

Wybrane metody modelowania dynamicznie wydzielanych pasów autobusowych¹

MATEUSZ SZARATA

mgr inż., Zakład Dróg i Mostów,
Wydział Budownictwa Inżynierii
Środowiska i Architektury
Politechniki Rzeszowskiej,
e-mail: matsza@prz.edu.pl

Streszczenie. Dynamicznie Wydzielany Pas Autobusowy (DPA) może stanowić uzupełnienie powszechnie znanych pasów autobusowych. Dzięki swojej specyfice DPA może zostać zastosowany na odcinkach, na których natężenie ruchu autobusów nie uzasadnia wprowadzenia pasa wydzielonego na stałe. Ocena potencjalnych korzyści DPA wymaga jednak przeprowadzenia szeregu analiz, dzięki którym określone zostaną warunki stosowania nowego rozwiązania. Wykorzystując modele ruchu, jesteśmy w stanie przeanalizować wprowadzenie dynamicznie wydzielanego pasa ruchu oraz ocenić jego efektywność i porównać go z innymi formami priorytetowania. Artykuł przedstawia główne założenia i ograniczenia związane z wykorzystaniem poszczególnych modeli ruchu. W literaturze można spotkać różne podejścia do sposobów modelowania ruchu. Część autorów w swoich pracach korzysta z modeli analitycznych, które mogą znaleźć zastosowanie na etapie wprowadzania koncepcji dynamicznie wydzielanego pasa. Modele mikrosymulacyjne ruchu wykazują więcej zalet. Umożliwiają przeprowadzenie symulacji uwzględniającej wiele czynników jednocześnie. Jednak niezależnie od zastosowanego oprogramowania wymagają dużego nakładu pracy, biorąc pod uwagę nie tylko proces budowy i kalibracji modelu, ale również potrzebę opracowania dodatkowego modułu symulującego pracę systemu DPA.

Słowa kluczowe: modelowanie ruchu, dynamiczne wydzielane pasy autobusowe, priorytety dla autobusów

Wprowadzenie

Polityka transportowa realizowana w wielu polskich miastach kładzie duży nacisk na usprawnienie transportu publicznego. Jednym z najefektywniejszych sposobów usprawniania ruchu autobusów jest wprowadzenie wydzielonych pasów autobusowych i przydzielenie priorytetu w ruchu na sygnalizacji świetlnej. Ta forma umożliwia autobusom sprawne przemieszczanie się przez najbardziej zatłoczone ciągi uliczne. Jak każde rozwiązanie, wydzielone pasy autobusowe mają też swoje ograniczenia. Bardzo często ograniczeniem w stosowaniu tego rozwiązania może być gęsta zabudowa uniemożliwiająca rozbudowę istniejącego przekroju ulicznego oraz brak odpowiednio dużego natężenia ruchu autobusów uzasadniającego wydzielenie z istniejącego przekroju pasa dla autobusów. Rozwiązaniem tej sytuacji mogą być dynamicznie wydzielane pasy autobusowe (DPA), których ideę przedstawił Viegas w 1996 roku [1]. Pas autobusowy ma się uaktywniać na żądanie zbliżającego się autobusu. Dynamiczne wydzielenie pasa jest możliwe dzięki wykorzystaniu nowoczesnego oznakowania pionowego i poziomego oraz systemu detekcji. Do oznakowania wydzielanego pasa wykorzystuje się znaki

pionowe w formie tablic VMS oraz punktowe oznakowanie poziome w formie diod LED wbudowywanych wzdłuż krawędzi pasa ruchu. Najważniejszą rolę odgrywa system detekcji, którego zadaniem jest nie tylko sprawna identyfikacja pojazdu uprzywilejowanego zbliżającego się do strefy, gdzie uzyskuje priorytet, ale również możliwość analizy aktualnych warunków ruchu na rozpatrywanym odcinku. Omawiane rozwiązanie uaktywnia się tylko w sytuacji, kiedy warunki ruchu na analizowanym odcinku będą oddziaływać niekorzystnie na prędkość autobusów.

Za pomocą odpowiednio rozmieszczonego oznakowania pionowego i poziomego kierowcy są informowani o wydzielaniu pasa z jezdni. W zależności od podejścia:

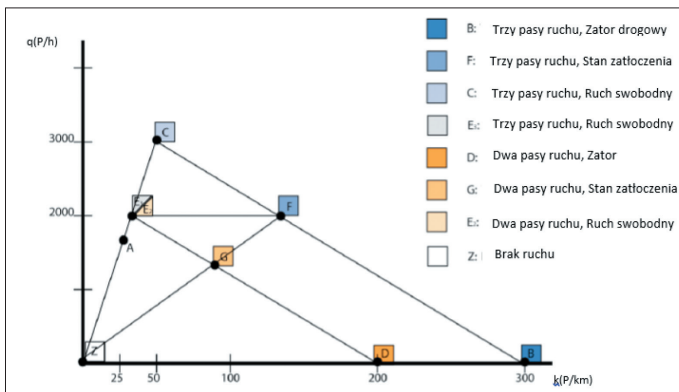
- kierowcy znajdujący się na wydzielanym pasie będą mieć obowiązek opuścić pas, którym się poruszali lub
- będą mogli kontynuować dalszą jazdę wybranym pasem ruchu.

