, Opolska, Pilotów, Nowohucka). W porównaniu z modelem niewrażliwym na zatłoczenie potok pasażerski spada na pojedynczych odcinkach maksymalnie o 200–400 pasażerów – chociaż widoczne są także niewielkie przyrosty liczby pasażerów w korytarzu kilku linii autobusowych (29 Listopada, Dobrego Pasterza, Księcia Józefa). Wzrasta liczba pasażerów na ciągach tramwajowych, które obsługują bardzo podobne relacje podróży co ww. korytarze autobusowe – potoki pasażerskie w tramwajach wzrastają tam odcinkowo o 200–300 pasażerów (Wielicka, Starowiślna,



Rys. 3. Zmiany potoków (pas./godz.) w sieci autobusowej (po lewej) oraz w sieci tramwajowej (po prawej) w wyniku zastosowania funkcji zatłoczenia sieci – Kraków, model bazowy  
Źródło: opracowanie własne

Westerplatte, Dietla, Pokoju). Spadek liczby pasażerów w tramwajach widoczny jest za to na odcinku Tunel KST–Rondo Grzegórzeckie (jeden z najbardziej obciążonych odcinków w sieci tramwajowej Krakowa) oraz wzdłuż ulicy Mogiłskiej, z której duża część potoku pasażerskiego „przenosi” się na równoległą aleję Pokoju.

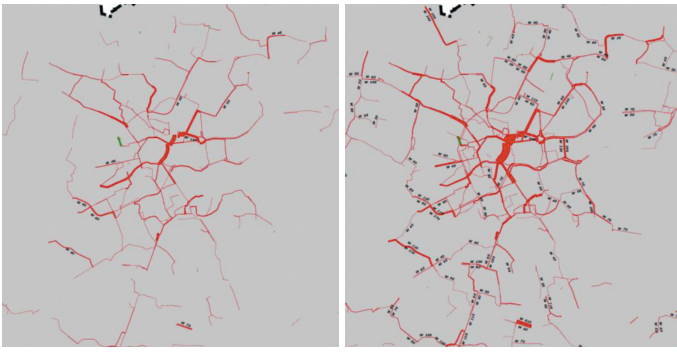
Można zatem zaobserwować, że na pewnych odcinkach z dużym natężeniem ruchu potoki podróży przenoszą się na odcinki równoległe o mniejszym stopniu wykorzystania – a także widać tendencję wzrostu udziału komunikacji tramwajowej, cechującej się wyższą pojemnością (pas.) niż pojazdy autobusowe. Spada wykorzystanie komunikacji autobusowej (o 4,0%), ale w drobnym stopniu także i tramwajowej (o 0,5%). Skompensowane jest to przede wszystkim wzrostem przemieszczeń pieszych – odległości pokonywane pieszo rosną aż o 32% w całym modelu, a drobne wzrosty potoków pieszych można obserwować na większym obszarze miasta. W wartościach bezwzględnych średni czas przejścia rośnie o 1 minutę, co nie ma istotnego przełożenia na średni czas podróży (zmiana z 36 do 37 minut). Maleje także liczba podróży z przesiadkami, o około 8%.

Sumarycznie parametry podziału zadań przewozowych oraz prędkości przejazdu nie ulegają zmianie w modelu – zgodnie z przyjętymi założeniami funkcja zatłoczenia sieci pojawia się dopiero na ostatnim etapie rozkładu ruchu na sieć. Zmiany wynikające z przepływu potoków w sieci komunikacji zbiorowej skutkują za to minimalnie lepszą korelacją z wynikami pomiarów w autobusach i tramwajach miejskich: w modelu wrażliwym na zatłoczenie sieci parametr  $R^2$  rośnie z 0,82 do 0,83.

