



JUSTYNA STĘPIEŃ

Politechnika
Świętokrzyska
justynas@tu.kielce.pl

Symulacja procesu wymiany pasażerów na miejskich przystankach autobusowych wykorzystywanych przez różnych przewoźników

Wskutek rozwoju motoryzacji i demonopolizacji transportu publicznego w Polsce, część miejskich przystanków autobusowych jest intensywnie wykorzystywana przez licznych prywatnych przewoźników, a także taksówki, pojazdy uprzywilejowane i nieuprawnione. Niejednokrotnie skutkuje to powstawaniem w ich obrębie zakłóceń w płynności ruchu pojazdów komunikacji miejskiej oraz pogorszeniem warunków ruchu pozostałych pojazdów.

Podstawą do ustalenia zasad zarządzania i koordynacji wykorzystania przez różnych przewoźników wspólnych przystanków autobusowych jest odwzorowanie istniejących warunków ruchu, panujących na tego typu przystankach oraz ich symulacja w warunkach projektowanych. Nie opracowano dotychczas modelu symulacyjnego, odwzorowującego funkcjonowanie przystanku, który jest wykorzystywany wspólnie przez różnych użytkowników i przewoźników, w tym prywatnych. Modele mikroskopowe, wykorzystywane w gotowych pakietach oprogramowania, takich jak np. PTV Visim nie odzwierciedlają sytuacji rozregulowania systemu obsługi na przystanku, pozwalając na przyjęcie tylko stałej odległości pomiędzy pojazdami zatrzymującymi się w kolejce i stałej liczby stanowisk wymiany pasażerów.

Dotychczas w Polsce badane były przystanki, wykorzystywane przez autobusy tego samego przewoźnika, m.in. [1], [2], [3], [5], [6]. Badania światowe, które były prowadzone w zakresie funkcjonowania przystanków autobusowych, zawarte m.in. w [4], [10] nie odzwierciedlają sytuacji wykorzystania przystanków przez różnych przewoźników.

W artykule przedstawiono zbudowany i zweryfikowany model symulacyjny obliczania czasu wymiany pasażerów na miejskich przystankach autobusowych, wykorzystywanych przez różnych przewoźników i użytkowników.

Przedmiot analiz

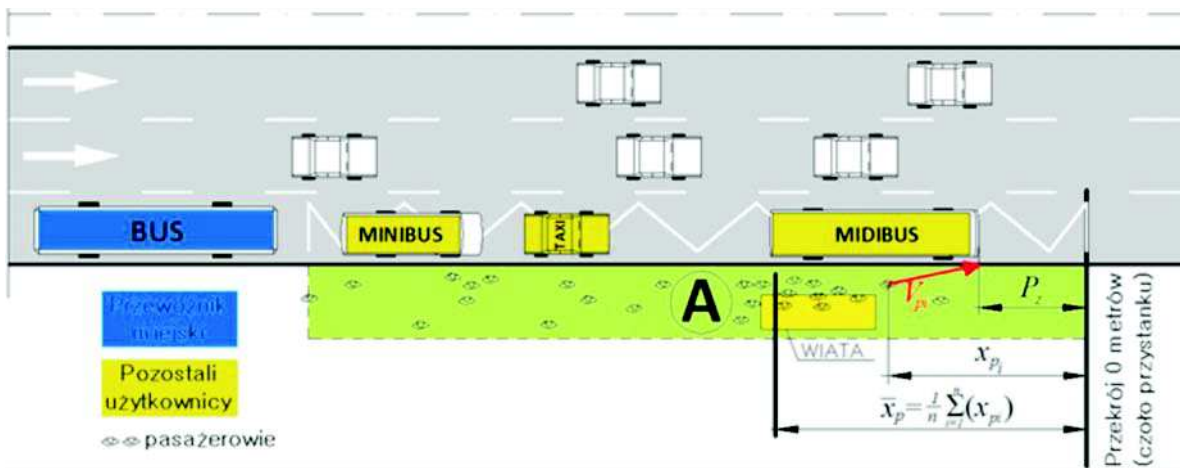
Analizy zawarte w artykule oparto na pomiarach, wykonanych na przystankach autobusowych w Kielcach i w Krakowie. Zasadniczy materiał badawczy zgromadzono w Kielcach w 2009 oraz w 2011 roku, a uzupełniono w 2014 roku, łącznie obejmując 20 przystanków autobusowych. Wytypowano przystanki najintensywniej wykorzystywane w tych miastach przez prywatnych przewoźników, realizujących głównie kursy zamiejskie, a także przez pozostałych użytkowników. Badane przystanki zlokalizowane są przy ulicach dwujezdniowych. Łączna liczba zarejestrowanych zdarzeń wymiany pasażerów wynosiła ponad 5000.

