

Dr hab. inż. Grzegorz Karoń, prof. PŚ
Politechnika Śląska
Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej
Katedra Systemów Transportowych, Inżynierii Ruchu i Logistyki
Ul. Krasińskiego 8
40-019 Katowice

Katowice, dn. 06.09.2023 r.

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Jana Paszkowskiego

pt. „Parametrizing macroscopic road network model of traffic-calmed zones”

(„Parametryzacja sieci drogowej w modelach makrosymulacyjnych
z uwzględnieniem stref ruchu uspokozonego”)

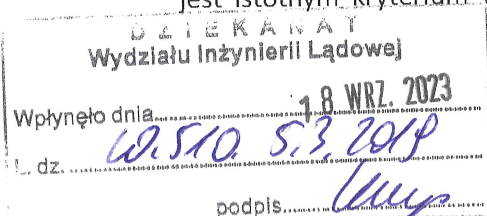
Promotorzy (Supervisors):
prof. dr hab. inż. Andrzej Szarata
Dr. rer. nat. Matthias Richter, prof. WHZ

Scientific consultations: dr hab. inż. Vitalii Naumov, prof. PK, dr hab. inż. Jacek Chmielewski
Layout correction: Marta Buczyńska, Language correction: Krystofer Mackie

*Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki
Krakowskiej, dr. hab. inż. Lucyny Domagały, prof. PK, z dnia 29 czerwca 2023 r.*

1. Ocena wyboru tematu pracy, założeń badawczych oraz układu pracy

Modelowanie systemów i procesów transportowych jest podstawą analiz stanu aktualnego oraz doboru i oceny rezultatów wielu różnorodnych działań związanych z kształtowaniem potoków ruchu w sieciach transportowych. Szczególne znaczenie mają takie działania, które zwiększają bezpieczeństwo uczestników ruchu drogowego oraz stwarzają korzystne warunki dla życia mieszkańców miast i aglomeracji miejskich. Do działań tych zalicza się środki uspokojenia ruchu drogowego, których zadaniem jest przede wszystkim takie oddziaływanie na zachowania kierowców, aby rezultatem było zmniejszenie przez nich prędkości jazdy i zwiększenie uwagi na pozostałych uczestników ruchu drogowego, w szczególności na pieszych i rowerzystów. Jednak z punktu widzenia efektywności sieci transportowej mniejsza prędkość jazdy to dłuższy czas podróży, który wraz z kosztami podróży jest istotnym kryterium wyboru trasy przez kierowców, zarówno w ruchu osobowym, jak



również w przewozie ładunków. Prędkość jazdy i czas podróży są również w sposób fundamentalny zależne od natężenia i gęstości potoków ruchu na odcinkach dróg i ulic, co ma szczególne znaczenie podczas wyboru trasy w godzinach szczytowych, w warunkach kongestii. Odzworowanie tych zjawisk w modelach transportowych makroskopowych oraz w modelach mikroskopowych odbywa się na różnym poziomie szczegółowości i z wykorzystaniem różnych danych wejściowych oraz formuł, modeli, metod i narzędzi obliczeniowych.

Tematem pracy jest parametryzacja sieci drogowej w zakresie modelowania funkcji VDF (*Volumetric Delay Function*) dla odcinków z funkcjonującymi środkami uspokojenia ruchu drogowego (*traffic-calmed links*), czyli funkcji opisującej czas podróży na odcinkach sieci w modelach makroskopowych. Podjęty temat jest aktualny i ważny, ponieważ dotyczy modeli transportowych – podstawowych narzędzi analitycznych w pracach naukowo-badawczych i wdrożeniowych. W związku z dużą różnorodnością działań w ramach kształtowania mobilności miejskiej i zrównoważonego wykorzystania systemów transportowych, uwzględniających m.in. projektowanie oraz wdrażanie środków technicznych i organizacyjnych kształtujących potoki ruchu drogowego, istnieje wyraźna potrzeba aktualizacji i rozwoju modeli transportowych w zakresie selektywnej parametryzacji sieci drogowej oraz dokładniejszego modelowania rozkładu potoków ruchu. Czynnikiem wspierającym prace naukowo-badawcze w tym zakresie są współczesne możliwości techniczne automatyzacji gromadzenia i przetwarzania danych oraz metody i narzędzia analityczne z zastosowaniem uczenia maszynowego oraz sztucznej inteligencji.