### Wzrost popytu pasażerskiego (Kraków)

W kolejnym wariantcie założono dwukrotny wzrost macierzy podróży pasażerskich w modelu stanu istniejącego sieci transportowej Krakowa (opisanej powyżej) i dokonano analogicznego porównania w wyniku wdrożenia funkcji zatłoczenia sieci. Tak jak i w modelu bazowym najbardziej są widoczne różnice w potokach pasażerskich (autobusowych, tramwajowych) oraz potokach pieszych. Spadki liczby pasażerów na trzech głównych ciągach autobusowych sięgają maksymalnie 2000 pasażerów/godz. i pojawiają się teraz (w mniejszej skali) na innych liniach w obrębie Krakowa. Obserwuje się za to wzrost potoków wzdłuż alei 29 Listopada oraz ulicy Nowohuckiej, które wydają się znacząco kompensować spadki pasażerów w autobusach jeżdżących wzdłuż ulicy Pilotów. Analiza potoków podróży w tramwajach wykazuje pewne przyrosty pasażerów w sieci (np. na obwodnicy Plant), ale wyraźna jest także skala spadków natężeń ruchu na wcześniej już obserwowanych ciągach (Tunel KST–Rondo Grzegórzeckie, ulica Mogiłska), z różnicami sięgającymi 2500 pasażerów/godzinę.

Wzrost popytu pasażerskiego skutkuje (w kontekście porównania prac przewozowych) spadkiem wykorzystania obydwu systemów komunikacji miejskiej w Krakowie, o 5% (tramwaje) i o 10% (autobusy) oraz dalszą redukcją liczby podróży z przesiadkami. Widoczne są jeszcze większe zmia-



Rys. 4. Wzrost potoków przemieszczeń pieszych w modelu bazowym Krakowa (po lewej) oraz w wariantcie wzrostu popytu pasażerskiego (po prawej) w wyniku zastosowania funkcji zatłoczenia sieci

Źródło: opracowanie własne

ny w podróżach pieszych na mapie Krakowa niż w modelu bazowym na 2014 rok (rysunek 4), a odległości pokonywane pieszo rosną o 96% w porównaniu z modelem niewrażliwym na zatłoczenie sieci.

### Budowa systemu tramwajowego oraz redukcja sieci autobusowej (Rzeszów)

W kolejnym wariantcie założono budowę nowego systemu tramwajowego w obszarze Rzeszowa, który w modelu bazowym (niewrażliwym na zatłoczenie) wykazuje duży potencjał przewozowy i przejmuje istotną część potoków pasażerskich w miejskim systemie transportowym. W celu weryfikacji przepływów potoków pomiędzy systemem tramwajowym i autobusowym przeanalizowano dwa warianty układu sieci autobusowej: w pierwszym dokonano redukcji operacji przewozowych (w wozokilometrach) o 50% na całej sieci, w drugim pozostawiono dotychczasową siatkę połączeń bez zmian.

Przy uwzględnieniu ograniczeń *implicit capacity constraints* w pierwszym wariantcie (redukcja sieci autobusowej) porównanie pokazuje spadek pracy przewozowej w wysokości 6% dla systemu autobusowego i minimalny wzrost (0,5%) dla systemu tramwajowego. Widoczne są spadki potoków pasażerskich w autobusach na większym obszarze miasta, głównie na odcinkach radialnych, wzdłuż których wzrasta (w mniejszym stopniu) liczba pasażerów w tramwajach (rysunek 5). Różnice te wynoszą w skrajnym przy-



Rys. 5. Zmiany potoków (pas./godz.) w sieci autobusowej (po lewej) oraz w sieci tramwajowej (po prawej) w wyniku zastosowania funkcji zatłoczenia sieci – Rzeszów, model tramwajowy z redukcją linii autobusowych

Źródło: opracowanie własne

padku do 400 pasażerów/godzinę (w kierunku) i są relatywnie większe na obszarach przedmiejskich. Obserwuje się za to spadek potoków pasażerskich w tramwajach na jednym z odcinków obwodnicy śródmieścia Rzeszowa – co w pewnym stopniu jest skorelowane z nieznacznym wzrostem liczby podróży pieszych, głównie skoncentrowanych w centrum miasta (przyrost odległości pokonywanych pieszo wynosi 21%).