W niniejszym artykule pojęcie „przewoźnik miejski” odnosi się do przedsiębiorców realizujących przewóz osób na terenie miasta oraz kursy podmiejskie z wykorzystaniem autobusów miejskich. Określenie „przewoźnik zamiejski” będzie dotyczyć przedsiębiorców prywatnych oraz PKS, odbywających kursy podmiejskie oraz o zasięgu międzymiastowym i międzynarodowym mikrobusami oraz autobusami dalekobieżnymi (międzymiastowymi, turystycznymi). Termin „pozostali użytkownicy” odnosi się do grupy „przewoźników zamiejskich”, powiększonej o taksówki i pozostałe pojazdy zatrzymujące się w strefie przystanku (samochody osobowe, dostawcze, policja oraz inne służby). Na fotografiach (1a÷1c) przedstawiono przykłady przystanków wykorzystywanych przez różnych przewoźników, natomiast na rysunku 1 zilustrowano parametry związane z procesem wymiany pasażerów na przystanku.

Pomiary wykonano z wykorzystaniem techniki wideofilmowania. Na podstawie wielokrotnej analizy zarejestrowanych nagrań oszacowano wszystkie podstawowe parametry związane z funkcjonowaniem przystanków i sąsiednich pasów



Fot. 1. Przykłady przystanków wykorzystywanych przez różnych przewoźników w Kielcach i Krakowie



Rys. 1. Ilustracja parametrów związanych z procesem wymiany pasażerów na przystanku

ruchu, a do potrzeb opracowywanego algorytmu wykorzystano czas wsiadania i wysiadania pasażerów, liczby obsługiwanych pasażerów, pozycje pojazdów zatrzymujących się na przystanku, pozycje pasażerów oczekujących oraz prędkość ich poruszania w obrębie przystanku.

Z wykorzystaniem tych danych stworzono algorytm odwzorowujący proces wymiany pasażerów na przystanku autobusowym wykorzystywanym przez różnych przewoźników.

Opis algorytmu

Do budowy modelu symulacyjnego funkcjonowania przystanku autobusowego oraz jego oddziaływania na ruch pozostałych pojazdów został napisany autorski program komputerowy w języku programowania Python, którego jednym z elementów składowych jest model symulacyjny, służący do obliczania czasu wymiany pasażerów. Opracowany algorytm, odwzorowujący proces wymiany pasażerów opiera się na obliczaniu kolejnych zdarzeń, związanych z wsiadaniem i wysiadaniem poszczególnych pasażerów do/z danego pojazdu. Dane wejściowe do procesu symulacji czasu wymiany pasażerów stanowi lista pasażerów, w której każdy posiada obliczony moment pojawienia się przy drzwiach pojazdu, wynikający z czasu dojścia do drzwi. Moment ten jest wypadkową wylosowanej pozycji oczekiwania pasażera na przystanku, wylosowanej jego prędkości poruszania się i pozycji zatrzymania pojazdu w celu wymiany pasażerów. Dla kolejnych pasażerów obliczane są jednostkowe czasy wsiadania i wysiadania. Na wyjściu wyznaczany jest moment wejścia ostatniego pasażera i całkowity czas wymiany pasażerów. Do wykonania i przetwarzania wyników symulacji wykorzystano m.in. utworzony w Politechnice Świętokrzyskiej „Klaster” komputerowy, który stanowi wysokowydajny obliczeniowo zasób serwerów, macierzy dyskowej. Został on użyty do pracy w warunkach „obliczeń równoległych” z wykorzystaniem systemu operacyjnego Linux.

W procedurze symulującej proces obsługi pasażerów na przystanku wyróżniono 3 podstawowe bloki, z czego algorytm opisujący właściwy model wymiany pasażerów zawarty jest w bloku 2 (obliczania czasu wysiadania pasażerów) oraz bloku 3 (obliczania czasu wsiadania pasażerów). Blok B 1

(wprowadzenia danych) wraz z blokiem B 1.1 (inicjowanie kolejki pasażerów wsiadających) stanowią część uzupełniającą. Wykonanie etapów symulacji wsiadania i wysiadania pozwala na wyznaczenie łącznego czasu wymiany pasażerów, na który składa się suma czasu wysiadania i czasu wsiadania i-tych pasażerów z/do pojazdu. Moment rozpoczęcia wymiany pasażerów w przypadku braku pasażerów wysiadających lub przy ich niewielkiej liczbie następuje w momencie dojścia pierwszego pasażera do pojazdu. Jednocześnie w przypadku autobusów z automatycznie otwieranymi drzwiami przyjęto założenie, że wymiana pasażerów nie może rozpocząć się wcześniej niż 2 sekundy po zatrzymaniu na przystanku, nawet jeżeli czas dojścia pierwszego pasażera jest krótszy.