W ten sposób wybrany pas zostaje oczyszczony. Istotne jest, aby strefa detekcji była zlokalizowana na tyle wcześnie, aby odcinek z wydzielonym pasem został oczyszczony na czas. Pierwsze propozycje związane z budową i oceną efektywności nowego rozwiązania w warunkach polskich zostały przedstawione w opracowaniach [2][3]. Dalsze prace wymagają przyjęcia odpowiedniej metody, która umożliwi określenie warunków, w których DPA może być zastosowane w Polsce. W artykule przedstawiono różne podejścia umożliwiające zamodelowanie ruchu z dynamicznie wydzielanymi pasami autobusowymi i dokonanie oceny wdrożenia nowego rozwiązania.

Modele deterministyczne

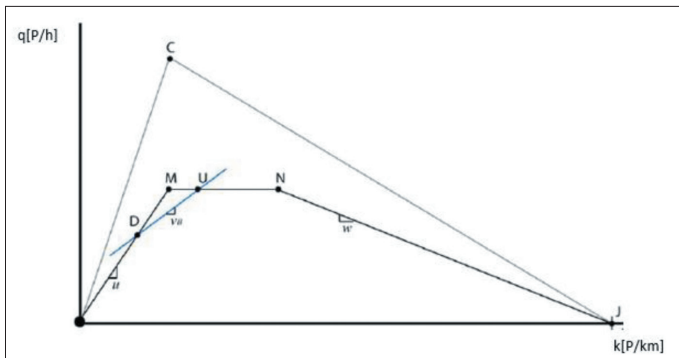
W 2006 roku M. Eichler i C. Daganzo [4] zaproponowali, by do analiz DPA wykorzystać *Kinematic Wave Theory* (KW). Teoria opracowana przez Lighthilla i Whithama (5) umożliwia analizę procesu tworzenia i rozładowywania się kolejek na skutek powstania „wąskich gardeł”. Podstawą teorii jest schemat obrazujący zależność pomiędzy natężeniem a gęstością ruchu na drodze (rys. 1). Schemat umożliwia wyznaczenie długości kolejek i średnich czasów podróży w sytuacji, gdy jeden z pasów zostanie wyłączony z ruchu. Wykres przebiegający przez punkty Z, E₁ i C i F obrazuje warunki ruchu, w których pojazdy mogą poruszać się pełnym przekrojem drogowym, natomiast wykres łączący punkty Z, E₂, G i D obrazuje sytuację, w której przekrój drogowy został zredukowany do dwóch pasów ruchu.

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2014.



Rys. 1. Podstawowy schemat teorii KW.
Źródło: [4]

Zaproponowana metoda analizy zakłada, że autobus będzie poruszać się po nieskończenie długim odcinku, na którym w równych odstępach zlokalizowane są skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Wszystkie skrzyżowania wyświetlają ten sam program sygnalizacji. W analizie pominięto wpływ pojazdów skręcających w prawo, które korzystają z pasa autobusowego, oraz wpływ pieszych. Założono, że system będzie się aktywować na tyle wcześnie, by autobus mógł poruszać się samodzielnie po wydzielonym pasie. Wyłączenie pasa aktywnego będzie następować zaraz za autobusem.



Rys. 2. Analiza przepustowości odcinka z dynamicznie wydzielonym pasem autobusowym.
Źródło: [4]

W przypadku analiz odcinka, na którym występują skrzyżowania z sygnalizacją świetlną schemat bazujący na KW zmienia swój kształt z trójkąta w trapez (OMNJ) – rysunek 2 [6]. Wysokość punktów M i N wyznacza maksymalne natężenie ruchu, a punkt J oznacza zator drogowy. Punkt M obrazuje warunki, w których kolejki występujące na analizowanym odcinku na skrzyżowaniach będą rozładowywać się w całości, natomiast punkt N przedstawia stan, w którym zaczną się tworzyć kolejki pozostające. Punkt D obrazuje przepustowość ulicy w czasie aktywnego systemu DPA. W sytuacji, gdy autobus będzie stopniowo opuszczać odcinek z priorytetem, prędkość pojazdów będzie się zmieniać z prędkości V_u do prędkości V_B , która jest równa prędkości autobusu. W ten sposób wyznaczony zostanie nowy punkt U.

