

JACEK OSKARBSKI

dr hab. inż., Politechnika Gdańska,
Wydział Inżynierii Lądowej, Katedra
Inżynierii Drogowej i Transportowej,
e-mail: joskar@pg.edu.pl

Modele ruchu w nowoczesnym zarządzaniu transportem drogowym^{1,2}

Streszczenie: Wdrożenie i rozwijanie wielopoziomowego modelu podróży i sieci transportowej (MST), w ramach Systemu Planowania Ruchu (SPR), usprawniającego zarządzanie transportem w systemach transportowych z wykorzystaniem usług oferowanych przez Inteligentne Systemy Transportu, może stanowić wsparcie naukowe dla krajowych, regionalnych lub lokalnych administracyjnych jednostek planistycznych i operacyjnych w usprawnieniu systemowego zarządzania ruchem drogowym, w działaniach zmierzających do poprawy poziomu sprawności i bezpieczeństwa w transporcie. W artykule przedstawiono koncepcję, realizację oraz przykłady zastosowań SPR wraz z MST jako kluczowych elementów systemów zarządzania transportem. Zostały one wdrożone w wyniku badań naukowych nad integracją modeli podróży, ruchu i sieci transportowej w ramach realizacji Zintegrowanego Systemu Zarządzania Ruchem TRISTAR w Trójmieście oraz projektów badawczych CIVITAS DYN@MO „DYNamic citizens @ctive for sustainable Mobility”, FLOW „Furthering Less Congestion by Creating Opportunities For More Walking and Cycling” i RID-4D „Wpływ stosowania usług Inteligentnych Systemów Transportowych na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego”.

Słowa kluczowe: modelowanie procesów transportowych, inteligentne systemy transportowe, modelowanie ruchu, zarządzanie ruchem.

Wprowadzenie

Funkcjonowanie i rozwój systemów transportowych miast oraz obszarów zamiejskich przyczynia się do powstawania i eskalacji trudnych do rozwiązania problemów, takich jak emisja zanieczyszczeń, hałas, wypadki drogowe, zatłoczenie i straty czasu w transporcie, zajętość terenu, wyczerpywanie zasobów i związane z powyższymi kwestiami obniżanie jakości życia oraz rosnące koszty zarówno ekonomiczne, jak i społeczne. Szacuje się, że globalnie, do 2050 roku w miastach będzie zamieszkiwało 70% ludności, co może wpłynąć na nawet trzykrotne zwiększenie liczby podróży względem stanu obecnego [1]. Pogodzenie celów związanych z zapewnieniem dostępności obszarów, obiektów oraz mobilności ludności, przy jednoczesnym ograniczeniu negatywnych skutków aktywności transportowej, stanowi szczególne wyzwanie dla zarządców ruchu i planistów. Zapewnienie niezawodności funkcjonowania systemu transportu, bezpieczeństwa, poprawa dostępności i integracja transportu oraz zmniejszenie negatywnego oddziaływania transportu na środowisko są priorytetowymi kierunkami polityki transportowej każdego państwa oraz jednostek samorządowych. Kraje i miasta, które

najlepiej radzą sobie z tym zadaniem, od lat działają metodycznie i systemowo, opracowując modele systemów transportu, wykorzystujące wiedzę i wyniki badań naukowych.

Planowanie sieci transportowych, podejmowanie decyzji o zmianach w organizacji ruchu, jak również planowanie tymczasowej organizacji ruchu w związku z robotami drogowymi, imprezami masowymi lub zdarzeniami drogowymi wymagają rozwiązania złożonych zagadnień funkcjonowania systemów transportu. Ułatwieniem w procesie podejmowania decyzji planistycznych są wyniki badań prowadzonych za pomocą różnego rodzaju narzędzi, do których zaliczyć można pakiety programów do prognozowania zmian zachowań transportowych podróżujących. W przypadku systemów transportowych prognozowanie dotyczy najczęściej oszacowania przyszłego (krótko- lub długoterminowego) ruchu drogowego, przewozów pasażerskich lub towarowych w istniejącej lub planowanej sieci transportowej. Przedmiotem analiz jest iteracyjne obliczanie wielkości potoków ruchu w zależności od wielkości popytu na transport (wynikającego z rozmieszczenia funkcji zagospodarowania przestrzennego i przypisanych im atrybutów) oraz podaży systemu transportowego (mierzonej najczęściej przepustowością poszczególnych elementów tego systemu) [2]. Modelowanie matematyczne potoków podróży i potoków pojazdów było dość silnie rozwijane w drugiej połowie ubiegłego wieku, w wyniku czego opracowano wiele pakietów komputerowych wspomagających opracowywanie modeli systemów transportu w miastach i obszarach zamiejskich. Pakiety te zawierają modele matematyczne i procedury obliczeniowe umożliwiające prognozowanie i symulację ruchu [3], [4], [5]. Narzędzia umożliwiają opracowywanie modeli transportowych, które mogą być wykorzystywane w wielu celach, począwszy od oceny bieżącego funkcjonowania systemu transportu, oceny funkcjonowania w przypadku przekształceń wprowadzanych na większym obszarze (kraju, regionu, miasta) z uwzględnieniem zmian w otoczeniu systemu, do oceny usprawnień wprowadzanych lokalnie, które jednakże również mogą mieć wpływ na wydajność całego systemu. Wskazany powyżej problem wymaga zastosowania kompleksowego podejścia badawczego, polegającego na wykorzystaniu narzędzi, które umożliwiają prowadzenie analiz o różnym stopniu szczegółowości w odniesieniu do różnych obiektów transportowych. Cel badań i rodzaj analizowanego obiektu (sieć transportowa większego obszaru, ciąg drogowy, skrzyżowanie) determinują wybór narzędzia, pod względem stopnia szczegółowości prowadzonych analiz (poziom makro-, mezo- lub mikroskopowy).

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2020.

² W artykule wykorzystano fragmenty wniosku habilitacyjnego autora, w którym wskazano jako osiągnięcie naukowe cykl publikacji pt. *Metodyka opracowania i zastosowania modeli systemów transportu w nowoczesnym zarządzaniu ruchem drogowym*.

Wiele krajów, regionów i miast europejskich opracowało własne modele, jednakże nie zawsze wykorzystują ich możliwości w planowaniu i działaniach operacyjnych [6], [7], [8]. Jedną z przyczyn niedostatecznego wykorzystywania metod i narzędzi badawczych oraz wyników badań jest brak zrozumienia przez decydentów możliwości, których dostarcza wiedza naukowa. W niektórych modelach transportu brakuje wielopoziomowej struktury. W wielu miastach stosuje się wyłącznie modele makroskopowe, inne używają różnych klas modeli, ale nie integrują ich, co uniemożliwia lub znacznie utrudnia wymianę danych ze względu na brak elementów referencyjnych pomiędzy poszczególnymi poziomami modeli [5]. Kolejnym problemem jest brak współpracy pomiędzy podmiotami, które wykorzystują modele w różnych celach, m.in. do planowania, opracowywania zmian w organizacji ruchu lub strategii sterowania ruchem oraz bieżącego zarządzania transportem indywidualnym lub zbiorowym. Przykładem pierwszego w Polsce wdrożenia wyników prac badawczych w postaci wielopoziomowego modelu ruchu jest rozwiązanie opracowane dla miasta Gdyni w ramach projektu badawczo-wdrożeniowego CIVITAS DYN@MO [9], [10]. Jednym z celów projektu było usprawnienie systemu transportu poprzez wdrożenie planów zrównoważonej mobilności miejskiej (Sustainable Urban Transport Plan – SUMP) z zastosowaniem metod i środków inteligentnych systemów transportu (Intelligent Transport Systems – ITS). Wykorzystanie nowoczesnych rozwiązań było możliwe ze względu na wdrożenie na terenie Trójmiasta jednego z pierwszych i największych w Polsce regionalnych projektów z zakresu inteligentnych systemów transportu pod nazwą TRISTAR [11], [12]. Model wielopoziomowy został zintegrowany z Systemem Zarządzania Ruchem TRISTAR w zakresie pozyskiwania danych z jego układów detekcji i baz danych oraz wykorzystania w Systemie Planowania Ruchu będącego elementem trójmiejskiego rozwiązania ITS. W opracowanym narzędziu, obok innych istotnych elementów, wskazano na kluczową rolę systemu oceny efektywności badanych rozwiązań z zakresu zarządzania transportem oraz monitorowania efektów i informowania o wynikach badań, często w formie dialogu społecznego. MST umożliwia systematyczne dostarczanie informacji w celu wsparcia procesu podejmowania decyzji długoterminowych (w zakresie planowania systemu transportu) oraz krótkoterminowych działań operacyjnych pozwalających na zmniejszenie ryzyka redukcji poziomu niezawodności systemu i bezpieczeństwa uczestników ruchu, a także łagodzenia skutków zdarzeń niepożądanych i weryfikacji poprawności stosowanych środków profilaktycznych.