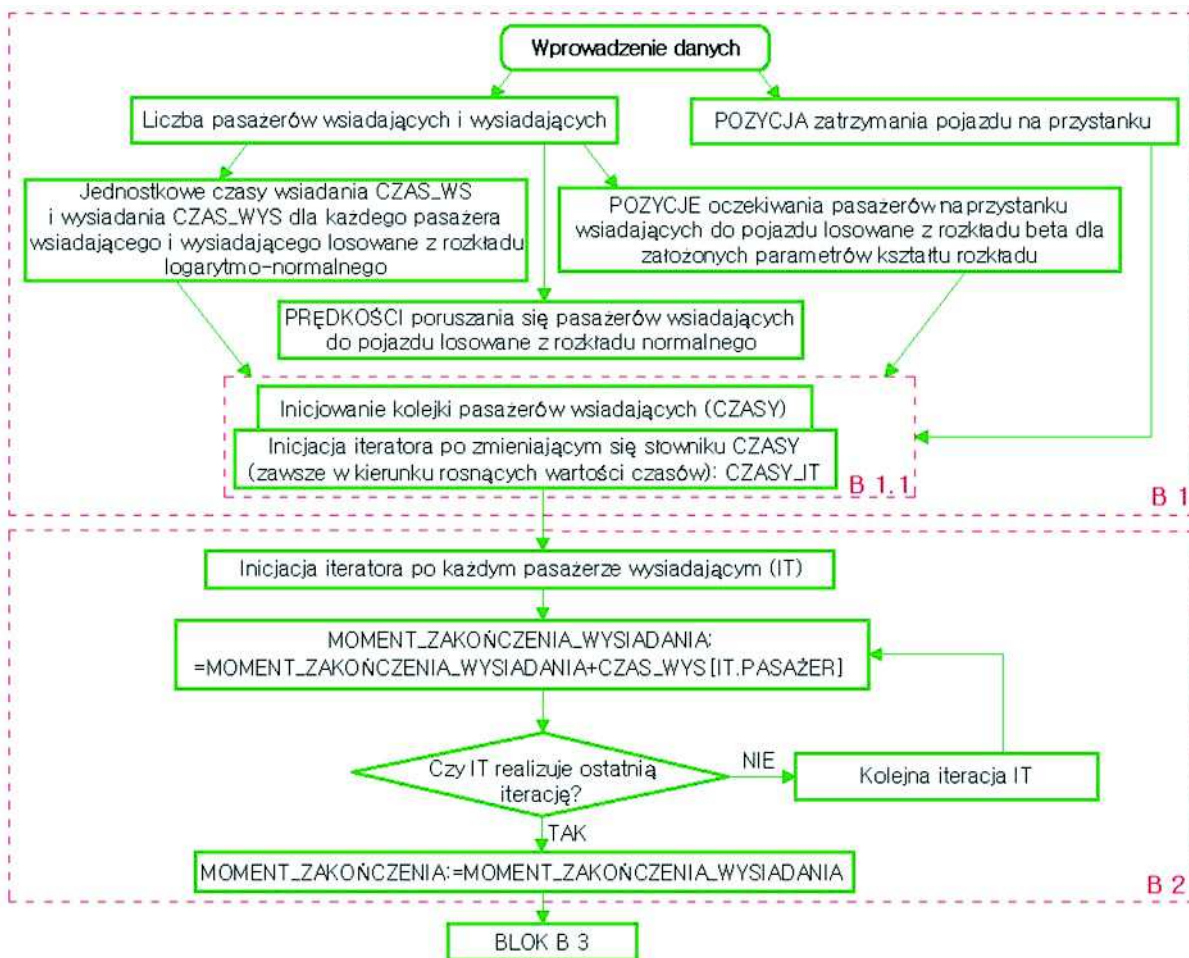
Schemat ideowy algorytmu obliczania czasu wymiany pasażerów przedstawiono na rysunkach 2÷4, z podziałem na poszczególne bloki. Wejście do algorytmu stanowi wprowadzenie następujących danych, niezbędnych do obliczenia sumarycznego czasu wymiany pasażerów:

- pozycja autobusu, tj. jego współrzędna zatrzymania na przystanku POZYCJA (P_i),
- wektor już wylosowanych z odpowiedniego rozkładu jednostkowych czasów wysiadania poszczególnych pasażerów z pojazdu CZAS_WYS (t_{wys}),
- wektor już wylosowanych z rozkładu czasów wsiadania poszczególnych pasażerów do pojazdu CZAS_WS (t_{ws}),
- wektor już wylosowanych z odpowiedniego rozkładu pozycji (współrzędnych) oczekiwania na przystanku poszczególnych pasażerów wsiadających POZYCJE (x_{pi}),
- wektor już wylosowanych z odpowiedniego rozkładu prędkości poruszania się pasażerów wsiadających PRĘDKOŚCI (V_{pi}).

Algorytm, który używa iteratora CZASY.IT modyfikuje kolejność pasażerów wsiadających, z której pobierane są kolejne elementy do iteracji. Uwzględnia on, że kolejka może się zmieniać.