Położenie punktu U pokazuje, że przejazd pojedynczego autobusu na odcinku z DPA nie ograniczy znacząco prze-

puścowości odcinka (ponieważ $Q_M = Q_U = Q_N$). Zauważono również, że aktywacja pasa autobusowego jest najkorzystniejsza, gdy natężenie ruchu nie przekroczy 80% przepustowości odcinka drogi. Zaproponowana przez autorów metoda analizy DPA ma charakter uproszczony, ale może być wykorzystana do planowania tej formy priorytetu na etapie koncepcji.

Modele probabilistyczne

Inne podejście do oceny potencjalnych korzyści lub strat dynamicznie wydzielanych pasów autobusowych zaproponował I.F. Joskowicz [7]. Opracował model bazujący na regresji liniowej umożliwiający wyznaczenie strat czasu autobusu poruszającego się po ogólnodostępnym pasie ruchu. Straty czasu w zaproponowanym modelu zależą od długości kolejek formujących się przed skrzyżowaniem. Wyznaczenie strat czasu daje możliwość określenia potencjalnych oszczędności, jakie uzyska autobus w sytuacji, gdy pas ruchu zostanie wydzielony z jezdni. Zmianę warunków ruchu w sytuacji wydzielenia jednego pasa dla autobusów w transporcie indywidualnym wyznaczono w oparciu o podręcznik *Highway Capacity Manual 2010* [8].

Budowę modelu rozpoczęto od przeprowadzenia pomiarów ruchu na odcinku jednej z ulic w Teksasie. Analizowany odcinek składał się z jezdni i 4 pasów ruchu w każdej stronie. Na długości odcinka znalazły się 2 skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Dynamicznie wydzielany pas autobusowy miałby działać niezależnie od sygnalizacji świetlnej, w związku z tym autobus zbliżający się do skrzyżowania nie otrzymywałby dodatkowego priorytetu na skrzyżowaniu. Założono wprowadzenie pasa autobusowego przy prawej krawędzi jezdni. Zakres prowadzonych badań umożliwił wyznaczenie średnich strat czasu autobusu (Y_{11}) spowodowanych kolejką formującą się przed skrzyżowaniem oraz zaproponowanych przez autora zmiennych objaśniających, mogących mieć wpływ na straty czasu (Y_{11}):

- Y_{21} średnie czasy wymiany pasażerów,
- Y_{31} średnie czasy potrzebne do włączenia się do ruchu,
- Y_{41} średnie czasy jazdy od przystanku do skrzyżowania,
- X_{11} średnia liczba pojazdów ustawiająca się przed autobusem na skrzyżowaniu,
- X_{21} liczba pojazdów skręcających w prawo na skrzyżowaniu.

Pomiary ruchu wykonano dla szczytu porannego i popołudniowego. Następnie zaproponowano modele regresji liniowej opisujące zależność pomiędzy wybraną zmienną a średnią stratą czasu. Ocena stopnia przydatności danej funkcji została przeprowadzona na podstawie współczynnika korelacji.

Z tabeli 1 wybrana została pierwsza para modeli dla szczytu porannego i popołudniowego charakteryzująca się najwyższą wartością współczynnika R^2 . Opracowany model pozwolił wyznaczyć oszczędności czasu dla autobusu na poszczególnych skrzyżowaniach, podczas gdy system zostanie aktywowany i autobus uzyska priorytet.

Tabela 1

Wyniki oceny stopnia dopasowania modeli regresji prostej i złożonej dla poszczególnych zmiennych objaśniających			
Nr	Szczyt	Model	R ²
1	Poranny	$Y_{1i} = 4,00 + 2,24X_{1i}$	0,667
	Popołudniowy	$Y_{1i} = 2,05 + 4,95X_{1i}$	0,7514
2	Poranny	$Y_{1i} + Y_{3i} + Y_{4i} = 13 + 4,71X_{1i}$	0,3735
	Popołudniowy	$Y_{1i} + Y_{3i} + Y_{4i} = 14 + 9,01X_{1i}$	0,6473
3	Poranny	$Y_{1i} + Y_{3i} + Y_{4i} = 18,00 + 4,95(X_{1i} - X_{2i})$	0,2717
	Popołudniowy	$Y_{1i} + Y_{3i} + Y_{4i} = 26,70 + 11,70(X_{1i} - X_{2i})$	0,5692

Tabela 2

Oszczędności czasu przypadające na autobus	
Skrzyżowanie	Oszczędność czasu (sec/autobus)
Westheimer i Wilcrest	6,1
Westheimer i South Dairy Ashford	10,3

Wykorzystując podręcznik *HCM 2010* oraz pomiary ruchu, opracowano model umożliwiający określenie warunków ruchu i strat czasu w transporcie indywidualnym, związanych z aktywacją dynamicznie wydzielanych pasów autobusowych. Przeanalizowano również wpływ DPA na warunki ruchu w przypadku mniejszej liczby pasów. W modelach ruchu z dwoma i trzema pasami założono, że wraz z ograniczeniem przekroju proporcjonalnie zmniejszone zostanie natężenie ruchu. Wyniki przedstawia tabela 3.