Wstępne pomysły powiązania modeli transportowych możliwością pozyskiwania danych do modelowania usług ITS pojawiły się w 2002 roku podczas prac badawczych nad strukturą systemu zarządzania ruchem TRISTAR 3}, [14].

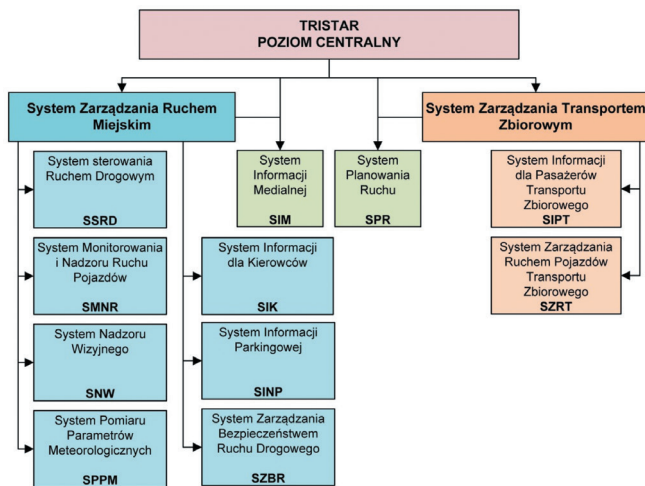
System Planowania Ruchu w architekturze systemu TRISTAR

zaprojektowane badania naukowe obejmujące diagnozę systemów transportowych Trójmiasta pozwoliły na opracowanie

wstępnej struktury zintegrowanego systemu zarządzania ruchem, w którym rozwiązania z obszaru ITS mogłyby pomóc w zniwelowaniu skali zidentyfikowanych problemów. Jednym z głównych problemów podczas opracowywania diagnozy była ograniczona możliwość pozyskania danych do opracowania modeli podróży. Usługi ITS umożliwiają dostarczanie obszernych zbiorów danych, które mogą posłużyć jako wkład w opracowanie takich modeli. Możliwość wykorzystania zbiorów danych z różnych przedziałów czasowych jest istotna wobec dynamiki zmian popytu transportowego oraz charakterystyk ruchu w różnych okresach roku, tygodnia, dnia, na co, oprócz czynników demograficznych, ekonomicznych i zachowań transportowych, mają wpływ między innymi warunki atmosferyczne lub występowanie zdarzeń niepożądanych w sieci drogowej. Konieczność uwzględnienia zmienności popytu transportowego i dynamiki tych zmian jest szczególnie ważna w przypadku planowania działań operacyjnych, np. zaprojektowania tymczasowej organizacji ruchu (w zakresie objazdów, oznakowania dróg oraz sterowania ruchem za pomocą sygnalizacji świetlnej lub znaków zmiennej treści) oraz podczas wystąpienia zdarzeń losowych w sieci drogowej lub sytuacji kryzysowych. Rozwiązania ITS, poprzez wykorzystanie narzędzi planowania, stanowią ponadto podstawę do wspierania naukowców oraz służb administracyjnych w długoterminowym prognozowaniu przyszłych warunków ruchu, opracowywaniu strategii sterowania, organizacji ruchu i planowaniu rozwoju sieci transportowej.

Konieczność usystematyzowania i dążenie do interoperacyjności w rozwoju i wdrożeniach rozwiązań ITS przyczynia się do opracowywania architektur ITS, które stanowią koncepcyjne modele, definiujące strukturę i działanie ITS. Architektura przedstawiana jest zazwyczaj w formie formalnego opisu systemu oraz argumentów przemawiających za wykorzystaniem odpowiednich struktur i doбором funkcjonalności. Architektura ITS definiuje ramy strategiczne, które stanowią podstawę skutecznego planowania, projektowania i wdrażania rozwiązań oraz pomagają w podejmowaniu właściwych decyzji inwestycyjnych, mających na celu zapewnienie spójności, otwartości na rozwój i interoperacyjności systemu oraz jego komponentów.

Pierwsza w Polsce regionalna architektura ITS wzorowana była na krajowej architekturze amerykańskiej i została opracowana w ramach prac badawczych, służących przygotowaniu koncepcji systemu TRISTAR. W ramach badań opracowano między innymi architekturę logiczną, funkcjonalną i sprzętową systemu, która mogła być pomocna w projektowaniu uniwersalnej architektury krajowej ITS [15], [12]. W ramach prac badawczych została również dokonana ocena efektywności wdrożenia projektu pilotażowego – systemu sterowania ruchem SCATS/RAPIDS w ciągu ulicy Morskiej w Gdyni [16]. Biorąc pod uwagę możliwość wykorzystania modeli transportowych w wielu modułach systemu TRISTAR, ostatecznie wydzielono w strukturze funkcjonalnej odrębny filar zintegrowany z pozostałymi elementami systemu w warstwach wykorzystania danych



Rys. 1. Podstawowa struktura funkcjonalna systemu TRISTAR

Źródło: [12]

oraz wsparcia operacyjnego i planistycznego, zakładając konieczność realizacji wielopoziomowego modelu systemów transportu [12], który wspiera pozostałe elementy funkcjonalne systemu. Podstawową strukturę funkcjonalną systemu TRISTAR przedstawiono na rysunku 1.

Dzięki zastosowaniu Systemu Planowania Ruchu zmiany zachodzące w systemie transportowym są bardziej przewidywalne i kontrolowane, co może poprawić poziom jego niezawodności np. w ujęciu niezawodności czasowej.