W pracy wskazano i właściwie uzasadniono, że istnieje luka badawcza w odpowiednio dokładnym odzworowaniu wpływu środków uspokojenia ruchu drogowego na zachowania kierowców, zarówno pod względem zmian prędkości jazdy, jak również w kwestii wyboru przez nich trasy w sieci, a w rezultacie na dokładność odzworowania rozkładu potoków ruchu w całej sieci drogowej. Zwrócono również uwagę na istotny fakt – ulice z ruchem uspokojonym są zazwyczaj poza głównymi korytarzami sieci drogowej, więc brakuje na nich odpowiedniej infrastruktury automatycznego pomiaru ruchu, tj. pętli indukcyjnych lub kamer wideo. Następnie trafnie powiązano możliwości analityczne obu typów modeli transportowych, tj. mikroskopowego i makroskopowego, do poprawy dokładności odzworowania wymienionych zjawisk, a do zebrania danych zastosowano metodę wideorejestracji z użyciem drona (UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*), co wciąż jest podejściem o charakterze innowacyjnym, m.in. ze względu na wymaganą dużą dokładność i szczegółowość danych niezbędnych do wykonania obliczeń i analiz korygujących dotychczas stosowane metody.

Rezultatem pracy jest metoda doboru i kalibracji funkcji VDF uwzględniająca wpływ środków uspokojenia ruchu na odcinkach sieci i wykorzystująca niezależną od infrastruktury transportowej lotniczą wideorejestrację potoków ruchu z użyciem UAV. Podstawowe założenia opracowanej metody wykorzystują związki pomiędzy oddziaływaniem środków uspokojenia ruchu na zachowania kierowców, których wynikiem są zmiany prędkości jazdy i zwiększenie czasu podróży na odcinkach. Z kolei czas podróży wpływa na wybór przez kierowców tras w sieci. Rezultatem są potoki ruchu kształtujące warunki ruchu, od ruchu swobodnego do ruchu zatłoczonego (kongestii), i zmieniające ogólny czas podróży na trasach, będący kryterium wyboru tras.

Recenzowana rozprawa została napisana w języku angielskim. Liczy 139 stron i w zasadniczej części składa się z siedmiu rozdziałów merytorycznych, ponumerowanych od 1 do 7, streszczeń w języku angielskim i polskim, wykazu literatury (251 pozycji), spisów rysunków (64), tabel (11) oraz formuł (9). Treść dysertacji została poprawnie podzielona na rozdziały – zgodnie z zasadami analizy i syntezy systemowej.

2. Krytyczna ocena poszczególnych części i aspektów rozprawy

W rozdziale 1 (1. *Introduction*) przedstawiono główny problem naukowo-badawczy oraz cel pracy, tj. rozwiązanie problemu estymacji funkcji VDF (*Volume Delay Function*) dla odcinków dróg z ruchem uspokojonym przez opracowanie odpowiedniej metody. Podstawowe założenia metody dotyczą identyfikacji zachowań kierowców podczas jazdy na odcinku wyposażonym w środki uspokojenia ruchu oraz odtwarzania tych zachowań w modelach mikroskopowych i makroskopowych, w sposób odpowiadający cechom charakterystycznym tych modeli, tj. mikrosymulacji ruchu pojazdów – w modelach mikroskopowych oraz rozkładowi potoków ruchu na sieć drogową – w modelach makroskopowych. W pracy przyjęto, że zachowania kierowców charakteryzowane są trajektoriami ruchu pojazdów opisanymi pozycją x pojazdu na drodze oraz prędkością jazdy V i jej zmianami, tj. przyspieszaniem, spowalnianiem, hamowaniem, ruszaniem z miejsca, z odniesieniem tych charakterystyk do rodzaju i miejsca lokalizacji środków uspokojenia ruchu. Takie założenia wymagały zastosowania odpowiednich metod i narzędzi do badania ruchu pojazdów na odcinku w sposób ciągły, w celu wyznaczania profilu prędkości $V(x)$.

Przeprowadzone w pracy doświadczenia potwierdziły tezę, że środki uspokojenia ruchu kształtują funkcję VDF oraz wyniki rozkładu potoków ruchu w makroskopowym modelu transportowym, szczególnie w warunkach dużego stopnia nasycenia odcinków potokami ruchu, czyli w warunkach zatłoczenia (kongestii). Przyjęto zatem następujące etapy pracy naukowo-badawczej w celu opracowania autorskiej metody estymacji tej funkcji:

- gromadzenie i przetwarzanie danych video w celu identyfikacji trajektorii ruchu pojazdów na badanym odcinku oraz wyznaczenia profilu prędkości wraz z charakterystykami opisującymi zachowania kierowców pod wpływem określonych środków uspokojenia ruchu drogowego; przyjęto, że zakres i szczegółowość danych odpowiadają potrzebom budowy modelu mikrosymulacyjnego ruchu dla badanego odcinka sieci drogowej,
- budowa i kalibracja mikrosymulacyjnego modelu ruchu dla badanego odcinka; przyjęto, że wykorzystany zostanie model Wiedemanna zaimplementowany w środowisku mikrosymulacyjnym PTV Vissim,
- zastosowanie zbudowanego modelu mikrosymulacyjnego do modelowania funkcji VDF dla ruchu przed i po instalacji środków uspokojenia ruchu; przyjęto, że spośród wielu typów funkcji VDF wykorzystany zostanie typ BPR2,
- analiza wpływu funkcji VDF na czas podróży i na zmiany rozkładu potoków ruchu w sieci w modelu makroskopowym; przyjęto, że w analizach porównane zostaną rozkłady potoków z zastosowaniem funkcji BPR2 skalibrowanych dla warunków przed i po uspokojeniu ruchu wraz z uwzględnieniem zmian przepustowości,
- identyfikacja kierunków i zagadnień w ramach przyszłych prac naukowo-badawczych będących kontynuacją tematyki zapoczątkowanej pracą dokorską.