W drugim wariantcie (pozostawienie istniejącej sieci autobusowej) widoczna jest za to odwrotna tendencja w wykorzystaniu systemów transportowych (mierzonych pracą przewozową): dla autobusów wzrasta o 2%, a dla tramwajów maleje o 6% w porównaniu z modelem niewrażliwym na zatłoczenie sieci (rysunek 6). W sieci tramwajowej odnotowuje się teraz niewielkie spadki na całej obwodnicy śródmieścia, ale bardziej dostrzegalny jest spadek potoku pasażerów na odcinku wlotowym od strony zachodniej (maksymalnie 650 pasażerów/godzinę w kierunku), który rozprowadza się na dwa równoległe korytarze autobusowe. Jedynie na dwóch odcinkach radialnych widoczne są przyrosty pasażerów na liniach tramwajowych. W sieci autobusowej dodatkowe przyrosty potoków pasażerskich (o wartości rzędu 100–200 pasażerów) są rozproszone na większym obszarze miasta. Widoczny jest także efekt spadku potoku pasażerskiego na wysoce obciążonym korytarzu autobusowym (wlot wschodni do miasta) i przeniesienie się ruchu na dwie linie autobusowe w obszarze lokalnym. Także i w tym wariantcie rośnie udział przemieszczeń pieszych i maleje liczba przesiadek (o 8%).



Rys. 6. Zmiany potoków (pas./godz.) w sieci autobusowej (po lewej) oraz w sieci tramwajowej (po prawej) w wyniku zastosowania funkcji zatłoczenia sieci – Rzeszów, model tramwajowy z pozostawieniem linii autobusowych bez zmian

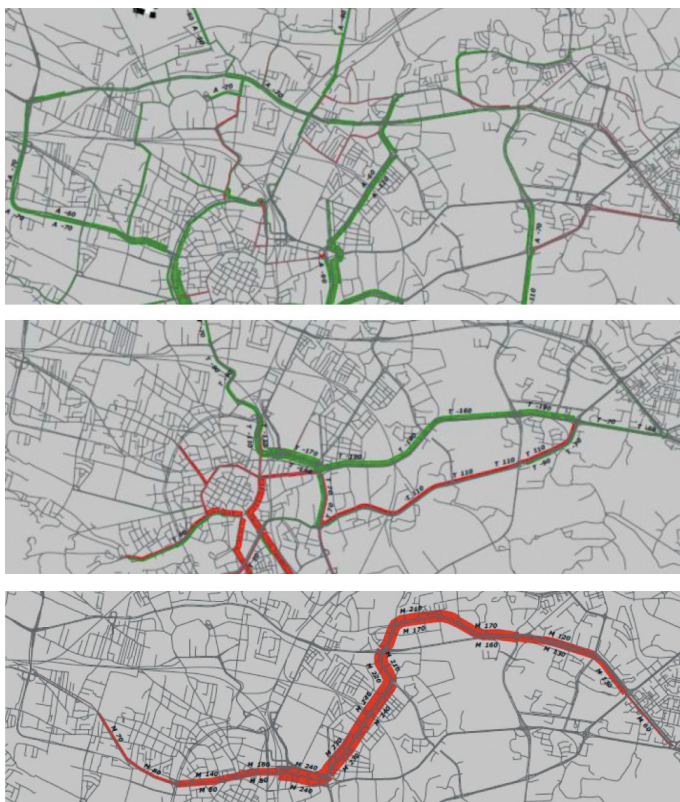
Źródło: opracowanie własne

### Zróznicowanie możliwości przewozowych kolei naziemnej (Rzeszów) oraz metra (Kraków)

W ostatnim etapie przeprowadzono analizy symulacyjne dla dwóch wariantów, w których zastosowanie *implicit capacity constraints* wydaje się mieć najistotniejszy wpływ na wyniki rozkładu ruchu. Warianty te opisują rozwój nowych środków transportu o wysokiej częstotliwości kursowania, tj. co 4 minuty. Co ważne, wiąże się to także z wprowadzeniem w danym korytarzu systemu transportowego o zasadniczo innej możliwości przewozowej niż dla konwencjonalnych systemów transportu miejskiego. Uwzględnienie ograniczeń przepustowości sieci pozwoli teraz zamodelo-

wać także wpływ pojemności pojedynczego pociągu metra (1500 pas.) oraz wagonu kolei monorail (70 pas.) w odniesieniu do autobusów i tramwajów mieszczących jednorazowo 100–250 pasażerów.