Symulacja jest iteracją po kolejnych zdarzeniach, realizowaną przez iterator CZASY_IT. Do każdej iteracji brane jest następne, bezpośrednio późniejsze zdarzenie ze słownika CZASY.

Algorytm używa iteratora do posortowanego słownika zdarzeń. Słownik ten reprezentuje aktualną kolejkę przyszłych



Rys. 2. Schemat bloku wprowadzenia danych B 1 oraz algorytmu obliczania czasu wysiadania pasażerów (blok B 2)

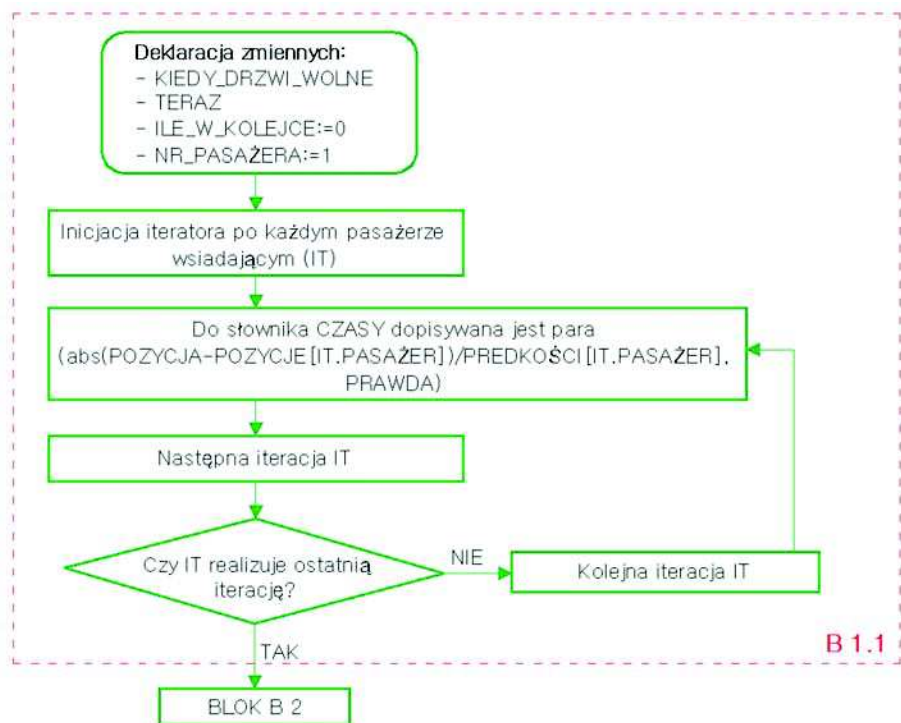
zdarzeń i jest postaci: czas zdarzenia (klucz) -> ID zdarzenia (wartość logiczna typu boolean). W procedurze symulującej występują dwa rodzaje zdarzeń:

- „Pasażer wsiadł do pojazdu” (ID_zdarzenia = „PRAWDA”),
- „Pasażer ustawił się w kolejkę osób oczekujących na wejście do pojazdu” (ID_zdarzenia = „FAŁSZ”).