Syntezę przeglądu literatury przedstawiono w rozdziale 2 (2. *Literature review*). Na początku podano podstawowe informacje dotyczące dwóch rodzajów modeli transportowych makroskopowych, tj. modeli bazujących na podróżach (*trip-based*) oraz modeli bazujących na aktywnościach (*activity-based models*). Następnie scharakteryzowano jeden z powszechnie stosowanych modeli *trip-based*, tj. model czterostadiowy (2.3. *Four step model*) ze szczególnym uwzględnieniem czwartego etapu modelowania, czyli etapu rozkładu potoków ruchu na sieć drogowo-uliczną (2.3.4. *Traffic assignment*) wykorzystującego

w obliczeniach funkcje VDF różnych typów (2.4. *Volume-Delay functions*; 2.4.1. *Existing types of VDFs*). Taki zakres omawiania modeli transportowych makroskopowych wiąże się zasadniczo z zakresem pracy doktorskiej. Poruszono również zagadnienia dotyczące przekraczania przepustowości przez potoki ruchu (2.4.2. *Solving the problem of demand exceeding capacity*) oraz zagadnienia dotyczące metod estymacji funkcji VDF (2.4.3. *Methods of VDFs estimation*) na przykładzie wybranych modeli transportowych dla krajowych obszarów miejskich. W tabeli 1 brakuje wykazu oznaczeń zastosowanych w zestawionych formułach funkcji VDF.

Kolejna część rozdziału 2 dotyczy modeli mikroskopowych mikrosymulacyjnych (2.5. *The Microsimulation model*), m.in. wykorzystujących psychofizyczny model Wiedemanna zaimplementowany w środowisku symulacyjnym PTV Vissim. W rozdziale scharakteryzowano zagadnienie kalibracji tego rodzaju modeli zwracając szczególną uwagę na optymalizacyjny charakter procedur kalibracyjnych oraz na różnorodność stosowanych miar zgodności dopasowania. Część treści rozdziału 2.5 przedstawiająca zagadnienie kalibracji modelu mikrosymulacyjnego została wydzielona jako podpunkt 2.5.1 (*Microsimulation model calibration*). Kwestią dyskusyjną jest taki podział treści, ponieważ z jednej strony jest to tylko jeden podpunkt w rozdziale 2.5 i zajmuje jedną stronę pracy, a z drugiej strony są to zasadnicze zagadnienie budowy modelu. Jednak sądzę, że bez wydzielania tego podpunktu struktura podziału treści byłaby bardziej równomierna.

Ostatnia część rozdziału 2 dotyczy pomiarów parametrów ruchu pojazdów istotnych z punktu widzenia celu pracy (2.6. *Vehicle movement surveying*), takich jak prędkości jazdy, przyspieszenia, spowolnienia, hamowania, jazda z prędkością ustaloną. Wyróżniono m.in. pomiary ruchu wewnątrz i na zewnątrz pojazdu (2.6.1. *Measurements inside the vehicle*, 2.6.2. *Measurements outside the vehicle*) oraz wykorzystanie wideodetekcji do szacowania parametrów ruchu (2.6.3. *Video detection – vision-based vehicle speed estimation*) i zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych UAV (2.6.4. *Unmanned aircraft*). W szczególności zwrócono uwagę na kwestię kalibracji kamer do wideorejestracji oraz na metody wykrywania i śledzenia pojazdów w zarejestrowanym obrazie wideo, z identyfikacją pojazdów w określonym układzie odniesienia, a następnie na metody szacowania prędkości pojazdów. Wskazano również wady i zalety metod wideorejestracji z wykorzystaniem różnych statków powietrznych, m.in. bezzałogowych UAV sterowanych zdalnie (*RPA - remotely-piloted aircraft*) rejestrujących obraz z małej i dużej wysokości (*LAP - Low Altitude Platforms* i *HAP - High Altitude Platforms*), w tym również balonów.

Rozdział 2 wyróżnia się pozytywnie pod względem stosunkowo dużej liczby cytowanych źródeł literaturowych, co wskazuje na dobre rozpoznanie kluczowych zagadnień związanych z celem i zakresem pracy.