Struktura wielopoziomowego modelu w Systemie Planowania Ruchu

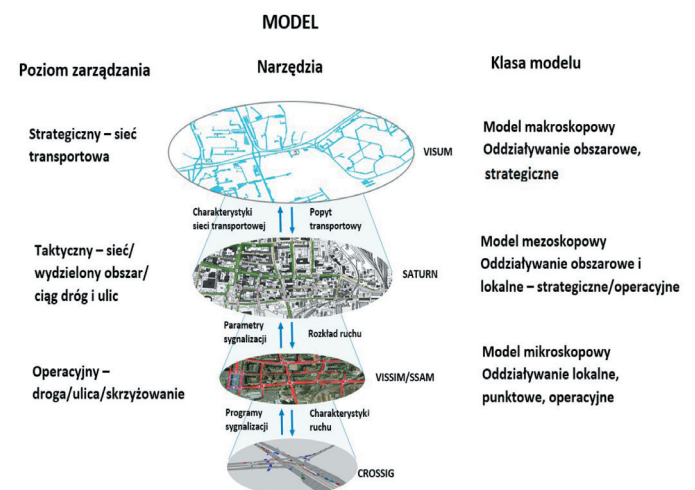
W pierwszych pracach nad trójmiejską architekturą regionalną zakładano powstanie modułów planowania transportu indywidualnego (w zakresie klas modeli i komputerowych programów symulacyjnych wspierających strategiczne zarządzanie w sieci ulic) oraz transportu zbiorowego (w zakresie planowania tras i rozkładów jazdy). Modele transportowe z uwagi na możliwości odwzorowywania zachowań podróżnych stanowią cenne wsparcie w zakresie analiz, zarówno w ujęciu punktowym (skrzyżowanie, odcinek drogi), jak i sieciowym (wpływ poszczególnych rozwiązań na obszar miasta, powiatu, województwa, kraju). Z tego też powodu modele są z powodzeniem wykorzystywane do analiz transportowych, w tym analiz usług ITS.

W pracach badawczych [3], [4] dokonano analizy uwarunkowań możliwości opracowania modelu wielopoziomowego oraz jego integracji w systemie zarządzania ruchem TRISTAR. Wnioski z przeprowadzonych badań naukowych pozwoliły na opracowanie struktury modelu wielopoziomowego oraz przyjęcie założeń jego realizacji (na poziomie lokalnym dla miasta Gdyni w powiązaniu z poziomem regionalnym dla województwa pomorskiego). Dodatkowo kazano możliwe do zastosowania metody i środki, gwarantujące funkcjonowanie systemu transportu (automatyczne wykrywanie zdarzeń drogowych, ważenie pojazdów w ruchu, zmiany organizacji ruchu poprzez wydzielanie dedykowanych pasów dla pojazdów transportu zbiorowego), których zasadność i efektywność wdrożenia badano

w późniejszym okresie, wykorzystując model wielopoziomowy (MST). Założenia do opracowania MST w architekturze systemu TRISTAR dotyczyły struktury funkcjonalnej i logicznej, oprogramowania do budowy narzędzi badawczych oraz zakresu integracji z pozostałymi modułami systemu TRISTAR. Miasto Gdynia było poligonem badawczym do opracowania i wdrożenia trzydziemodulowego modelu systemu transportu zasilanego z hurtowni danych systemu zarządzania ruchem TRISTAR jako narzędzia badawczego, umożliwiającego przeprowadzenie badań w ramach wybranych projektów pilotażowych w projekcie CIVITAS DYN@MO. Metodyka realizacji badań z budową i wykorzystaniem wielopoziomowego modelu ruchu została zaimplementowana w projekcie badawczym RID-4D, w którym model wielopoziomowy posłużył jako narzędzie do obliczenia wskaźników efektywności funkcjonowania systemu transportu, wykorzystanych w metodzie wielokryterialnej oceny wpływu usług ITS na sprawność i bezpieczeństwo ruchu drogowego na drogach zamiejskich.

Struktura funkcjonalna i logiczna MST

W strukturze MST (rys. 2) zostały wyszczególnione poziomy zarządzania oraz odpowiadające im warstwy (klasy modeli – makro-, mezo- i mikroskopowe), określające niezbędny poziom szczegółowości prowadzenia analiz i wykorzystania wyników. Poziomy zarządzania (strategiczny, taktyczny, operacyjny) definiują ponadto umiejscowienie poszczególnych warstw modelu w strukturach organizacyjnych organów administracyjnych odpowiedzialnych za zarządzanie transportem, w zależności od kompetencji, przede wszystkim w jednostkach planistycznych oraz zarządzających ruchem i transportem drogowym.



Rys. 2. Struktura modelu wielopoziomowego

Źródło: opracowanie własne na podst. [3], [4]

Narzędzia badawcze w MST

W zależności od celu zastosowania oraz poziomu szczegółowości można wyróżnić modele mikro-, mezo- i makroskopowe. Modele makroskopowe i mezoskopowe umożliwiają oszacowanie typowych miar sprawności sieci transportowej (np. łączny czas podróży pojazdów w sieci, pracę

przewozową, średnią prędkość, natężenie ruchu wynikające z rozkładu w sieci). Modele makroskopowe pozwalają m.in. na zdefiniowanie przepustowości dla różnych typów dróg, prędkości w ruchu swobodnym oraz funkcji oporu (zależności opisujące spadek prędkości wraz ze wzrostem natężenia ruchu) dla poszczególnych odcinków sieci drogowej. W przypadku modelowania sieci transportu publicznego możliwe jest uwzględnienie oporu odcinków ze względu na preferencje podróżującego w wyborze jednego z środków transportu zbiorowego. Modele mezoskopowe pozwalają dodatkowo odzwierciedlić wpływ elementów takich jak typy skrzyżowań, organizacja ruchu na skrzyżowaniach i sterowanie ruchem z wykorzystaniem sygnalizacji świetlnej, dzięki czemu podczas szacowania miar sprawności sieci transportowej brane są pod uwagę kolejki formujące się na skrzyżowaniach oraz straty czasu pojazdów. Modele mezoskopowe opisują większość elementów sieci i parametrów ruchu na wysokim poziomie szczegółowości, charakteryzując jednocześnie ich wzajemne oddziaływanie i zachowania w znacznie mniej szczegółowy sposób niż w przypadku modeli mikroskopowych (np. decyzja o wyborze pasa ruchu przez kierowcę wynika nie tak, jak w przypadku modeli mikroskopowych z wzajemnych oddziaływań między pojazdami, a z gęstości ruchu na danym pasie). Z kolei w podejściu mikroskopowym każdy pojazd w sieci analizowany jest na poziomie indywidualnym i podlega stałej kontroli podczas symulacji w zakresie czasu podróży, zmiany prędkości, przyspieszenia, trajektorii ruchu i zatrzymań z uwzględnieniem interakcji z innymi użytkownikami dróg oraz reakcji na bodźce zewnętrzne (np. spowodowane sygnalizacją świetlną lub informacjami wyświetlanymi na znakach zmiennej treści). Modele mikroskopowe zawierają trzy behawioralne składniki, które odpowiadają za ruch pojazdu w sieci, tj. modele jazdy za liderem, zmiany pasa ruchu oraz akceptacji luk czasowych [17]. Techniki mikrosymulacji pozwalają ponadto na oszacowanie zastępczych miar bezpieczeństwa ruchu, np. wykorzystując model oceny miar zastępczych (SSAM – Surrogate Safety Assessment Model) [18].