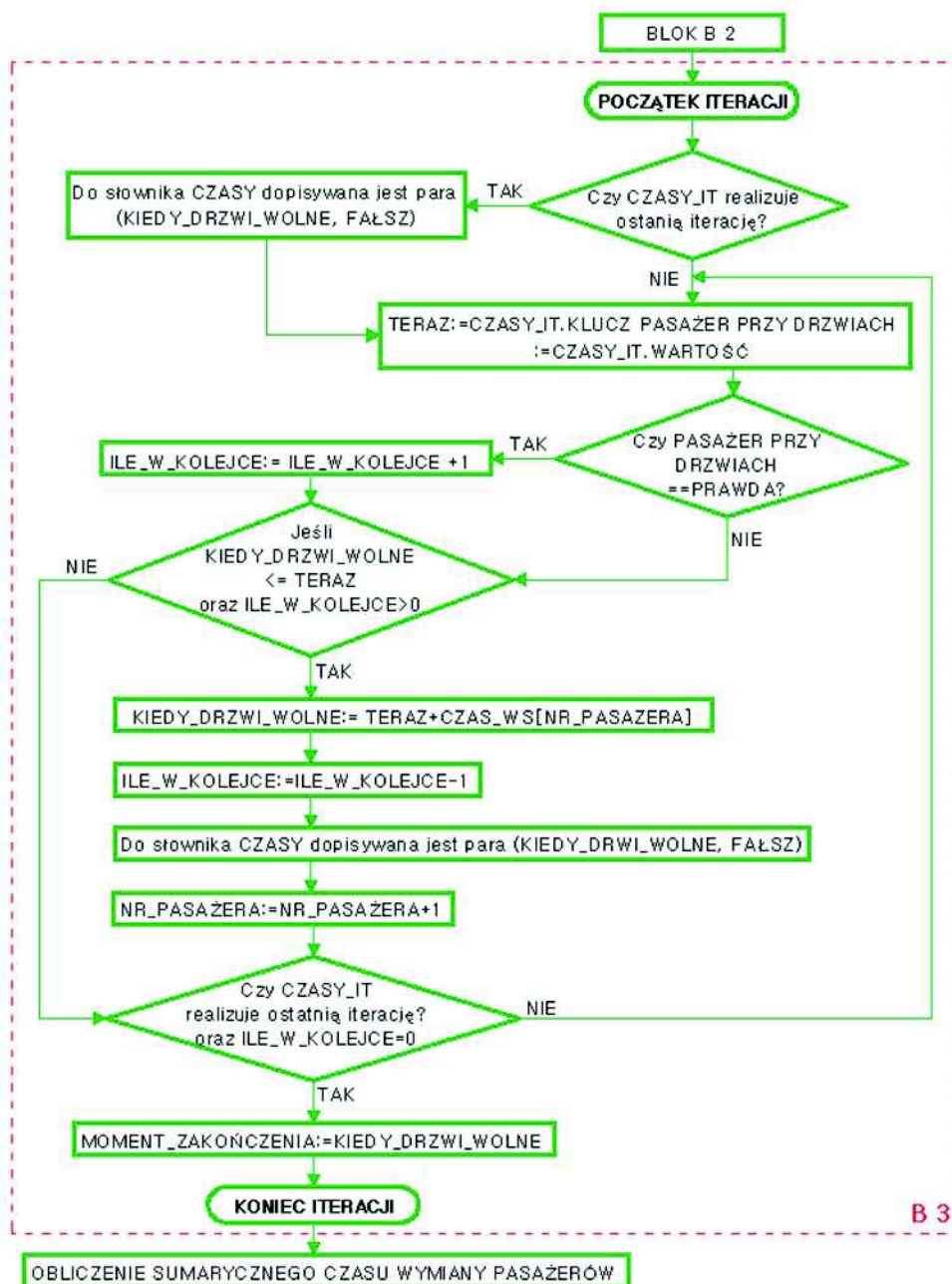
Instancja tego słownika jest nazywana CZASY, a iterator po niej (zawsze w kierunku rosnących wartości czasów): CZASY_IT. Po każdym i-tym pasażerze wsiadającym wykonywana jest iteracja. Do kolejki pasażerów wsiadających wpisują się zdarzenia o wartości „PRAWDA” i kluczu równym: wartość absolutna (POZYCJA – POZYCJE[i])/PREDKOŚCI[i].

Przyjęto następujące deklaracje zmiennych:

- „KIEDY_DRZWI_WOLNE” – najbliższy moment czasu, w którym kolejny pasażer może wejść do autobusu.
- TERAZ – aktualny czas.
- ILE_W_KOLEJCE:=0 – integer określający bieżącą liczbę pasażerów w ko-



Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu inicjowania kolejki pasażerów wsiadających (blok B 1.1)



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu obliczania czasu wsiadania pasażerów (blok B 3)

W celu obliczenia sumarycznego czasu wymiany pasażerów niezbędne było oszacowanie jednostkowych czasów wsiadania CZAS_WS (t_{ws}) i wysiadania CZAS_WYS (t_{wys}) poszczególnych pasażerów. Czas wsiadania i wysiadania brano pod uwagę w przypadku tzw. intensywnego wsiadania i wysiadania, gdy tworzyły się kolejki pasażerów oczekujących na wejście i wyjście z autobusu. Pominięto pasażerów dochodzących z opóźnieniem, którzy są w modelu uwzględniani jak jednostki dochodzące z większej odległości i z mniejszą prędkością. Duże różnice w sprawności wymiany pasażerów w pojazdach komunikacji miejskiej i zamiejskiej ([9]) wskazują na konieczność niezależnego modelowania czasu zajęcia stanowiska przez różnych przewoźników. Wynika to m.in. z różnych parametrów technicznych pojazdów i różnego sposobu obsługi pasażerów (zakup biletów u kierowców autobusów zamiejskich), a także różnego sposobu wykorzystania przystanku (inna liczba kanałów obsługi i różnicowanie zajmowanych pozycji na przystanku).

W celu odwzorowania losowości procesu jednostkowe czasy wsiadania CZAS_WS (t_{ws}) i wysiadania CZAS_WYS (t_{wys}) dla poszczególnych pasażerów są losowane z rozkładu logarytm-normalnego o parametrach wyznaczonych do danych ze zgromadzonego materiału badawczego. Rozkład ten został przyjęty na podstawie dotychczasowych badań autorki oraz analiz zawartych

lejce, który służy do ustalenia, czy w bieżącej chwili są jeszcze pasażerowie oczekujący w kolejce, czy nie.