Rozdział 3 (3. *Traffic calming*) obejmuje zagadnienia dotyczące uspokojenia ruchu drogowego, czyli działań ukierunkowanych m.in. na bezpieczeństwo ruchu drogowego, poprawę warunków ruchu użytkowników niezmotoryzowanych oraz zmniejszenie negatywnego oddziaływania ruchu na środowisko naturalne i na jakość życia mieszkańców. Scharakteryzowano środki uspokojenia ruchu w aspekcie ich wpływu na zmiany prędkości pojazdów, tj. na przyspieszenie, spowalnianie, hamowanie i jazdę z prędkością ustaloną. Wyróżniono przy tym trzy poziomy związane z zasięgiem oddziaływania tych środków, tj. poziom lokalny, poziom korytarzowy i poziom obszarowo-sieciowy, oraz cztery grupy związane z funkcjonalnością tych środków, czyli środki kontroli prędkości, środki kontroli dostępu, środki kontroli ruchu, infrastrukturę dla pieszych i rowerzystów.

Sposób prezentacji zagadnień właściwie ukazuje związki pomiędzy organizacją ruchu na odcinkach ulic wykorzystującą różne środki uspokojenia ruchu, a dostosowaniem przez kierowców prędkości jazdy, średnim czasem podróży na odcinkach dróg, wyborem przez kierowców trasy w sieci w zależności od zmian średniego czasu podróży, rozłożeniem potoków ruchu w sieci drogowej.

W rozdziale 4 (*4. Research method*) omówiono zagadnienia dotyczące opracowanej przez Autora metody badawczej. Przedstawiono kolejno ogólny schemat metody oraz jej zasadnicze etapy i procedury. Wyróżniono m.in. wideorejestrację ruchu pojazdów na odcinku drogi z wykorzystaniem UAV (*4.1. Aerial video recording – quadcopter*), identyfikację trajektorii ruchu pojazdów w zapisie wideo (*4.2. Video detection of the vehicles*), wyznaczenie z zapisu wideo takich charakterystyk ruchu pojazdów, jak rozkład prędkości jazdy na odcinku składający się na profil prędkości wraz z przyspieszaniem, spowalnianiem i hamowaniem, tj. na charakterystykach opisujących zachowania kierowców zależne od zastosowanych środków uspokojenia ruchu (*4.3. Trajectories and driving behaviour characteristics*).

Początkowe etapy metody dotyczą zbierania danych, na podstawie których w kolejnych etapach uwzględniono opracowanie modelu mikrosymulacyjnego dla badanego odcinka (*4.4. Developing the microscopic (Vissim) model*), wykorzystanie opracowanego modelu do wyliczenia czasu podróży na badanym odcinku w funkcji zmian natężenia potoków ruchu, z uwzględnieniem określonych środków uspokojenia ruchu (*4.5. Simulating traffic volumes*), co umożliwia wyznaczenie funkcji VDF dla tego odcinka (*4.6. Volume-delay function*). Ostatni etap badań to implementacja opracowanych (skalibrowanych) funkcji VDF w procedurach rozkładu potoków ruchu modeli makroskopowych dla ruchu przed i po wprowadzeniu środków uspokojenia ruchu (*4.7. Application in macroscopic (Visum) model*) oraz porównanie wpływu różnych środków uspokojenia ruchu na zachowania kierowców, których rezultatem są zmiany rozkładów prędkości jazdy, zmiany przepustowości odcinka, zmiany czasu podróży i zmiany w rozkładzie potoków ruchu modelu makroskopowego.

Czytelność i przejrzystość graficznej prezentacji wymienionych zagadnień byłaby lepsza po uwzględnieniu następujących kwestii. Rysunek 28 (*Figure 28: The view of the PTV Vissim model in the program*) mógłby być zastąpiony bardziej szczegółową prezentacją wybranych składników i parametrów modelu w środowisku symulacyjnym PTV Vissim. Rysunek 29 (*Figure 29: The view of the PTV Vissim running simulation*) mógłby być zastąpiony schematami ilustrującymi sposób wyznaczania czasu podróży na odcinku w funkcji natężenia ruchu przed i po przekroczeniu przepustowości tego odcinka – w przypadku braku ograniczeń w ruchu oraz w warunkach zastosowania określonych środków uspokojenia ruchu. Rysunek 32 (*Figure 32 Kraków transportation network in model*) mógłby być uzupełniony o wskazanie odcinków z ruchem uspokojonym, dla których przeprowadzono obliczenia sprawdzające nowe funkcji VDF. W odniesieniach do rysunków występuje omyłkowa numeracja, np. rysunek 4 zamiast rysunek 26, rysunki 16 i 17, podczas gdy rysunki mają numery 30 (*Figure 30: Traffic volume–speed relation (source: own)*) i 31 (*Figure 31: Traffic density–speed relation. (source: own)*). Podobnej korekty numerów wymagają konsekwentnie pozostałe rysunki w pracy. Część treści rozdziału 4.5 przedstawiająca zależności pomiędzy prędkością a natężeniem i gęstością potoków ruchu została wydzielona jako podpunkt 4.5.1 (*Volume, density and travel time relation*). Kwestią dyskusyjną jest taki podział treści, ponieważ z jednej strony jest to tylko jeden podpunkt w rozdziale 4.5 i zajmuje jedną stronę pracy, a z drugiej strony są to podstawowe wyniki związane z badaniem funkcji VDF. Jednak sądzę, że bez wydzielania tego podpunktu struktura podziału treści byłaby bardziej równomierna.