Ze względu na to, że poszczególne pakiety i programy komputerowe wspomagające budowę modeli systemów transportu posiadają funkcjonalności, które je wyróżniają i czynią użytecznymi dla różnych potrzeb, zasadne jest stosowanie szerokiego wachlarza oprogramowania zintegrowanego, uzupełniającego się oraz umożliwiającego wspomaganie procesu projektowania, planowania i zarządzania operacyjnego. Podczas prac badawczych, obejmujących wybór oprogramowania wspomagającego budowę narzędzi analitycznych (poszczególnych klas modeli), oprócz stopnia zaawansowania pakietów programów, diagnozy ich wykorzystywania przez jednostki naukowe i administracyjne na świecie, dokonano identyfikacji możliwości przepływu danych, pomiędzy poszczególnymi klasami modeli. Uwzględniono ponadto kryteria świadczenia lokalnych kadr w zakresie stosowania poszczególnych pakietów komputerowych, dostępność oprogramowania w jednostkach administracyjnych oraz moż-

liwość pozyskania i wykorzystania danych z innych modeli podróży (modelu krajowego, wojewódzkiego i aglomeracyjnego). Ostatecznie do realizacji modelu wielopoziomowego wybrano następujące pakiety oprogramowania: w klasie modeli makroskopowych – VISUM (PTV Group) [19], w klasie modeli mezoskopowych – SATURN (ATKINS and University of Leeds) [20], w klasie modeli mikroskopowych – VISSIM (PTV Group) [21]. Zasadne jest również opracowywanie nowych aplikacji, modeli i narzędzi, które pozwolą na usprawnienie i rozszerzenie możliwości zastosowania modelu oraz wykorzystania zakresu danych pozyskanych automatycznie.

Integracja modelu wielopoziomowego w SPR

Obecnie na świecie jednostki planowania i zarządzania transportem wykorzystują modele systemów transportu, jednakże najczęściej nie są one zintegrowane (pod względem organizacyjnym, logicznym i strukturalnym) w kompozycji wielopoziomowej oraz bezpośrednio z usługami lub będącymi zespołami usług systemami ITS, co wskazuje na innowacyjność rozwiązania wdrożonego w Gdyni.

W ramach badań naukowych rozpoznano możliwości wykorzystania danych z modułów i urządzeń systemu TRISTAR [4] w poszczególnych klasach modeli (wyniki badań podsumowano w tab. 1). Uwzględniono dane możliwe do pozyskania za pośrednictwem stacji pomiaru ruchu drogowego (wykorzystujące w detekcji pętle indukcyjne), dane z usług ITS rozpoznawania numerów rejestracyjnych pojazdów z wykorzystaniem technik przetwarzania obrazu (kamery ANPR), modele i aplikacje zastosowane w systemie TRISTAR do pozyskiwania wybranych danych przetworzonych (mezoskopowy model ruchu DRIVERS oraz aplikacja pCoq), urządzenia detekcji do rozpoznawania danych identyfikacyjnych urządzeń elektronicznych (skanery Wi-Fi, Bluetooth) oraz informacje możliwe do pozyskania z hurtowni danych systemu TRISTAR. W referacie [22] przedstawiono architekturę przepływu danych w zintegrowanym systemie zarządzania ruchem TRISTAR, w której uwzględniono strukturę gromadzenia i wymiany danych pomiędzy różnymi podsystemami, w tym z Systemem Planowania Ruchu. Zwrócono również uwagę na możliwość pozyskania dodatkowych zbiorów danych, które mogą być przydatne w modelowaniu systemów transportu, jakimi są dane z pojazdów poruszających się w sieci drogowej. Opisana idea została rozwinięta w artykule [23]. Obserwujemy obecnie intensyfikację rozwoju usług współpracujących C-ITS (Cooperative Intelligent Transport Systems), pozwalających na wymianę informacji pomiędzy pojazdem a infrastrukturą lub innymi pojazdami. W artykule wskazano kierunki działań, które umożliwią dostosowanie systemu TRISTAR do świadczenia usług C-ITS z uwzględnieniem konieczności integracji baz danych z Systemem Planowania Ruchu. Dane pozyskane z usług C-ITS w znaczącym stopniu przyczynią się do podniesienia dokładności analiz prowadzonych z wykorzystaniem MST oraz będą wspierać procesy kalibracji i weryfikacji modeli.

Tabela 1

Źródła danych dla poszczególnych klas modeli						
Makroskopowy (A), Mezoskopowy (B), Mikroskopowy (C)						
	Stacje pomiaru	DRIVERS	pCoq	Kamera ANPR	Skaner Wi-Fi	Hurtownia danych
Natężenia ruchu	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C		A,B,C
Struktura rodzajowa potoku ruchu	A,B,C					A,B,C
Średnia prędkość w przekroju	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C	A,B,C
Przepustowość/natężenie nasycenia	A,B					A,B
Struktura kierunkowa ruchu	A,B,C	A,B,C				
Czas przejazdu na odcinku drogi			A,B	A,B	A,B	A,B
Długość kolejek		B				B
Parametry sterowania (podział światła zielonego, przesunięcie fazowe, długość cyklu)			B			B
Średnie straty czasu na skrzyżowaniu						B
Straty czasu na wlotach skrzyżowania						B, C
Odstęp między pojazdami	B,C	B,C		B,C		
Prędkość chwilowa	C		C	C	C	
Czasy przejazdu transportem zbiorowym (TZ)						A
Opóźnienia/przyspieszenia pojazdów TZ						A
Czas obsługi pasażerów TZ na przystankach						A

Źródło: opracowanie własne na podst. [4]

Poziomy zarządzania i klasy modeli w strukturze wielopoziomowej

W kolejnych pracach badawczych zweryfikowano możliwość wykorzystania narzędzi MST na poszczególnych poziomach zarządzania i w poszczególnych klasach modeli.

Poziom strategiczny – klasa modeli makroskopowych

Poziom strategiczny obejmuje dostarczanie danych do opracowania polityki transportowej, wykonania prac planistycznych, wykonanie studiów sieciowych. Przewidziano wykorzystanie pakietu VISUM, gdyż zastosowany on jest już w modelach dla dróg krajowych oraz w modelu wojewódzkim i aglomeracyjnym. W pracy [24] przedstawiono proces budowy modelu oraz propozycję metody oceny funkcjonowania transportu zbiorowego z wykorzystaniem modelowania na poziomie makroskopowym z wykorzystaniem wskaźników obsługi i miar syntetycznych. W ramach prowadzonych badań naukowych opracowano również metodykę budowy modelu w strukturze czterostopniowej, biorąc pod uwagę dostępne dane.

Kolejny etap badań dotyczył modelowania charakterystyk ruchu z wykorzystaniem danych gromadzonych w bazach danych systemu TRISTAR. Opracowane modele i zależności były użyteczne w kalibracji modeli makro- i mezoskopowych w strukturze wielopoziomowej SPR. Usługi

ITS są cennym źródłem informacji o charakterystykach ruchu drogowego, zarówno w odniesieniu do transportu indywidualnego, jak i zbiorowego. Niestety, prowadzonych jest niewiele badań mających na celu opracowanie modeli umożliwiających szacowanie prędkości pojazdów transportu zbiorowego w zależności od warunków ruchu wzdłuż arterii miejskich, jak również modeli czasu podróży pojazdów oraz analiz fundamentalnych zależności parametrów ruchu z wykorzystaniem danych z rozwiązań ITS. W referacie [25] przedstawiono metodę modelowania prędkości pojazdów transportu zbiorowego na podstawie danych z systemu TRISTAR. W artykule wyjaśniono, w jaki sposób można gromadzić, wykorzystywać i łączyć różne dane w celu opracowania modeli prędkości. Przedstawiono wyniki analiz i zaproponowano model prędkości pojazdów transportu zbiorowego. Opracowany model prędkości dla dróg klasy G (drogi główne) o przekroju 2/2, z uwzględnieniem stopnia wykorzystania przepustowości, może być stosowany w aktualizacji istniejących rozkładów jazdy transportu zbiorowego, jak również został zastosowany podczas kalibracji modeli makroskopowych w MST.