W wariantcie budowy 1 linii metra w Krakowie w relacji zachód–wschód (Bronowice – Centrum – Nowa Huta) wykorzystanie funkcji zatłoczenia sieci skutkuje wzrostem wykorzystania linii metra o 11%, kosztem systemu autobusowego (spadek o 5%) oraz tramwajowego (spadek o 1%). W porównaniu z modelem niewrażliwym na zatłoczenie sieci potok pasażerski rośnie na odcinku metra do 250 pas./godz. w jednym kierunku (rysunek 7) i wydaje się przede wszystkim przejmować potoki z linii autobusowych na równoległych trasach (Pilotów, Opolska, Armii Krajowej), a także z odcinków ulic, na których dotychczas obserwowano minimalne przyrosty liczby pasażerów (29 Listopada, Miechowity). Mniejsze zmiany są widoczne w systemie tramwajowym, w którym wprowadzenie linii metra nie wydaje się skutkować spadkiem liczby pasażerów, ale za to niweluje obserwowane wcześniej przyrosty liczby pasażerów wzdłuż ulicy Mogiłskiej i alei Pokoju (por. rysunki 7 z 3).



Rys. 7. Zmiany potoków (pas./godz.) w sieci autobusowej (u góry) oraz w sieci tramwajowej (w środku) w korytarzu analizowanej linii metra w Krakowie (u dołu) – w wyniku zastosowania funkcji zatłoczenia sieci

Źródło: opracowanie własne

W wariantcie budowy drugiej linii kolei nadziemnej (monorail) w Rzeszowie o przebiegu średnicowym obserwuje się za to odwrotny trend w przepływie pasażerów w systemach transportu zbiorowego (rysunek 8). Wskutek uwzględnienia ograniczonej pojemności wagonów wykorzystanie systemu monorail maleje o 10%, a dla systemu



Rys. 8. Zmiany potoków (pas./godz.) w sieci autobusowej (po lewej) w korytarzu analizowanych linii monorail w Rzeszowie (po prawej) – w wyniku zastosowania funkcji zatłoczenia sieci

Źródło: opracowanie własne

autobusowego minimalnie wzrasta o około 1%. Największe spadki potoków pasażerskich widoczne są na odcinkach śródmiejskich, gdzie liczba pasażerów monorail maleje maksymalnie o 350 pas./godz. w kierunku – kosztem niewielkich przyrostów pasażerów linii autobusowych (np. wzdłuż al. Rejtana) oraz podróży pieszych w centrum miasta. W systemie autobusowym liczba pasażerów wzrasta w dwóch korytarzach dojazdu z dwóch największych osiedli, równoległe do odcinków sieci monorail. Korelacja ta jest odwrócona tylko w jednym przypadku, tj. wlotu do Rzeszowa wzdłuż ulicy Lubelskiej – gdzie pewna liczba pasażerów (do 300 pas. na odcinku) przenosi się z komunikacji autobusowej na linię monorail. Prawdopodobnie ma to związek z większym stopniem napełnienia autobusów dojeżdżających z obszaru podmiejskiego, wobec których relatywnie puste wagony monorail stanowią konkurencyjną alternatywę w tym korytarzu. Wzrost przemieszczeń pieszych utrzymuje się na poziomie około 17%.