Wyniki eksperymentów pilotażowego zastosowania opracowanej metody badawczej przedstawiono w **rozdziale 5** (5. *Research method - example*). W pierwszej kolejności przeprowadzono testy możliwości technicznych rejestracji obrazu wideo na odcinku jednej z ulic w Krakowie – z wykorzystaniem drona typu quadrocopter (*quadcopter*), z uwzględnieniem doboru odpowiedniej wysokości (80m n.p. gruntu), zasięgu rejestracji obrazu (110m wzdłuż ulicy) oraz stabilizacji obrazu (GPS, pokładowe systemy stabilizacji kamery drona), w korzystnych warunkach pogodowych (bez opadów i silnego wiatru).

Po sprawdzeniu możliwości technicznych zastosowania metody na badanym odcinku, wykonano wstępną wideorejestrację ruchu pojazdów, wyznaczono statystyczny rozkład badanej zmiennej, tj. prędkości jazdy na odcinku i oszacowano wielkość próby badawczej. Następnie wykonano zasadniczy eksperyment pilotażowego zastosowania opracowanej metody na badanym odcinku z zainstalowanymi dwoma urządzeniami uspokojenia ruchu w postaci progów spowalniających w kształcie poduszek (*speed cushions*). Wyniki badań zaprezentowano, oddzielnie dla każdego z dwóch kierunków ruchu, w postaci profili prędkości jazdy dla wartości minimalnej, maksymalnej i średniej oraz dystrybuant empirycznych prędkości jazdy, z uwzględnieniem odległości oddziaływania dwóch progów spowalniających na zachowania kierowców (na zmiany ich prędkości jazdy).

Dalsza część pilotażu obejmowała zbudowanie modeli mikrosymulacyjnych odwzorowujących zachowania kierowców na badanym odcinku, oddzielnie dla każdego z dwóch kierunków ruchu. W procesie kalibracji tych modeli porównano profile prędkości jazdy otrzymane z pomiarów z profilami otrzymanymi z mikrosymulacji. Zbudowane modele mikrosymulacyjne, skalibrowane na poziomie 0,71 i 0,79 wartości współczynnika korelacji, zastosowano do symulacji czasu podróży na odcinku w funkcji zmian wartości natężenia ruchu, w celu wyznaczenia parametrów a , b , b' funkcji VDF o postaci BPR2, zaimplementowanej w makroskopowym modelu transportowym miasta Kraków. Wyniki kalibracji tej funkcji dla badanego odcinka ulicy przedstawiono dla obu kierunków ruchu, dla warunków bez zastosowania środków uspokojenia ruchu, jak również z ich zastosowaniem. Osiągnięto bardzo wysoki stopień zgodności wyników symulacji z wynikami obliczeń z użyciem BPR2 (wartość współczynnika korelacji powyżej 0,9), co widać również na wykresach porównawczych (*Figure 39: Fitting of the volume–delay functions (source: own)*).

Ostatnim etapem pilotażowego zastosowania opracowanej metody była analiza wrażliwości badanej funkcji BPR2, tj. ocena wpływu ewentualnych błędów w estymacji parametrów tej funkcji na wyniki obliczeń czasu podróży, a w konsekwencji na wyniki rozkładu potoków ruchu w modelu makroskopowym. Wnioski z tej analizy wskazują, że największy wpływ na wyniki funkcji BPR2 ma dokładność oszacowania parametru b (gdyż jest to wykładnik potęgi składnika sat) a w szczególności parametr b' , czyli funkcji BPR2 dla odcinków przeciążonych potokami ruchu. Wynika to oczywiście z postaci tej funkcji.

Na wykresach na osi pionowej zastosowano opis „*delay*”. Jak należy interpretować wartości na tej osi w odniesieniu do $t_{cur}(sat)$ oraz do składnika $a \cdot sat^b$ w formule (5) funkcji BPR2? W jaki sposób wyznaczono wartości q_{max} zamieszczone w tabeli 5? Wykresy zamieszczone na rysunkach 40, 43 i 46 mają niejasny opis osi pionowej „*Time [x*t0]*” oraz oznaczenia w legendzie bez podania objaśnień. Chodzi prawdopodobnie o założone wartości błędów estymacji („-0,04”, „-0,03”, „-0,02”, „-0,01”, „0,01”, „0,02”, „0,03”, „0,04”), przy czym występują również opisy „org” i „0,00”, które prawdopodobnie są zdublowaniem opisu dla danych bez uwzględniania błędu estymacji. Dodatkowo zapis „*The analysed error was between 96% to 104% of the original BPR function parameter values.*” jest nieprecyzyjny w kwestii

pojęcia błąd („error”), ponieważ odnosi się raczej do zmiany parametrów funkcji BPR2 w zakresie od 96% do 104% ich wartości otrzymanych podczas kalibracji.