Poziom taktyczny – klasa modeli mezoskopowych

Poziom taktyczny obejmuje dostarczanie danych do opracowania materiałów decyzyjnych dotyczących projektów transportowych (studia sieciowe, korytarzowe, studia wykonalności), opracowania projektów organizacji ruchu, strategii i projektów sterowania ruchem oraz oceny efektywności podejmowanych działań. Obiektem badań jest w tym przypadku sieć transportowa, wydzielony obszar sieci oraz ciąg drogowy lub uliczny. Przewidziano wykorzystanie w pracach badawczych oprogramowania SATURN lub programu VISUM, w zależności od celu badań naukowych i dostępnych danych.

W referacie [26] zaprezentowano metodykę badań i wybrane wyniki badań naukowych, mających na celu określenie efektywności wdrożenia Inteligentnego Systemu Sterownia Ruchem Regionu Podhalańskiego (ISSRRP). W badaniach naukowych wykorzystano modele mezoskopowe, które zostały opracowane na podstawie danych o parametrach ruchu z urządzeń detekcji i informacji wyświetlanych na znakach zmiennej treści ISSRRP. Modele zostały skalibrowane z wykorzystaniem danych o natężeniach ruchu i czasach przejazdu trasami alternatywnymi z uwzględnieniem możliwości wyboru trasy przez kierowców na podstawie informacji wyświetlanych na tablicach zmiennej treści. W badaniach rozkładów ruchu w warunkach przekazywania informacji kierowcom o czasach przejazdu trasami alternatywnymi sparametryzowano i zastosowano model deterministyczny, który zakłada wiedzę o czasie podróży poszczególnymi trasami, redukując czynnik losowy, jakim jest niepewność w procesie podejmowania decyzji.

W referacie [27] przedstawiono wyniki pierwszych w Polsce badań naukowych, w których podjęto próby modelowania czasu podróży na podstawie danych z usług ITS wzdłuż arterii miejskich. Wyniki pokazują, że zastosowane modele osiągnęły niesatysfakcjonujący poziom zgodności

z wartościami pomierzonymi i dlatego nie powinny być implementowane w modelach ruchu, wspomagających w czasie rzeczywistym systemy sterowania za pomocą sygnalizacji świetlnej. Wiąże się to z nadmiernym uogólnieniem fundamentalnych zależności parametrów ruchu drogowego (natężenie, gęstość, prędkość), które podlegają dynamicznym zmianom w zależności nie tylko od pory dnia, ale także od warunków atmosferycznych lub występowania zdarzeń niepożądanych. Dokładność wyników jest natomiast satysfakcjonująca w przypadku zastosowania wyników badań w kalibracji modelu ruchu dla obiektu, jakim jest odcinek drogi. W ramach prac rozwiązano problem badawczy w zakresie opracowania modeli zależności parametrów ruchu, które zostały wykorzystane w kalibracji modeli makroskopowego i mezoskopowego w strukturze MST.

Wielopoziomowy model ruchu (w warstwach makroskopowej i mezoskopowej) posłużył ponadto do realizacji pracy badawczej, w której analizowano wpływ wyznaczenia dedykowanych miejsc dostaw w pasie drogowym na sprawność systemu transportu miasta Gdyni [28]. W związku ze specyfiką sposobu obsługi dostaw, która determinuje czasową zajętość pasa drogowego, w metodyce badań wykorzystano model dynamicznego rozkładu ruchu. W celu uzyskania bardziej wiarygodnych wyników w procesie stochastycznego rozkładu ruchu w sieci zastosowano model quasi-dynamiczny, w którym formujące się w układzie drogowym kolejki pojazdów są uwzględniane w kolejnych przedziałach czasowych symulacji. Rozkład dynamiczny umożliwia odzwierciedlenie procesu, w którym pojazd dostawczy zatrzymuje się w pasie drogowym przez krótki czas. Model uwzględnia zatem dynamikę zmian warunków ruchu w przypadku zajęcia pasów w wyznaczonych dla pojazdów dostawczych miejscach oraz zmiany parametrów ruchu rozłożone w czasie. W ramach badań przeanalizowano również wpływ wdrożenia rozwiązania na środowisko naturalne poprzez oszacowanie emisji spalin. Przeprowadzone prace badawcze wpływu wyznaczenia dedykowanych miejsc dostaw na sprawność systemu transportu są pierwszymi w Polsce. Pierwszy etap systemu dedykowa-

nych miejsc dostaw został wprowadzony w ubiegłym roku w obszarach centralnych Gdyni.

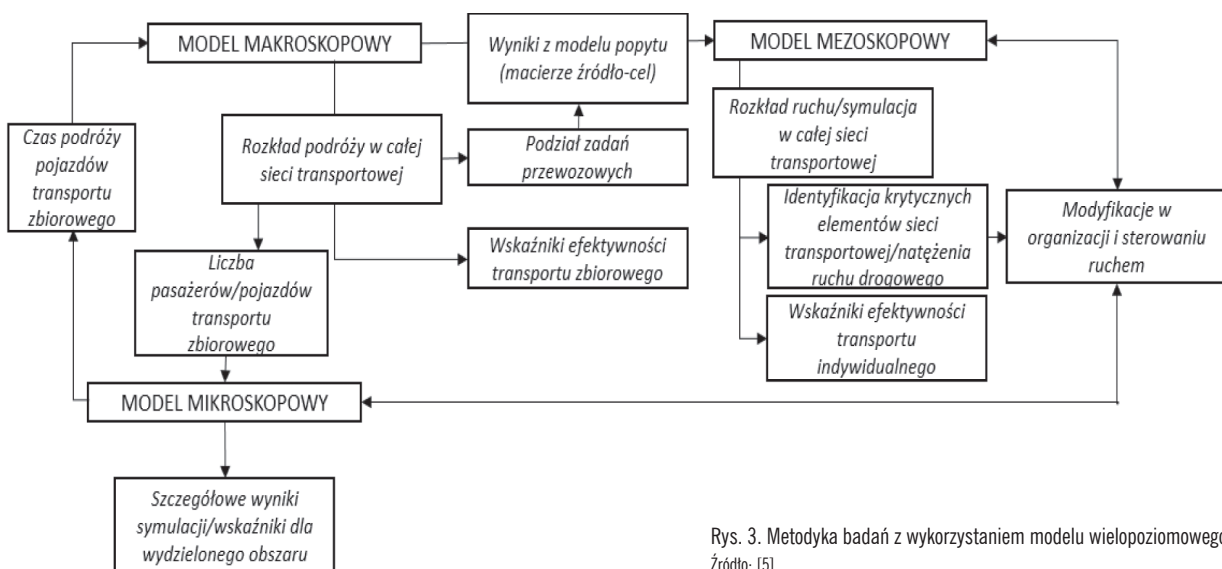
Poziom operacyjny – klasa modeli mikroskopowych

Poziom operacyjny obejmuje dostarczanie wyników badań, które stanowią podstawę do opracowania szczegółowych projektów organizacji ruchu, programów sterowania ruchem, projektów obsługi transportowej wybranych obiektów oraz wizualizacji funkcjonowania obiektów transportowych. Obiektem badań jest w tym przypadku ciąg drogowy lub uliczny, odcinek linii transportu zbiorowego lub pojedyncze skrzyżowanie. Przewidziano wykorzystanie w pracach badawczych oprogramowania VISSIM. W projekcie CIVITAS DYN@MO modele mikroskopowe zostały wykorzystane między innymi do przygotowania symulacji ruchu na wybranych skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną w ramach badań mających na celu wybór logiki sterowania, która pozwala na priorytetyzację niechronionych użytkowników dróg [29].