## Podsumowanie

Powyżej opisane przykłady wskazują na pewne zmiany zachodzące w wynikach symulacji w przypadku zastosowania ograniczeń przepustowości sieci transportu zbiorowego metodą *implicit capacity constraints*, jaka jest dostępna w makroskopowym algorytmie PTV VISUM (tabela 2). Różnice te dotyczą przede wszystkim rozkładu potoków pasażerskich w modelu sieci, w pewnym stopniu wpływają także na parametry podróży (spadek liczby przesiadek i wzrost przemieszczeń pieszych), jednak uśredniony czas podróży nie ulega większej zmianie. Zmiany te pojawiają się przy zastosowaniu ograniczeń przepustowości w modelu bazowym i mogą wykazywać inne tendencje przepływu potoków w przypadku zmian po stronie modelu popytu lub modelu podaży w porównaniu z modelami niewrażliwymi na zatłoczenie w sieci. W pewnych obszarach sieci można zaobserwować odpływ potoków pasażerskich z najbardziej obciążonych korytarzy autobusowych i ich relatywny przyrost na równoległych, mniej popularnych alternatywach

Tabela 2

| Wpływ funkcji zatłoczenia sieci na wyniki rozkładu ruchu w transporcie zbiorowym – podsumowanie symulacji |   |                      |  |                 |                 |                           |
|---|---|----------------------|--|-----------------|-----------------|---------------------------|
| Warianty symulacyjne  | Średnie parametry podróży (JourneyTime) |                      | Zmiany prac przewozowych w wyniku zastosowania funkcji zatłoczenia sieci (PassTrips) |                 |                 |                           |
|   | Czas podróży [mm:ss]                    |                      | Odległości piesze  | Siec autobusowa | Siec tramwajowa | System metra lub monorail |
|   | model bez zatłoczenia                   | model z zatłoczeniem | Δ [%]  | Δ [%]           | Δ [%]           | Δ [%]                     |
| Kraków – model bazowy   | 36:15                                   | 37:25                | + 32,1%  | - 4,4%          | - 1,4%          | -                         |
| Kraków – wzrost popytu pas.   | 35:34                                   | 38:34                | + 95,9%  | - 10,5%         | - 5,3%          | -                         |
| Kraków – budowa linii metra   | 36:11                                   | 37:09                | + 26,2%  | - 4,9%          | - 1,5%          | + 10,6%                   |
| Rzeszów – system tramwaju   | 31:13                                   | 32:21                | + 18,8%  | + 1,9%          | - 5,8%          | -                         |
| Rzeszów – system tramwaju, redukcja sieci autobusowej   | 30:56                                   | 32:05                | + 20,6%  | - 5,7%          | + 0,6%          | -                         |
| Rzeszów – budowa systemu monorail   | 33:45                                   | 35:02                | + 16,6%  | + 1,2%          | -               | - 9,6%                    |

Źródło: opracowanie własne

– a także przeniesienie się części podróży na linie tramwajowe.

Wyraźne zmiany w rozkładzie ruchu pojawiają się w przypadku analiz symulacyjnych dla środków transportowych o dużo bardziej zróżnicowanych możliwościach przewozowych od autobusu czy tramwaju. Uwzględnienie czynnika możliwości przewozowych w równaniu oporu ścieżki pokazuje, że potencjał pasażerski w korytarzu linii kolejowych (aglomeracyjnych, metra) lub mniej konwencjonalnych systemów (monorail) może być bardziej zróżnicowany niż wynikałoby to tylko z samego czynnika czasu podróży. W powyższych symulacjach w wariancie *implicit capacity constraints* na centralnym odcinku metra przybyło ok. 250 pas./godz. w kierunku, tj. o dodatkowe 5% pasażerów – a w systemie monorail potok na najbardziej obciążonym odcinku zmalał aż o 40%. Co ciekawe, zmiany te nie pojawiają się tylko w elementach sieci, na których natężenie podróży przekroczyło możliwości przewozowe. Przepływy potoków pojawiają się często w stacjach wzrastającego dyskomfortu i ich zmiany są wyraźnie widoczne już przy osiągnięciu przez współczynnik *Vol/Cap ratio* wartości rzędu ok. 0,2–0,3. Zastosowanie funkcji zatłoczenia sieci wykazuje zatem pewną tendencję do wykorzystania rezerwy przepustowości w makroskopowym modelu sieci transportowej.