W rozdziale 6 (6. *Research application*) przedstawiono eksperymenty dotyczące wpływu uspokojenia ruchu oraz odpowiednich funkcji VDF na rozkład potoków ruchu w modelu transportowym makroskopowym. W pierwszej kolejności porównano wyniki rozkładu potoków dla testowej sieci, składającej się z dwóch odcinków łączących ze sobą dwa węzły tej sieci, czyli odcinków stanowiących alternatywne połączenia tych węzłów. Oba odcinki miały taką samą długość, ale na jednym z nich założono oddziaływanie środków uspokojenia ruchu w postaci progu spowalniającego typu „poduszka”. Czasy podróży, t_{wtc} dla odcinka z ruchem uspokojonym oraz t_{wotc} dla odcinka bez środków uspokojenia ruchu, odwzorowano przez zastosowanie dwóch funkcji BPR2.

Obliczenia wykonano z zastosowaniem Solvera w MS Excel oraz powtórzono wykorzystując procedury programu PTV Vism. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów prezentujących wzrost natężeń ruchu na obu odcinkach oraz różnicę tych natężeń w funkcji całkowitego natężenia potoków ruchu q_{tot} między węzłami sieci. Rezultatem analizy wyników jest sformułowanie zależności $diff(q_{tot})$ przedstawiającej różnice natężeń na obu odcinkach, z uwzględnieniem zjawiska trzech kolejnych stanów podczas obliczania rozkładu natężenia ruchu: stan 1. wyższa atrakcyjność odcinka bez uspokojenia ruchu, stan 2. wyższa atrakcyjność odcinka z ruchem uspokojonym, stan 3. ponownie wyższa atrakcyjność odcinka bez uspokojenia ruchu. Dyskusja wyników uwzględnia również zastosowanie dla każdego z odcinków innych prędkości w ruchu swobodnym V_0 . Niestety nie podano wartości parametrów funkcji BPR2, tj. a_{wtc} , b_{wtc} , a_{wotc} , b_{wotc} oraz wartości przepustowości lub maksymalnych natężeń ruchu, tj. $q_{max,wtc}$ oraz $q_{max,wotc}$. Na podstawie otrzymanych wyników wskazano hipotezę, że przy zastosowaniu funkcji VDF dopasowanych do określonych środków uspokojenia ruchu, wyniki rozkładu potoków w modelach transportowych makroskopowych, być może będą dokładniejsze niż przy stosowanych obecnie funkcjach VDF, które nie są odpowiednio dopasowane.

W następnej kolejności, wykorzystując opracowaną metodę kalibracji funkcji VDF, wykonano obliczenia dla wybranego odcinka ulicy w Krakowie. Dane ruchowe zarejestrowano przed i po instalacji przed przejściem dla pieszych urządzeń uspokojenia ruchu w postaci zwężenia dwóch pasów rozdzielającą je powierzchnią kanalizującą ruch z zainstalowanymi na niej separatorami ruchu w postaci elastycznych słupków. Wykonano wideorejestrację z użyciem drona oraz wykorzystano zapis natężeń ruchu z miejskich stacji zliczania potoków ruchu. Wyznaczone profile prędkości na badanym odcinku ukazały różnice w zachowaniach kierowców – kierowcy znacznie wcześniej, tj. w większej odległości od przejścia dla pieszych, zmniejszali prędkość jazdy widząc urządzenia uspokojenia ruchu. Skalibrowane funkcje VDF typu BPR2 – dla ruchu nieuspokojonego oraz uspokojonego – przedstawiono w postaci wykresów wraz z podaniem wartości współczynników a , b , b' . Następnie przedstawiono wyniki rozkładów potoków ruchu w modelu makroskopowym miasta Kraków dla wariantów bez i z ruchem uspokojonym. Obliczenia wykonano zarówno dla nowo opracowanych funkcji VDF dla ruchu nieuspokojonego i uspokojonego, jak również dla pierwotnie zaimplementowanych standardowych funkcji VDF. W wariantach uwzględniono wpływ różnych wartości przepustowości dla badanego odcinka. Wnioski wskazują na poprawę odwzorowania potoków ruchu w modelu makroskopowym (w skali całej sieci) po zastosowaniu nowo opracowanych funkcji VDF dla ruchu nieuspokojonego i uspokojonego na badanym odcinku.

W rozdziale 7 (*7. Summary and conclusions*) przedstawiono główne wnioski merytoryczne wynikające z realizacji pracy doktorskiej. Wskazano m.in. zalety opracowanej metody szacowania funkcji VDF związane z wykorzystaniem wideorejestracji ruchu bez konieczności stosowania dedykowanych urządzeń pomiarowych oraz z wykorzystaniem tych danych jednocześnie do dwóch rodzajów modeli, tj. do modelu mikroskopowego (kalibracja funkcji VDF podczas symulacji czasu podróży w funkcji zmian natężenia potoków ruchu) i do modelu makroskopowego (implementacja skalibrowanej funkcji VDF w modelu rozkładu potoków ruchu uwzględniającym odcinki z ruchem uspokojonym). Zwrócono również uwagę na ograniczenia opracowanej metody wynikające z rozpoznania i zbadania wybranych środków uspokojenia ruchu drogowego na wybranych typach odcinków sieci drogowej.