Przedstawione w niniejszym artykule metody badań zastosowano do przygotowania metodyki analiz badawczych w projekcie RID 4D. Modele mikroskopowe zostały wykorzystane między innymi w zadaniu badawczym, jakim było określenie wpływu wybranych usług ITS na sprawność i bezpieczeństwo ruchu oraz wskazanie możliwości poprawy funkcjonowania obiektu transportowego [30], [31], [32]. Modele mikrosymulacyjne opracowane w ramach projektu umożliwiły uzyskanie informacji na temat trajektorii przemieszczania się każdego pojazdu w ruchu drogowym. W ramach badań przeprowadzono analizy trajektorii, które umożliwiły zastosowanie zastępczych miar bezpieczeństwa ruchu poprzez oszacowanie oczekiwanej liczby konfliktów ruchowych w różnych scenariuszach organizacji i sterowania ruchem.

Integracja poziomów zarządzania i klas modeli

Struktura MST umożliwia elastyczny wybór i wykorzystanie poszczególnych klas modeli i ich grupowanie w zależności od zdefiniowanego zadania badawczego i celu badań



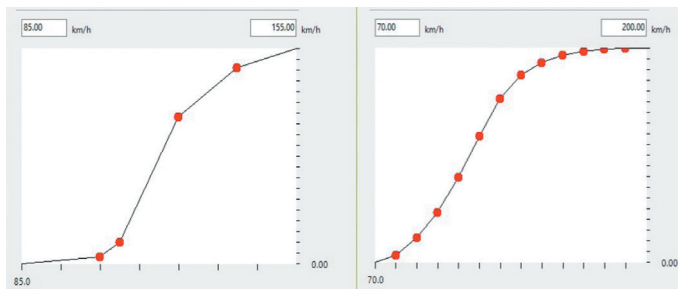
Rys. 3. Metodyka badań z wykorzystaniem modelu wielopoziomowego systemów transportu
Źródło: [5]

naukowych, opracowanej metodyki analiz oraz dostępnych danych. Zastosowanie wielopoziomowego modelu transportu w badaniach, w którym wykorzystano wszystkie klasy modeli przedstawiono na przykładzie analiz efektywności wdrożenia wydzielonych pasów dla pojazdów transportu zbiorowego [5]. W artykule przedstawiono powiązania poszczególnych warstw modelu wielopoziomowego, metodykę badań z wykorzystaniem modelu (rys. 3) oraz wyniki badań naukowych.

Przepływ danych pomiędzy poszczególnymi poziomami modelu możliwy jest dzięki zastosowaniu odniesień referencyjnych (jednolita numeracja rejonów transportowych, węzłów lub połączeń między węzłami). Model makroskopowy stanowi bazę do badań związanych ze zmiennością popytu transportowego (zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym oraz danych socjoekonomicznych i demograficznych) oraz podziałem zadań przewozowych pomiędzy poszczególnymi środkami transportu, z uwzględnieniem zmian popytu na transport zbiorowy lub indywidualny na skutek wprowadzanych zmian organizacji ruchu (ze względu na zmiany czasu lub kosztów podróży). Model makroskopowy stanowi ponadto podstawę do wstępnych analiz rozkładu ruchu i podróży odbywanych transportem zbiorowym i indywidualnym. Macierze podróży, obliczone w modelu makroskopowym stanowią podstawę do rozkładu ruchu w modelu mezoskopowym (korekta rozkładu z uwzględnieniem szczegółowej organizacji ruchu). Model mezoskopowy umożliwia identyfikację krytycznych elementów sieci transportowej pod kątem kolejek na wlotach skrzyżowań z uwzględnieniem blokowania wstecznego oraz analizę możliwych usprawnień organizacji ruchu, które mogą przyczynić się do poprawy funkcjonowania systemu transportowego. W badaniach uwzględnia się wpływ wprowadzanych usprawnień na całą sieć transportową miasta. Zalecane zmiany organizacji ruchu mogą być uwzględnione w mikrosymulacji, którą zasilają dane z modelu mezoskopowego w odniesieniu do transportu indywidualnego i makroskopowego w odniesieniu do transportu zbiorowego. Model mikroskopowy pozwala na szczegółową analizę wpływu proponowanego usprawnienia na poziomie lokalnym oraz szczegółowe określenie niezbędnych zmian np. w systemie sterowania ruchem (zmiany te można wprowadzić ponownie do modelu mezoskopowego i powtórzyć analizę). W modelach mezoskopowych i mikroskopowych przeprowadza się korektę rozkładu ruchu, czasu podróży poszczególnymi odcinkami sieci transportu indywidualnego i zbiorowego, które to parametry zostaje uaktualniony model makroskopowy. W modelu makroskopowym przeprowadzony staje ponowny rozkład, co pozwala na modyfikację macierzy podróży dla poszczególnych środków transportu z uwzględnieniem zaktualizowanych wyborów podróżujących. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymujemy wartości kluczowych wskaźników efektywności systemu transportu zbiorowego, a po przeprowadzeniu ponownego rozkładu w modelu mezoskopowym dla transportu indywidualnego. Porównanie kluczowych wskaźników efek-

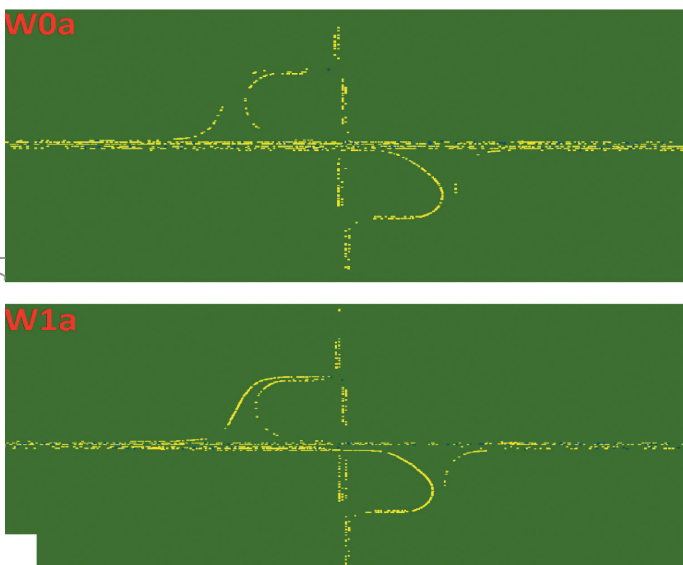
tywności pozwala na wybór pożądanego rozwiązania, umożliwiając rozwiązanie problemu badawczego. Opracowana metodyka analiz została wykorzystana w badaniach zasadności realizacji wydzielonych pasów autobusowych i wpływu zmian na sprawność systemu transportowego miasta Gdyni. Wiele z planowanych i analizowanych zmian zrealizowano. MST został ponadto wykorzystany między innymi podczas opracowywania Planu Zrównoważonej Mobilności Miejskiej dla Gdyni [33] w procesie podejmowania decyzji i w pracy nad opracowaniem planu oraz podczas konsultacji społecznych, między innymi poprzez prezentację wyników i wizualizację badań na dedykowanym portalu internetowym, dzięki czemu został osiągnięty cel wyznaczony podczas przygotowywania założeń do realizacji MST.