Tabela 3

Wpływ DPA na warunki ruchu na ul. Westheimer					
Skrzyżowanie ulic	Jednostka	Brak DPA	DPA (4 pasy ruchu)	DPA (3 pasy ruchu)	DPA (2 pasy ruchu)
Westheimer i Wilcrest	s/poj (PSR)	18,4 (B)	34,5 (C)	39,4 (C)	48,0 (D)
Westheimer i South Dairy Ashford	s/poj (PSR)	64,9 (E)	76,6 (E)	81,6 (F)	89,0 (F)

Wpływ aktywacji pasa autobusowego na analizowanym odcinku spowoduje wzrost strat czasu wynoszący 16,1 s/poj. na pierwszym skrzyżowaniu oraz 11,7 s/poj. na drugim skrzyżowaniu. Po uwzględnieniu średniego napełnienia pojazdów indywidualnych (1,2 os./poj.) i autobusów (40 os./poj.) okazało się, że potencjalne oszczędności czasu użytkowników transportu publicznego będą znacznie mniejsze od strat czasu użytkowników transportu indywidualnego. W przeprowadzonej analizie zauważono, że zastosowanie DPA na odcinku ulicy Westheimer w Teksasie pozwoli skrócić średni czas przejazdu o 2,7% podczas szczytu porannego i 5,6% podczas szczytu popołudniowego. Ponadto stwierdzono, że w aktualnych warunkach, w których natężenie ruchu jest bliskie przepustowości, a liczba autobusów na godzinę jest niewielka, zastosowanie DPA nie będzie korzystne. Jednak analizy modelowe pokazały, że przy mniejszym natężeniu ruchu (wynoszącym 80%–90% przepustowości) i przy zwiększeniu liczby autobusów do 10 wprowadzenie tej formy priorytetu da wyraźne korzyści.

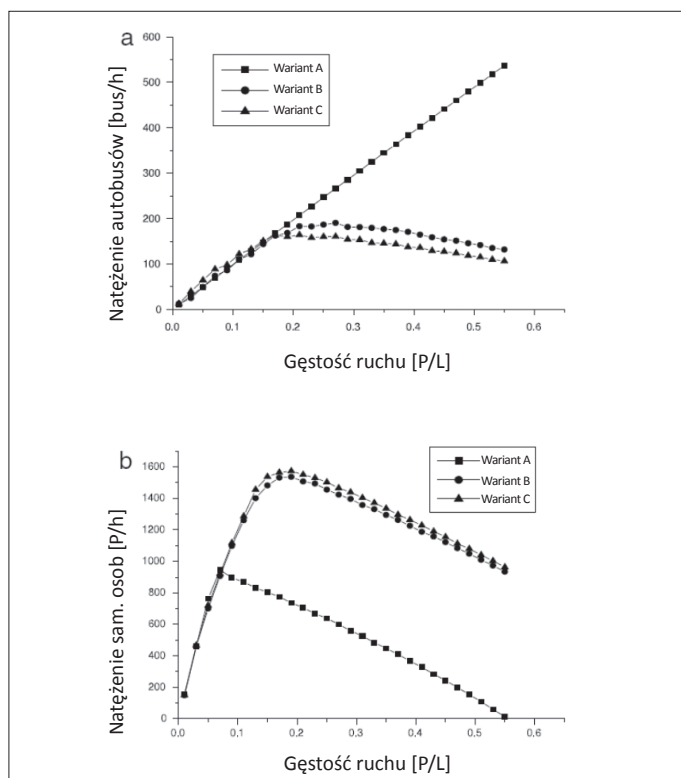
Modele mikrosymulacyjne

Model komórkowy

Jednym z przykładów wykorzystania symulacyjnych modeli ruchu umożliwiających analizę dynamicznie wydzielanych pasów autobusowych przedstawił H.B. Zhu [9]. Model został opracowany na bazie komórkowego modelu ruchu Nagela i Schreckenbrega [10]. W modelach komórkowych analizowany odcinek zostaje podzielony na komórki o długości równej 7,5 m (długość auta wraz z odstępem między pojazdami w stanie maksymalnej gęstości ruchu). Omawiany model posiada długość $L = 400$ komórek (3 km). Czas został podzielony na interwały o długości 1 sekunda każdy. Do modelu wprowadzono dwa typy pojazdów: pojazdy 'szybkie' (sam. osobowe) mające możliwość poruszania się z prędkością 5 komórek na sekundę oraz pojazdy 'wolne' (autobusy), które mogą poruszać się z prędkością 3 komórek na sekundę. W symulacji założono udział pojazdów wolnych równy 10%. Analiza objęła trzy warianty:

- wariant z klasycznym pasem autobusowym,
- wariant z dynamicznie wydzielanym pasem autobusowym,
- wariant bez priorytetu.