Kierunki dalszych badań ujęto w trzech obszarach tematycznych, tj. badania trajektorii ruchu pojazdów, badania kształtów funkcji VDF, opracowanie uniwersalnych wzorów do modyfikacji aktualnie stosowanych funkcji VDF. Każdy z wymienionych obszarów uzasadniono przeprowadzając wstępną identyfikację problemów w ostatnich podpunktach rozdziału (7.3.1. *Applying unmanned aircrafts and video detection in transport modeling*, 7.3.2. *Volume-delay function database for the link types*, 7.3.3. *Volume – delay functions comparison – finding the VDF modification for traffic-calmed roads*).

Jako jeden z głównych wniosków podano, że w literaturze brakuje metod szacowania VDF dla połączeń z ruchem uspokojonym, cyt. „3. *In literature, there is a lacking in methods of the VDFs estimation for the traffic-calmed links.*”. Taki wniosek jest poprawny, ale w pracy doktorskiej jest to raczej uzasadnienie podjęcia tematu a nie wniosek z jej realizacji. Ta uwaga dotyczy również wniosków 6 i 7, tj. cyt. „6. *Driving behaviour can be reproduced in the microscopic model. The example of this model can be Wiedemann model used in PTV Vissim software.*” i „7. *Calibrated microscopic model allows to estimate VDFs by simulating the scope of the traffic volumes on the link.*”. Wnioski te stanowią przede wszystkim założenia do pracy badawczej.

3. Ocena poprawności formalnej i językowej

Formalna strona recenzowanej pracy jest zgodna z zasadami pisania prac doktorskich w naukach technicznych. Autor w znacznym stopniu posiadał umiejętność prezentowania wyników badań w formie tekstowej, tabelarycznej i graficznej, z uwzględnieniem poprawnego odwoływania się do literatury. Czytelność tekstu pracy ilustrują 64 rysunki oraz 11 tabel a rozszerzeniem jest 251 pozycji literatury. Struktura pracy i podział treści na poszczególne rozdziały i ich podpunkty potwierdzają spójność i kompleksowość podejścia systemowego w pracy naukowej.

Autor nie uniknął błędów formalnych i językowych, których część została już wskazana w poprzednim punkcie recenzji, a pozostałe to:

- w tekście pracy brakuje odwołania i odpowiedniego komentarza do rysunków: 2 (*Figure 2: Demand – supply chart. Source: [3]*), 5. (*Figure 5: Trip generation (cars) – Intermodal National Traffic model. Source:[2]*), 6. (*Figure 6: Trip distribution (cars) for the May weekend peak hour – Intermodal National Traffic model Source: [2]*),
- podpisy rysunków występują raz nad a raz pod rysunkiem (np. Figure 61 i Figure 62),
- brakuje numerów rysunków w tekście odwołującym się do rysunków, np. na s. 109, wiersz 1 od góry, brak numeru rysunku 62,

- w tekstach odwołania do rysunków występują błędne numery rysunków, np. s. 108, w drugim akapicie jest odwołanie do rysunku 46 „Fig. 46 shows the traffic assignemnt results ...” a powinno być do rysunku 61,
- tekst komentarza do rysunku 3 (*Figure 3: Example of trips within an activity. Source: [4]*) nie zawiera oznaczeń H , W , S zamieszczonych na rysunku, jak również rysunek nie zawiera legendy tych oznaczeń H , W , S . Zamieszczenie odpowiednich wyjaśnień, np. w podpisie tego rysunku (H -home, W -work, S -shop) byłoby satysfakcjonujące.