Przedstawione w niniejszym artykule metody badań zostały wykorzystane do przygotowania metodyki analiz badawczych w projekcie RID 4D. Przykładowe wyniki przedstawiono dla badań wpływu wybranych usług ITS na poziom sprawności i bezpieczeństwa ruchu [30], [31], [32]. Na podstawie danych pozyskanych z funkcjonujących na polskich autostradach i drogach ekspresowych rozwiązań ITS (przede wszystkim danych o parametrach ruchu ze stacji pomiaru ruchu, danych pozwalających na wyznaczenie tras pojazdów ciężarowych z systemu ViaToll oraz danych o komunikatach przekazywanych kierowcom za pośrednictwem znaków zmiennej treści), a także informacji o natężeniach ruchu w sieci drogowej z wykorzystaniem Krajowego Modelu Ruchu Drogowego oraz Generalnego Pomiaru Ruchu, opracowano modele testowe korytarza obejmującego drogi główne, alternatywne i połączenia między nimi z uwzględnieniem klasy i przekroju drogi głównej, topologii sieci drogowej w korytarzu, typu skrzyżowań i węzłów drogowych oraz intensywności ruchu. Na podstawie modeli testowych zidentyfikowano i oszacowano wartości kluczowych wskaźników efektywności systemu transportu. Obliczone wskaźniki stanowiły wkład do zasilania modelu z wykorzystaniem metody AHP (Analytic Hierarchy Process) w celu identyfikacji usług, które mają największy wpływ na efektywność i bezpieczeństwo ruchu. Weryfikację jakości wyników uzyskanych z modeli testowych i poprawności modelu AHP przeprowadzono z wykorzystaniem danych z rzeczywistych układów drogowych, które również podlegały modelowaniu. W badaniach naukowych wykorzystano ideę MST. Innowacyjność zaproponowanego podejścia polega na uwzględnieniu w modelu tras alternatywnych i przeprowadzeniu badań w korytarzu autostrady i drogi ekspresowej. Do oceny wpływu usług ITS na bezpieczeństwo i efektywność ruchu wykorzystano makroskopowe modele symulacyjne (oprogramowanie VISUM), modele mezoskopowe (SATURN) oraz modele mikroskopowe (PTV VISSIM). Model makroskopowy wykorzystano do pozyskania wyników rozkładu ruchu, które zaimplementowano w modelach mezo- i mikroskopowych. Podstawowe analizy przeprowadzono w modelach mezo- i mikroskopowych, które zostały skalibrowane danymi z funkcjonujących rozwiązań ITS (rys. 4).



Rys. 4. Porównanie domyślnego rozkładu prędkości pojazdów osobowych w modelu VISSIM (po lewej) i rozkładu empirycznego w warunkach polskich (po prawej) na drodze ekspresowej
Źródło: opracowanie własne na podst. projektu RID 4D oraz [32]

W badaniach z zakresu oceny bezpieczeństwa ruchu drogowego prowadzonych w projekcie RID 4D wykorzystano miary zastępcze. Parametry ruchu drogowego i zachowania użytkowników dróg, które umożliwiają identyfikację i ocenę zmian mających wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego określa się jako zastępcze miary bezpieczeństwa. Zastępcze miary bezpieczeństwa mają swoje źródło w konfliktach w ruchu drogowym. Teoria konfliktów jest metodą stosowaną podczas badań terenowych w celu identyfikacji zdarzeń konfliktowych w układzie drogowym poprzez odnotowywanie przypadków nagłego hamowania lub zmiany toru jazdy w celu uniknięcia przez kierowcę zderzenia z innym uczestnikiem ruchu drogowego. Zastępcze miary bezpieczeństwa można również oszacować za pomocą technik mikrosymulacji (rys. 5). Wyniki badań zostały wprowadzone do modelu AHP, umożliwiając uwzględnienie w analizach wielokryterialnych kryterium bezpieczeństwa ruchu.



5. Lokalizacja konfliktów na drodze ekspresowej (S 2/2 – natężenie ruchu 1700 pojazdów/pas) bez usługi dozowania ruchu na wjazdach (W0a) i z usługą (W1a)

o: opracowanie własne na podst. projektu RID 4D oraz [32]

Podsumowanie

artykule przedstawiono przykłady zastosowania modelu ruchu różnych klas w warstwach planistycznego i operacyjnego zarządzania transportem oraz w projektach dawczych. MST został ponadto zastosowany w ramach

badania naukowych w projekcie FLOW (HORIZON 2020) [34] dotyczących wyboru rozwiązań, które prowadzą do poprawy warunków ruchu wszystkich użytkowników dróg, ze szczególnym uwzględnieniem pieszych i rowerzystów (w ramach projektu MST został rozwinięty o model ruchu rowerowego) oraz w ramach projektu CIVITAS DYN@MO do oceny wpływu występowania zdarzeń niepożądanych w zakresie sprawności systemu transportu, w symulacjach wykrywania zdarzeń niepożądanych na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną oraz w badaniach związanych z drogowym transportem ładunków (opracowanie metodyki i dokonanie oceny wpływu zastosowania systemu ważenia pojazdów w ruchu w ograniczeniach ruchu ciężkiego na warunki ruchu i emisję spalin). Wielopoziomowy model systemów transportu i dane pozyskane z rozwiązań ITS mogą również znaleźć zastosowanie w systemach zarządzania bezpieczeństwem ruchu. Dzięki wdrożeniu w ostatnich latach nowych usług ITS w polskich miastach i na drogach krajowych możliwe jest usprawnienie systemu zarządzania bezpieczeństwem ruchu drogowego na poziomie strategicznym (planowanie) i operacyjnym. Narzędzia SPR mogą wspomagać opracowywanie strategii zarządzania ruchem podczas wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Bazy zawierające dane powinny być integrowane i udostępniane jako „otwarte dane” w celu rozwoju i poprawy jakości usług ITS, stymulując powstawanie nowych oraz umożliwiając zasilanie modeli transportowych w sytuacjach kryzysowych np. w ramach planów ratowniczych.

Wpisanie wykorzystania MST w struktury administracyjne zarządzania transportem determinuje konsolidację współpracy poszczególnych jednostek, co można zaobserwować na przykładzie miasta Gdyni, gdzie wdrożenie Systemu Planowania Ruchu dostarczyło podstaw do intensyfikacji współdziałania i integracji działań komórek planistycznych oraz zespołów zarządzających ruchem drogowym i transportem zbiorowym. Połączenie w jedną strukturę modelu wielopoziomowego z SPR, który został realizowany w ramach systemu TRISTAR, pozwoliło na wykorzystanie danych pochodzących z automatycznych pomiarów ruchu w sferze operacyjnej zarządzania transportem, jak również w analizach planistycznych.

Przeprowadzone badania naukowe potwierdzają, że dane pozyskane z usług ITS mogą być z powodzeniem wykorzystywane do opracowania i weryfikacji modeli systemów transportu oraz kalibrowania ich do warunków lokalnych. Dzięki szerokiemu zakresowi danych gromadzonych w sposób ciągły, możliwa jest aktualizacja, rozwijanie modeli i opracowywanie nowych. Struktura baz danych w systemach zarządzania ruchem oraz możliwy do pozyskania format danych, ich znaczna liczba oraz stopień agregacji, często wymagają dodatkowych zabiegów przetworzenia danych w celu dostosowania zbiorów dla celów badawczych. Należy zwracać uwagę na rzetelność i dokładność pozyskiwanych informacji, które wymagają wstępnej weryfikacji przed wykorzystaniem ich w modelowaniu.

Przedstawione w artykule prace pozwoliły na zdefiniowanie wielu szczegółowych procedur postępowania badawczego oraz sposobu opisu problemów i metod badawczych. Metody te można wykorzystać do rozwiązania różnorodnych, zaawansowanych zagadnień naukowych i inżynierskich. Opracowane algorytmy postępowania, w tym modele matematyczne i symulacyjne, umożliwiły pozyskanie wyników pozwalających na bardzo szczegółowy przegląd parametrów opisujących stan systemu transportu z uwzględnieniem zjawisk statycznych i dynamicznych.