Zgodnie z założeniami obserwowane zmiany pojawiają się na ostatnim etapie modelu czterostadiowego, tj. rozkładu ruchu na sieć. W celu właściwego modelowania efektów ograniczeń przepustowości sieci właściwym kierunkiem dalszych prac badawczych (i symulacyjnych) wydaje się być uwzględnienie tego aspektu już na etapie podziału zadań przewozowych – i opisanie go jako funkcji oporu ścieżki (*path impedance*) zamiast tylko samego czasu podróży (*jour-*

*ney time*). Wówczas możliwe byłoby uchwycenie w procedurze iteracyjnej wpływu popytu pasażerskiego na podział zadań przewozowych – obecnie tylko zmiany w podaży systemu transportu zbiorowego mają przełożenie na przepływy międzygałęziowe w modelu makroskopowym. W takim wypadku ważna staje się także odpowiednia kalibracja modelu, do której mogą być potrzebne dodatkowe dane np. z ankietowania podróżnych, w celu właściwego i najbardziej dokładnego odwzorowania aspektów komfortu w podróży transportem zbiorowym. Istotnym czynnikiem będzie także weryfikacja wrażliwości założonej funkcji zatłoczenia w sieci – wyniki osiągnięte powyżej mogą wykazywać pewną nadmierną wrażliwość rozkładu podróży na kwestię dyskomfortu – a także jej przełożenie na wyniki rozkładu czterostadiowego.

## Literatura

1. AECOM for TfL Crossrail 2: Summary of Option Development – London, 2013.
2. Batarce, M., Muñoz, J.C., Ortuzar, J.D.D., Raveau, S., Mojica, C. and Ríos, R.A., 2015. *Valuing crowding in public transport systems using mixed stated/revealed preferences data: the case of Santiago*. In TRB 94th Annual Meeting Compendium of Papers, Washington DC.
3. Cats, O., West, J. and Eliasson, J., 2015. *Appraisal of increased public transport capacity: the case of a new metro line to Nacka, Sweden* (No. 2015: 2). CTS-Centre for Transport Studies Stockholm (KTH and VTI).
4. Cats, O. and Hartl, M., 2015, July. *Modelling public transport congestion: A comparison of static and dynamic models*. In CASPT 2015: 13th International Conference on Advanced Systems in Public Transport, Rotterdam, The Netherlands, 19–23 July 2015.
5. Drabicki, A., 2015. Praca magisterska: *Wpływ efektów zatłoczenia w sieci transportu publicznego na wybór trasy przez pasażera w modelu symulacyjnym*. Politechnika Krakowska, 2015.
6. Drabicki, A., Kucharski, R., 2015. *Analiza i porównanie metod wyboru trasy przejazdu pasażera transportem publicznym*. X Konferencja Naukowo-Techniczna Poznań-Rosnowko, 2015.
7. Kroes, E., Kouwenhoven, M., Debrincat, L. and Pauget, N., 2013. *On the value of crowding in public transport for Ile-de-France*. International Transport Forum Discussion Paper.
8. Lieberherr, J. and Pritscher, E., 2012. *Capacity-restraint railway transport assignment at SBB-Passenger*. In Proceedings of the 12th Swiss Transport Research Conference.
9. London Assembly Transport Committee Report The Big Squeeze. Rail overcrowding in London – London, 2009.
10. PTV, A., 2015. VISUM 15 User Manual. Karlsruhe, Germany.
11. Rudnicki, A., 1999. *Jakość komunikacji miejskiej*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, (71).
12. Tirachini, A., Hensher, D.A. and Rose, J.M., 2013. *Crowding in public transport systems: effects on users, operation and implications for the estimation of demand*. Transportation research part A: policy and practice, 53, pp.36–52.
13. *Transport for London, Capacity for growth at Camden stations*, (London Borough of Camden, 18.09.2013)
14. Van Oort, N., Drost, M., Brands, T. and Yap, M., 2015, July. *Data-driven public transport ridership prediction approach including comfort aspects*. In CASPT 2015: Conference on Advanced Systems in Public Transport, Rotterdam, The Netherlands, 19–23 July 2015.
15. Whelan, G.A. and Crockett, J., 2009, March. *An investigation of the willingness to pay to reduce rail overcrowding*. In International Choice Modelling Conference 2009.