- NR_PASAŻERA: = 1 – integer określający numer pasażera, który jest potrzebny do odczytania CZASU WSIADANIA.

Wyjście z algorytmu stanowi sumaryczny czas wymiany pasażerów (jeden skalar).

Przyjęte parametry modelu symulacyjnego

Podstawowe parametry modelu przyjęto na podstawie zgromadzonego materiału badawczego i wykonanych wielokrotnych analiz nagrań na przystankach autobusowych, wykorzystywanych przez różnych przewoźników.

w innych pracach m.in. [5].

Na podstawie zbioru par danych wartości średnich w przypadku poszczególnych pojazdów zrekonstruowano wariancję czasu wsiadania i wysiadania dla pojedynczego pasażera. Średni czas wsiadania/wysiadania przypadający na 1 pasażera dla wektora par: sumaryczny czas intensywnego wsiadania/wysiadania, liczba pasażerów wsiadających/wysiadających oraz odchylenie standardowe tego czasu określono ze wzorów (1), (2), (3):

$$\bar{t}_{ws/wys} = \frac{\sum_{i=1}^k T_{i ws/wys}}{\sum_{i=1}^k n_{i ws/wys}} [s], \quad (1)$$

$$ESS = \sum_{i=1}^k [(\bar{t}_{ws/wys} - t_i)^2 \cdot n_i^2], \quad (2)$$

$$\sigma_{t_{ws/wys}} = \sqrt{\left(\frac{ESS}{\sum_{i=1}^k n_i}\right)}, \quad (3)$$

w których:

$\bar{t}_{ws/wys}$ – średni jednostkowy czas wsiadania/wysiadania przypadający na 1 pasażera [s/pas],

$T_{1ws/wys}, T_{2ws/wys}, \dots, T_{kws/wys}$ – czasy intensywnego wsiadania/wysiadania pasażerów w przypadku poszczególnych pojazdów [s],

$n_{1ws/wys}, n_{2ws/wys}, \dots, n_{kws/wys}$ – liczby pasażerów wsiadających/wysiadających,

k – długość wektora par (liczba par, analizowanych pojazdów) [-],

ESS – oczekiwana suma kwadratów (wzór przyjęty na podstawie analiz symulacyjnych),

t_i – czas wsiadania i wysiadania przypadający na 1 pasażera danego autobusu [s/pas],

$\sigma_{t_{ws/wys}}$ – odchylenie standardowe jednostkowego czasu wsiadania/wysiadania [s/pas].

Jednostkowe czasy wsiadania i wysiadania przypadające na 1 pasażera losowane są z rozkładu logarytm-normalnego tak dopasowanego, aby posiadał parametry równe obliczonej wartości średniej i odchyleniu standardowemu w przypadku wydzielonych grup pojazdów. Wartości estymowane na podstawie zgromadzonego materiału badawczego przedstawiono w tabeli 1.

Średnią prędkość poruszania się pasażerów oszacowano na podstawie analizy odległości, jaką pokonuje pasażer od miejsca oczekiwania na przystanku do wejścia do autobusu i czasu dojścia. W celu dobrania parametrów prędkości poruszania się pasażerów z miejsca oczekiwania na przystanku do autobusu na przystanku na potrzeby opracowywanego modelu wykonano kolejne eksperymenty symulacyjne do założonych parametrów rozkładu normalnego. Do poszukiwania wartości najlepiej dopasowanych przyjęto parametry prędkości poruszania się pojedynczych pasażerów mieszczące się w granicach: wartość średnia: 1,4 m/s ÷ 2,4 m/s, odchylenie standardowe: 0,1 m/s ÷ 0,6 m/s. Po wykonanych analizach symulacyjnych jako średnią wartość prędkości poruszania się pasażerów na przystanku przyjęto 1,93 m/s, natomiast odchylenie standardowe jako wynoszące 0,3 m/s.

Tabela 1. Parametry jednostkowego czasu wsiadania i wysiadania

Typ pojazdu/przewoźnika	Liczba drzwi	Jednostkowy czas wsiadania [s/pas]		Jednostkowy czas wysiadania [s/pas]	
		\bar{t}_{ws}	$\sigma_{t_{ws}}$	\bar{t}_{wys}	$\sigma_{t_{wys}}$
miejski	2	1,79	0,64	1,82	3,63
miejski	3	1,03	0,95	1,20	1,22
miejski	4	0,89	0,96	1,05	1,22
zamijski	1	2,9	3,59	6,81	9,42
zamijski	2	1,36	1,84	3,06	2,69
osobowy/taxi/dostawczy	–	6,49	5,01	4,81	3,35

Modelowanie liczby obsługiwanych pasażerów, pozycji zatrzymania pojazdów na przystanku, pozycji oczekiwania pasażerów na przystankach oraz pozostałych procesów związanych z ich funkcjonowaniem jest przedmiotem odrębnych opracowań autorki artykułu, m.in. [7], [8].