Literatura

- Lerner W., *The Future of Urban Mobility. Towards Networked, Multimodal Cities of 2050*, Available online: <https://roberto-igarza.files.wordpress.com/2009/07/rep-the-future-of-urban-mobility-2050-little-2011.pdf> (accessed on 7 August 2019), 2011.
- Sivakumar A., *Modelling transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies*, Imperial College London: London, UK, 2007.
- Oskarbski J., *Perspectives of telematics implementation in Tri-city transport systems management and planning*, 2011. doi:10.1007/978-3-642-24660-9_27.
- Oskarbski J., Jamroz K., Birr K., *Application of multi-level transport model for the TRISTAR system*, in: DTA-5th Int. Symp. Dyn. Traffic Assign., Salerno, Włochy, 2014. doi:10.13140/2.1.3760.8481.
- Okraszewska R., Romanowska A., Wołek M., Oskarbski J., Birr K., Jamroz K., *Integration of a multilevel transport system model into sustainable Urban mobility planning*, Sustain. 10 (2018). doi:10.3390/su10020479.
- Smith J., Blewitt R., *Traffic Modelling Guidelines. Traffic Manager and Network Performance Best Practice*, Version 3 (Transport for London, 2010). Available online: <http://content.tfl.gov.uk/traffic-odellingguidelines.pdf> (accessed on 12 September 2019), 2010.
- Dimitriou H.T., Thompson R., *Strategic Planning for Regional Development in UK*, Routledge: Abingdon, UK, 2008.
- Bliemer M.C.J., Mulley C., Moutou C.J., *Handbook on Transport and Urban Planning in the Developed World*, Edward Elgar Publishing Ltd, 2016.
- <http://civitas.eu/content/dynmo>, (2013).
- Oskarbski J., Jamroz K., Budziszewski T., Birr K., Oskarbski G., Gumińska L., Oskarbska I., Michalski L., *Report on the traffic model development for SUMP Implementation Status Report G3.1*, Civitas Dyn@mo Project. <https://civitas.eu/content/d33-implementation-status-report-g31-report-traffic-model-development-sump> (accessed on 7 August 2019), Politechnika Gdańska, 2016.
- Jamroz K., Oskarbski J., *TRISTAR platformą przyszłej integracji transportu w Aglomeracji Trójmiejskiej*, Zeszyty Naukowe Uniw. Gdańskiego. Ekon. Transp. i Logistyka, 2006.
- Oskarbski J., *Struktura funkcjonalna systemu zarządzania transportem w Trójmieście – TRISTAR*, „Przegląd Komunalny”, 2011, nr 7–8.
- Jamroz K., Oskarbski J., et al., *Koncepcja ogólna Systemu Zarządzania Ruchem na obszarze Gdyni*, Katedra Inżynierii Drogowej PG, 2002.
- Jamroz K., Oskarbski J., et al., *Koncepcja ogólna Systemu Zarządzania Ruchem na Obwodnicy Trójmiasta*, Katedra Inżynierii Drogowej PG, 2002.
- Jamroz K., Krystek R., et al., *Koncepcja zintegrowanego systemu zarządzania ruchem na obszarze Gdańska, Gdyni i Sopotu*, Politechnika Gdańska. Gdańsk, 2007.
- Oskarbski J., Jamroz K., *ITS TRISTAR w Aglomeracji Trójmiejskiej – przełamywanie barier*, in: Pol. Kongr. ITS, Warszawa 2008.
- Bevrani K., Chung E., *An examination of the microscopic simulation models to identify traffic safety indicators*, Int. J. Intell. Transp. Syst. Res., 2012, nr 10.
- Gettman D., Sayed T., Pu L., Shelby S., *Surrogate Safety Assessment Model and Validation*, Fhwa-Hrt-08--51. (2008). doi:10.3109/17453674.2011.581265.
- PTV Group, VISUM Fundamentals, 2012.
- ATKINS, SATURN User Manual ver. 11.3, 2015.
- PTV Group, PTV VISSIM 10 Manual, 2017.
- Oskarbski J., Zawisza M., Żarski K., *The structure of the data flow in integrated urban traffic management systems – the case of TRISTAR system*, Arch. Transp. Syst. Telemat., 2016, nr 9.
- Oskarbski J., Zawisza M., Żarski K., Jamroz K., *Possible directions for development of C-ITS services in cities on the example of the TRISTAR system*, Arch. Transp. Syst. Telemat., 2018, nr 11.
- Oskarbski J., Miszewski M., *Ocena funkcjonowania systemu transportu zbiorowego w Gdyni z wykorzystaniem programu Visum*, Autobusy – Tech. Eksploat. Syst. Transp., 2013, nr 3.
- Oskarbski J., Birr K., Miszewski M., Żarski K., *Estimating the average speed of public transport vehicles based on traffic control system data*, in: 2015 Int. Conf. Model. Technol. Intell. Transp. Syst., IEEE, 2015. doi:10.1109/MTITS.2015.7223269.
- Oskarbski J., *Automatyzacja zarządzania ruchem w warunkach wystąpienia zdarzenia drogowego*, „Logistyka”, 2014, nr 4.
- Oskarbski J., Jamroz K., Smolarek L., Zawisza M., Żarski K., *Analysis of possibilities for the use of volume-delay functions in the planning module of the TRISTAR system*, Transp. Probl., 2017, nr 12. doi:10.20858/tp.2017.12.1.4.
- Oskarbski J., Kaszubowski D., *Applying a mesoscopic transport model to analyse the effects of urban freight regulatory measures on transport emissions—an assessment*, Sustain, 2018, nr 10. doi:10.3390/su10072515.
- Oskarbski J., Gumińska L., Miszewski M., Oskarbska I., *Analysis of Signalized Intersections in the Context of Pedestrian Traffic*, in: Transp. Res. Procedia, 2016. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.229.
- Oskarbski J., Gumińska L., Żarski K., *Influence of Toll Collection Method on Motorways on Traffic Safety and Efficiency*, in: Manag. Perspect. Transp. Telemat. Commun. Comput. Inf. Sci., Springer Berlin Heidelberg, 2017. doi:10.1007/978-3-319-97955-7_10.
- Oskarbski J., Gumińska L., Marcinkowski T., Mowiński K., Oskarbska I., Oskarbski G., Zawisza M., Żarski K., *Methodology of research on the impact of ITS services on the safety and efficiency of road traffic using transport models*, MATEC Web Conf. 12th Int. Road Saf. Conf. GAMBIT 2018 - “Road Innov. Saf. - Natl. Reg. Perspect. 231 (2018) 1–9. doi:https://doi.org/10.1051/mateconf/201823102008.
- Oskarbski J., Żarski K., *Methodology of research on the impact of ramp metering on the safety and efficiency of road traffic using transport models*, in: 6th Int. Conf. Model. Technol. Intell. Transp. Syst., IEEE, Cracow, Poland, 2019: pp. 1–8. doi:doi:10.1109/MTITS.2019.8883355.
- Czapnik M., Czermański E., Franek Ł., Furkal J., Hebel K., Jagiełło A., Kaszubowski D., Kuropatwiński P., Lewandowski K., Marszałkowska K., Miszewski M., Orcholska K., Oskarbski J., Pawłowska A., Polakowski R., Przybyłowski A., Romanowska A., Wołek M., Wyszomirski O., *Plan zrównoważonej mobilności miejskiej dla Gdyni*, Gdynia, 2016.
- <http://h2020-flow.eu/>, (2015).