Wyniki przeprowadzonej symulacji pozwalają zauważyć, że jedynie pas autobusowy wydzielany na stałe pozwala skutecznie uniezależnić ruch autobusów od warunków ruchu panujących na odcinku. Wraz ze wzrostem gęstości ruchu maksymalne natężenie autobusów jest zredukowane w wariantach B i C w stosunku do wariantu A.



Rys. 3. Analiza przepustowości założonych wariantów.

Źródło: [9].

Z drugiej strony wprowadzenie pasa autobusowego na stałe wyraźnie redukuje przepustowość pojazdów indywidualnych w porównaniu do wariantu z DPA. Zaobserwowano również, że dynamicznie wydzielany pas ruchu wyraźnie poprawia prędkość ruchu autobusów w stosunku do wariantu C.

Model dla miasta Eugene, USA

Modele mikrosymulacyjne w ostatnich latach są powszechnie wykorzystywane do przeprowadzania złożonych analiz przepustowości, warunków ruchu oraz logiki sterowania sygnalizacją świetlną na skoordynowanych ciągach drogowych. Jednym z przykładów wykorzystania modeli mikrosymulacyjnych do analiz DPA jest raport wykonany na zlecenie Departamentu Transportu w USA opisujący możliwość wprowadzenia DPA w mieście Eugene [11]. Odcinkiem testowym był dwukilometrowy fragment 11th Avenue. Na odcinku znajduje się 9 skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Przekrój drogowy składał się z 5 pasów ruchu, po dwa pasy w każdym kierunku, plus jeden wydzielony na skrzyżowaniach do skrętu w lewo. Model ruchu został wykonany w programie PTV Vissim. Budowa modelu uwzględniała dokładne odwzorowanie geometrii odcinka (w tym liczby i szerokości pasów, zatok do nawracania, przejść dla pieszych i ograniczeń prędkości), natężenia ruchu, struktury rodzajowej i kierunkowej na skrzyżowaniach oraz parametrów związanych z przemieszczaniem się autobusów. Analizy zostały przeprowadzone dla popołudniowych godzin szczytu. Opracowano również dodatkowy skrypt napisany w programie Visual Basic umożliwiający przeprowadzenie symulacji DPA. Dzięki niemu możliwe było zamykanie i udostępnianie pasa ruchu dla pojazdów prywatnych oraz kontrola działania aktywnego oznakowania odcinka. W skrypcie wprowadzono dodatkową klasyfikację pojazdów znajdujących się na wydzielanym pasie ruchu na pojazdy, których:

- ruch jest dozwolony w trakcie aktywnego pasa (autobusy i pojazdy skręcające w prawo),
- ruch jest niedozwolony.

Napisany algorytm umożliwił wizualizację DPA w programie mikrosymulacyjnym i miał za zadanie aktywację pasa na odpowiedniej odległości przed autobusem.

Przeprowadzona analiza zakładała, że kierowcy będą dobrze znali odcinek, po którym się poruszają, będą również przepisowo poruszać się po odcinku i w momencie aktywacji systemu zmienią pas ruchu. Założono również, że cały odcinek został podzielony na bloki o długości 213 metrów (700 ft). W momencie pojawienia się autobusu na odcinku z priorytetem uaktywniał się system na długości dwóch bloków (426 m). W momencie, gdy autobus opuszcza aktywny blok, DPA dezaktywuje się, a pas staje się dostępny dla pozostałych użytkowników ruchu. W pracy przeanalizowano następujące scenariusze:

- wariant bazowy obrazujący istniejące warunki ruchu;
- wariant zakładający wyłącznie priorytet w sygnalizacji świetlnej;

- wariant zakładający wprowadzenie dynamicznie wydzielanych pasów autobusowych oraz priorytetu w sygnalizacji świetlnej;
- wariant powstania klasycznego pasa autobusowego wydzielonego, na stałe połączonego z priorytetem w sygnalizacji świetlnej.

Dla każdego wariantu przeprowadzono 10 symulacji ruchu, z których wyznaczono wartość średnią dla następujących parametrów:

- czas podróży autobusów,
- odchylenie standardowe czasu podróży autobusów,
- średnie straty czasu na skrzyżowaniach.

W wyniku przeprowadzonych symulacji okazało się, że najkorzystniejszym wariantem będzie pas wydzielony na stałe, który pozwoli na redukcję średniego czasu podróży o 30%. Dynamicznie wydzielony pas autobusowy pomoże skrócić czas przejazdu o 14% (60 s) a odchylenie standardowe czasu podróży zostało zredukowane o 30% w stosunku do wariantu istniejącego. Priorytet na skrzyżowaniu umożliwia uzyskanie oszczędności wynoszących 11%, przy czym odchylenie standardowe różni się tylko o 17% od wyniku uzyskanego dla pierwszego wariantu.