Weryfikacja modelu symulacyjnego na podstawie zgromadzonego materiału badawczego

Wykonano weryfikację opracowanego modelu symulacyjnego na podstawie zgromadzonego materiału badawczego. Działanie opracowanego modelu symulacyjnego testowano wykonując co najmniej 100 symulacji w przypadku każdego analizowanego autobusu dla takiej samej liczby pasażerów wsiadających i wysiadających jak w bazie pomiarowej oraz do takich samych pozycji zatrzymania pojazdów na przystanku. Uśrednione wyniki symulacji porównano ze zgromadzonym materiałem badawczym i przedstawiono za pomocą regresji liniowej na rysunkach 5a i 5b.

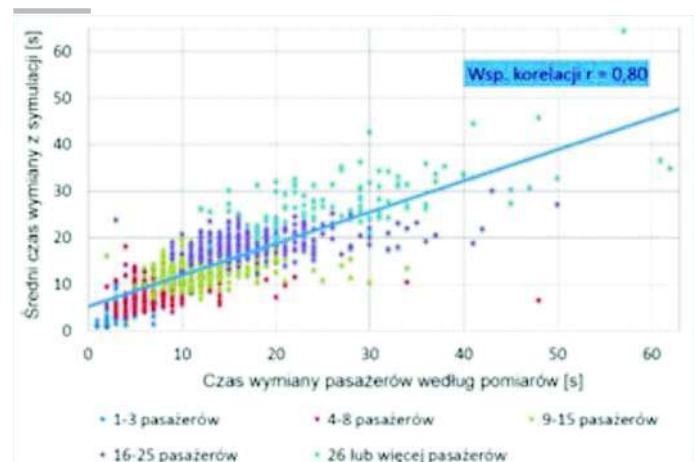
Do oceny wyników wykonanych symulacji zastosowano obliczone wskaźniki z-score (reszta standaryzowana) ze wzoru (4):

$$z = (t_w - \bar{t}_{ws}) / \sigma_{t_{ws}}, \quad (4)$$

w którym:

t_w – rzeczywisty czas wymiany pasażerów w przypadku danego autobusu z pomiarów [s],

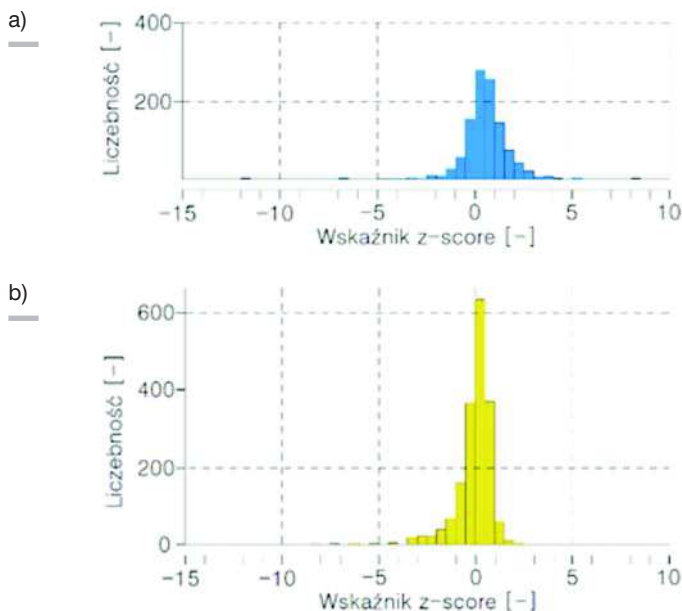
a)



b)



Rys. 5. Zależność pomiędzy czasem wymiany pasażerów z pomiarów a uśrednionym czasem z symulacji: a) autobusy przewoźnika miejskiego, b) pojazdy pozostałych użytkowników

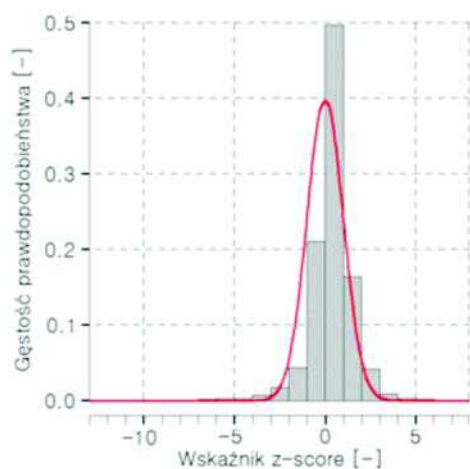


Rys. 6. Histogramy wartości z-score uśrednionych wyników symulacji i danych z pomiarów czasu wymiany pasażerów: a) autobusy przewoźnika miejskiego, b) pojazdy pozostałych użytkowników

\bar{t}_{ws} – średni czas wymiany pasażerów wyznaczony ze 100 symulacji w przypadku danego autobusu [s],
 $\sigma_{t_{ws}}$ – odchylenie standardowe czasu wymiany pasażerów wyznaczone ze 100 symulacji w przypadku danego autobusu [s].

Obliczone wartości z-score analizowanych autobusów przedstawiono za pomocą histogramów na rysunku 6, oddzielnie w przypadku pojazdów miejskiego przewoźnika oraz pojazdów pozostałych użytkowników. Na rysunku 7 przedstawiono obliczone wartości z-score całego zgromadzonego materiału badawczego wraz z dopasowaną funkcją gęstości prawdopodobieństwa rozkładu normalnego.

Na rysunkach 6 i 7 zilustrowano stopień zgodności symulacji z rzeczywistością. W przypadku symulacji zgodnej z rzeczywistością rozkład różnic standaryzowanych ilustrowany



Rys. 7. Histogram wartości z-score uśrednionych wyników symulacji i danych z pomiarów czasu wymiany pasażerów z dopasowaną funkcją gęstości prawdopodobieństwa rozkładu normalnego dla wszystkich grup przewoźników

histogramami powinien być normalny. Przyjęto, że jest wystarczająco zgodny, aby uznać symulacje za dobre. Z oceny z-score wynika, że około 95% uzyskanych wyników mieści się w granicach od -2 do 2, co wskazuje na rezultat zadowalający.

Podsumowanie

Na podstawie wykonanych analiz symulacyjnych stwierdzono, że możliwe jest zidentyfikowanie, zbudowanie i zweryfikowanie modelu symulacyjnego obsługi pasażerów na przystankach, wykorzystywanych przez różnych przewoźników (w tym prywatnych) i innych użytkowników. Ze względu na duże różnice w sposobie wykorzystania przystanku przez różnych przewoźników, niezbędne jest rozróżnienie różnych grup pojazdów i uwzględnienie różnic w sprawności wymiany pasażerów w modelach odwzorowujących funkcjonowanie tego typu przystanków. Przystanki wykorzystywane przez różnych przewoźników wymagają indywidualnego podejścia podczas procesu ich projektowania i wymiarowania ze względu na odmienną specyfikę funkcjonowania w stosunku do przystanków wykorzystywanych przez tego samego przewoźnika i nie mogą być analizowane w sposób wiarygodny na podstawie dostępnych pakietów oprogramowania do mikrosymulacji ruchu drogowego. Model symulacyjny, służący do obliczania czasu wymiany pasażerów, jest jednym z wielu elementów składowych obrazu funkcjonowania przystanków autobusowych. W celu pełnego jego odwzorowania niezbędne jest powiązanie zaprezentowanego modelu z pozostałymi modelami cząstkowymi m.in. przepływu ruchu w otoczeniu przystanku. Dalsze uszczegółowienie modelu oraz weryfikacja przyjętych parametrów przystanków, które nie są związane z dotychczas zgromadzoną bazą badawczą, będą przedmiotem kolejnych prac badawczych autorki artykułu.

Bibliografia

- [1] A. Adamski, *Probabilistic models of passengers service processes at bus stops*. Transportation Research 26B, 1992, s. 253 – 259
- [2] R. Bąk, *Simulation model of the bus stop*. Archives of Transport, vol. 1, 2010, s. 5 – 25
- [3] M. Bauer, *Modelowanie czasu wymiany pasażerów na przystankach autobusowych*. Transport Miejski i Regionalny, nr 4, 2008, s. 24– 30
- [4] R. Fernandez, *Modelling public transport stops by microscopic simulation*. Transportation Research Part C, vol. 18, 2010, s. 856 – 868
- [5] A. Molecki, *Wykorzystanie rozkładu logarytmiczno-normalnego do modelowania czasu wymiany pasażerów*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Transport, Zeszyt 65, Politechnika Śląska, Katowice 2009
- [6] A. Rudnicki, *Symulacja funkcjonowania przystanku autobusowego*. Archiwum Inżynierii Lądowej, nr 1, 1977
- [7] J. Stępień, *Analiza pozycji zajmowanych przez pojazdy różnych użytkowników na wspólnych miejskich przystankach autobusowych*. Logistyka Tom: 6/2014, s. 10058-10069
- [8] J. Stępień, *Analiza rozmieszczenia pasażerów oczekujących na miejskich przystankach autobusowych*. Logistyka Tom: 6/2014, s. 10045-10057
- [9] J. Stępień, *Funkcjonowanie miejskich przystanków autobusowych wykorzystywanych przez różnych przewoźników*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr 1799, Budownictwo z. 113, Gliwice: Wyd. Politechnika Śląska, 2008
- [10] *Transit Capacity and Quality of Service Manual – 3rd Edition*, Transportation Research Board, Washington 2003