Model dla miasta Rostów nad Donem, Rosja

Kolejnym przykładem analiz wprowadzenia DPA przy użyciu modeli mikrosymulacyjnych jest odcinek ulicy Scheboldoev w mieście Rostów nad Donem w Rosji [12]. Celem przeprowadzonej analizy było określenie wpływu DPA na warunki ruchu pojazdów indywidualnych. Analizowany odcinek miał długość 1 kilometra i składał się z 3 pasów ruchu. Na odcinku były 2 skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Natężenie ruchu w godzinach szczytu sięgało 2500 p./h a liczba autobusów wynosiła 25 bus/h.

Głównym celem przeprowadzonych symulacji było określenie zmian warunków ruchu samochodów indywidualnych podczas aktywacji pasa. Autorzy postanowili również określić, przy jakim natężeniu ruchu prędkość autobusów znacząco spada i system powinien się aktywować. Analizy zostały wykonane w programie Aimsun. W tym przypadku także konieczne było napisanie dodatkowego skryptu umożliwiającego symulację dynamicznego pasa autobusowego. Opracowany skrypt umożliwił:

- identyfikację autobusów spośród pojazdów znajdujących się na odcinku;
- lokalizację autobusu zbliżającego się do odcinka z DPA;
- dynamiczne zamykanie pasa i pozostawiania na nim tych pojazdów, które są do tego upoważnione.

W programie Transyt obliczono optymalne programy sygnalizacji świetlnej zakładające koordynację z DPA. Przeanalizowanie zostały trzy warianty:

- wariant bazowy,
- wariant z pasem autobusowym wydzielonym na stałe,
- wariant z DPA połączonym z priorytetem na skrzyżowaniu.

Przeprowadzone obliczenia pozwoliły określić zależność pomiędzy prędkością pojazdów a natężeniem ruchu w poszczególnych wariantach:

- Prędkość pojazdów w wariantcie bazowym przy analizowanym natężeniu ruchu 'q':

$$v = 51,1 - 0,14 * q + 0,785 * 10^{-5} * q^2 - 0,24 * 10^{-8} * q^3$$
- Prędkość pojazdów w wariantcie z pasem autobusowym wydzielonym na stałe przy analizowanym natężeniu ruchu 'q':

$$v = 48,44 - 0,0014q - 0,71 * 10^{-5} * q^2$$
- Prędkość pojazdów w wariantcie z dynamicznie wydzielanym pasem autobusowym przy analizowanym natężeniu ruchu 'q':

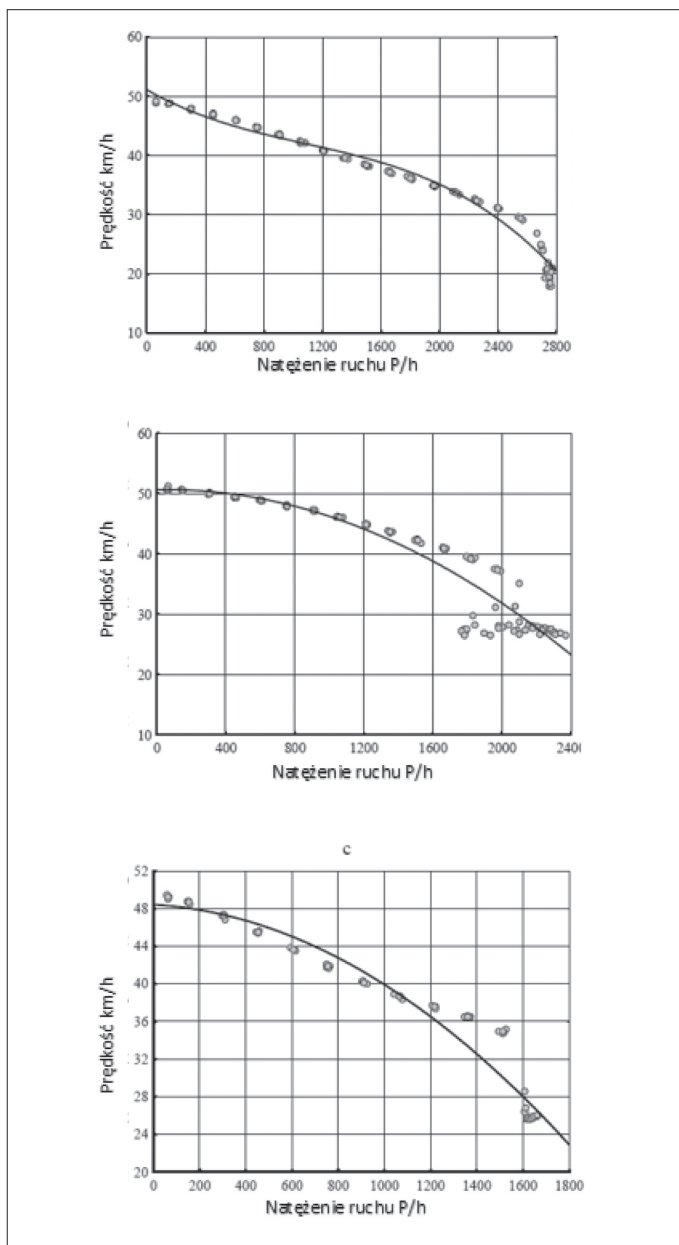
$$v = 50,64 + 0,599 * 10^{-3} * q - 0,5 * 10^{-5} * q^2$$

Przeprowadzone symulacje pokazały, że zastosowanie dynamicznie wydzielanych pasów nie wpłynęło znacząco na pogorszenie prędkości jazdy w przeciwieństwie do klasycznego rozwiązania (rys. 3). Zaobserwowano również znaczny spadek prędkości autobusów przy natężeniu sięgającym 75% przepustowości drogi. Wyniki symulacji pokazały również wzrost prędkości autobusów o 10% w przypadku zastosowania dynamicznie wydzielanego pasa autobusowego funkcjonującego w połączeniu z priorytetem na skrzyżowaniu. Przeprowadzone analizy potwierdziły możliwość zastosowania dynamicznie wydzielanych pasów autobusowych na niektórych ciągach ulicznych w Rostowie nad Donem

Model dla miasta Lizbona, Portugalia

Pierwsza implementacja dynamicznie wydzielanego pasa dla autobusów miała miejsce w Lizbonie w 2005 roku [13]. Dynamicznie wydzielany pas autobusowy zdecydowano się wprowadzić po prawej stronie 800-metrowego odcinka ulicy znajdującego się w dzielnicy biznesowej Lizbony. Przekrój uliczny składał się z jezdni jednokierunkowej i dwóch pasów ruchu. Wzdłuż odcinka rozmieszczono oznakowanie punktowe poziome przy krawędzi pasa ruchu w odstępach 3 m, 2 tablice zmiennej treści VMS wyświetlające komunikat o wydzieleniu pasa, sterownik systemu DBP oraz 11 pętli indukcyjnych monitorujących warunki ruchu. W detekcji autobusów wykorzystano używane już wcześniej przez przewoźnika detektory działające w oparciu o nawigację satelitarną GPS. Wprowadzenie pasa ruchu poprzedziły analizy przeprowadzone przy wykorzystaniu modeli mikrosymulacyjnych, których głównym celem było określenie wpływu DPA na czasy przejazdów autobusów, samochodów prywatnych, zmian przepustowości i średnich prędkości. Model ruchu został wykonany w programie Aimsun. Dodatkowo opracowano specjalny moduł umożliwiający symulacje dynamicznie wydzielanych pasów autobusowych. Opracowany moduł umożliwił:

- ocenę warunków ruchu,
- lokalizację autobusu zbliżającego się do odcinka z priorytetem,
- podjęcie decyzji o aktywacji lub wyłączeniu dynamicznego pasa.



Rys. 4. Związek pomiędzy natężeniem ruchu a prędkością dla a) wariantu bazowego; b) wariant z DPA; c) wariant z pasem autobusowym wydzielonym na stałe.

Źródło: [12]



Rys. 5. Rozmieszczenie paneli VMS wzdłuż odcinka ulicy w Lizbonie (fot. Google StreetView).

Zebrane pomiary ruchu umożliwiły przeprowadzenie analiz modelowych dla szczytu porannego i popołudniowego. Przeanalizowano dwa warianty:

- wariant pierwszy odzwierciedlał aktualną sytuację,
- wariant drugi zakładał wprowadzenie nowego rozwiązania.

Zebrane pomiary ruchu umożliwiły przeprowadzenie analiz modelowych dla szczytu porannego i popołudniowego. Przeanalizowano dwa warianty: pierwszy odzwierciedlał aktualną sytuację, a drugi zakładał wprowadzenie nowego rozwiązania. W przypadku pierwszego wariantu występował tylko jeden pas ruchu, ponieważ drugi pas w ciągu dnia był zajęty przez nielegalnie zaparkowane pojazdy. W wariantcie z DPA pas ten został oczyszczony z nielegalnie parkujących pojazdów i wzdłuż odcinka zaprojektowano parkingi przykrawężnikowe.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji zaobserwowano redukcję czasu przejazdu autobusu o 30%, a przepustowość odcinka i formujące się kolejki były zbliżone do wyników uzyskanych w wariantcie bazowym. W kolejnym kroku przystąpiono do wprowadzenia dynamicznie wydzielanego pasa autobusowego na wyznaczonym odcinku. Po sześciomiesięcznej obserwacji zebrane wyniki były bardzo podobne do modelowych: zaobserwowano 25% redukcję czasu przejazdu autobusu i nie zanotowano znaczących zmian w warunkach ruchu pojazdów indywidualnych.

Podsumowanie

Modele ruchu stanowią podstawowe narzędzie służące do oceny efektywności dynamicznie wydzielanego pasa autobusowego. Dzięki nim jesteśmy w stanie:

- zdefiniować przypadki, w których pas może być stosowany;
- określić warunki brzegowe, podczas których pas powinien się aktywować;
- porównać efektywność DPA z innymi sposobami priorytetowania autobusów;
- ocenić wpływ aktywacji pasa na pozostałych użytkowników ruchu.

W zależności od prowadzonych analiz należy świadomie wybierać metody modelowania ruchu. Korzystanie z modeli analitycznych będzie wiązać się z pewnymi ograniczeniami, lecz w przypadku prowadzenia prac planistycznych otrzymane wyniki będą wystarczające. Mikrosymulacyjne modele ruchu wykazują duży potencjał, który może być wykorzystany z powodzeniem w analizach rozwiązań z zakresu ITS. Jak pokazuje doświadczenie z Lizbony, poprawnie opracowany model może dostarczyć wiarygodnych wyników. Budowa takich modeli wymaga jednak dużych nakładów pracy, dlatego do analiz koncepcyjnych można z powodzeniem wykorzystać prostsze modele pozwalające wyznaczyć wybrane parametry ruchu. Ponadto otrzymane wyniki z modeli analitycznych mogą zostać wykorzystane do walidacji modeli mikrosymulacyjnych.

Zaprezentowane w artykule modele ruchu pozwoliły określić wzrost prędkości autobusów korzystających z wydzielanego dynamicznie pasa autobusowego oraz wpływ implementacji DPA na warunki ruchu pojazdów prywatnych. Otrzymane wyniki różniły się od siebie nieznacznie. Przeprowadzona w artykule [10] analiza pokazała nieznaczny spadek prędkości pojazdów prywatnych w godzinie szczytu na odcinku z DPA. Ponadto zauważono, że najkorzystniej jest wprowadzić wydzielony pas autobusowy w połączeniu z priorytetem na skrzyżowaniu, a natężenie ruchu na odcinku wyznaczonym do DPA powinno mieścić się w granicach 70%–90% przepustowości.

Literatura

1. Viegas J., *Turn of the century, survival of the compact city, revival of public transport. Bottlenecks in Transportation and the Port Industry*. (H. Meersman, Ed). Antwerp, Belgium, 1996.
2. Szarata M., Bichajło L., *Modelowanie funkcjonowania dynamicznie wydzielanego pasa autobusowego*, X Konferencja Naukowo-Techniczna Logitrans 2013. Szczyrk 16–19.04.2013.
3. Szarata M., Olszewski P., *Analiza efektywności dynamicznie wydzielanego pasa autobusowego*, 60 Konferencja PAN i PZiTb Krynica 2014, materiały pokonferencyjne Zeszyty Naukowe Politechniki Lubelskiej Budownictwo i Architektura vol 13(4) 2014.
4. Eichler M., Daganzo C.F., *Bus lanes with intermittent priority: Strategy formulae and an evaluation*, „Transportation Research”, Part B 40, 2006.
5. Lighthill M., Whitham J., *On kinematic waves.. II. A theory of traffic flow on long crowded road*, Proceedings of Royal Society A229, 1955.
6. Newell G.F., *Blocking effects for synchronized signals*. In: *Proceedings*, 8th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, University of Toronto Press, Toronto, Canada 1981.
7. Joskowicz I.F., *Dynamic Bus Lane*, dissertation for the degree of doctor of philosophy, University of Texas at Arlington, 2012.
8. *Highway Capacity Manual* „Transportation Research Board”, National Academy of Sciences, 2010.
9. Zhu H.B., *Numerical study of urban traffic flow with dedicated bus lane and intermittent bus lane*, „Phisycy” A 389, 2010.
10. Nagel K., Schreckenberg M., *A cellular automaton model for freeway traffic*, „Phisycy” A, 1992.
11. *Bus Lane with Intermittent Priority (BLIMP) – Concept Simulation Analysis*; Final Report, U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration, November, 2000.
12. Zyryanov V., Mironchuk A., *Simulation study of intermittent bus lane and bus signal priority*, Procedia – Social and Behavioral Sciences 48, 2012.
13. Viegas J.M., Roque R., Lu B., Vieira J., *The Intermittent Bus lane System: demonstration in Lisbon*, in 86th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC. 2007.