4. Pytania szczegółowe

- 1) W pracy kilkukrotnie wspomniano o rozwoju uczenia maszynowego. W jaki sposób oraz w której części obliczeń Autor wykorzystał uczenie maszynowe? Czy w dalszych pracach rozwojowych Autor planuje rozszerzenie opracowanej metody o zastosowanie metod sztucznej inteligencji?
- 2) W jaki sposób, jakimi metodami wyznaczana była wartość przepustowości badanych odcinków w przedstawionych eksperymentach? Zagadnienie definiowania pojęcia „przepustowość” oraz wyznaczania jej wartości jest dyskutowane w cytowanej przed Autora pozycji literaturowej 28. Wyniki dyskusji jednoznacznie wskazują na zasadnicze znaczenie sposobu wyznaczania przepustowości lub natężenia maksymalnego – zarówno w aspektach teoretycznych, jak również z aspektach praktycznych – mające fundamentalny związek z funkcjami VDF.
- 3) Do czego odnosi się w pracy określenie „volume-delay function” (VDF), tzn. czy to określenie dotyczy całej funkcji włącznie ze składnikiem t_0 , której wynikiem jest średni czas podróży na odcinku t_{cur} , czy też dotyczy tylko składnika tej funkcji związanego ze stopniem nasycenia (obciążenia) odcinka, tj. składnika $a \cdot sat^b$? Pytanie wiąże się z wątpliwościami w interpretacji wartości na osiach pionowych prezentowanych wykresów oraz w analizach i komentarzach wyników eksperymentów, ponieważ raz wartości dotyczą czasu podróży na odcinku t_{cur} , natomiast innym razem wartości są bezwymiarowe i wraz z kształtem funkcji umożliwiają ocenę tempa zmian czasu podróży w zależności od aktualnego stopnia obciążenia odcinka $sat = q/q_{max}$. Szczególnie widoczne jest to podczas prezentacji wykresów podpisanych „volume-delay function” a przedstawiających przebieg zmian składnika $a \cdot sat^b$.
- 4) Jakie przesłanki zadecydowały o wyborze do modelowania funkcję VDF typu BPR2? Czy tylko popularność stosowania tej funkcji w praktyce w modelach transportowych, czy może właściwe jej dopasowanie do poligonu badawczego, na którym prowadzono eksperymenty?

5. Ogólna ocena rozprawy

Recenzowana praca doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z zakresu dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport. Wybór tematu jest właściwy ze względu na możliwość poprawy dokładności odwzorowania wpływu środków uspokojenia ruchu drogowego na rozkład potoków ruchu w modelach transportowych makroskopowych, które są podstawowym narzędziem oceny funkcjonowania systemów transportowych.

Praca posiada cenne walory naukowe, poznawcze i praktyczne. Autor wykazał się wiedzą teoretyczną i praktyczną w zakresie zjawisk opisujących potoki ruchu drogowego i ich odwzorowania w modelach mikro- i makroskopowych, a także zdolnością do stawiania i rozwiązywania problemów naukowych, z wykorzystaniem metod naukowych. W rezultacie problem został przez Autora poprawnie rozpoznany i opisany oraz zamodelowany i rozwiązany, z zastosowaniem odpowiednio dobranego aparatu matematycznego i narzędzi analitycznych.

Jako oryginalny wkład Autora w dyscyplinę naukową inżynieria lądowa, geodezja i transport wskazują:

- przeprowadzenie szczegółowej analizy literaturowej w zakresie modelowania parametrów sieci drogowej,
- opracowanie metody szacowania funkcji VDF dla odcinków, na których zastosowano środki uspokojenia ruchu drogowego, uwzględniającej modelowanie symulacyjne mikro- i makroskopowe.

Rozważania w poszczególnych rozdziałach pracy są logicznie powiązane biorąc pod uwagę następstwo treści. Struktura pracy i podział treści na poszczególne rozdziały i ich podpunkty potwierdza spójność i kompleksowość podejścia do identyfikacji i rozwiązania problemu naukowego. Dobór źródeł, zakres przeprowadzonych badań, zastosowane metody i narzędzia badawcze, rodzaje analiz oraz prezentacja wyników są odpowiednie pod względem osiągnięcia postawionych w pracy celów.

Zakres przeglądu literatury i liczba cytowań są wystarczające, a przy obecnym zakresie dostępnych źródeł naukowych oraz możliwościach ich analizowania, zawsze można dyskutować nad tym, co jeszcze warto zacytować i czy kolejna pozycja na liście literatury wniesie istotny wkład w rezultaty dysertacji. Jest to postępujący problem „nadmiaru informacji” i ograniczonych możliwościach ich „przetwarzania” przez człowieka, o którym już dawno wspominał S. Lem.

Recenzowana dysertacja zawiera niezbędne składniki metody naukowej. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością przedmiotu badań oraz opanowaniem metod i technik eksperymentalnych oraz analitycznych, stosowanych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

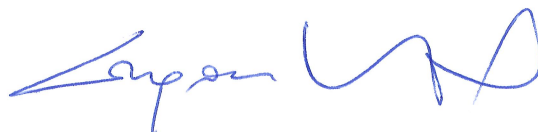
6. Wniosek końcowy

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska została wykonana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym. Problem naukowy został prawidłowo zdefiniowany i opisany a wyznaczone cele zostały osiągnięte z zastosowaniem odpowiedniego aparatu matematycznego. Wyrażam opinię, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wskazując na odpowiedni poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej Autora w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Zdolność analitycznego spojrzenia na rozpatrywany problem dowodzi umiejętności Autora dotyczących samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Uważam, że zaprezentowane w rozprawie wyniki badań są oryginalnym

dorobkiem naukowym Autora, a rezultaty pracy mogą służyć do bezpośredniego wykorzystania w praktyce.

Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymogi stawiane rozprawie doktorskiej, określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.). Wnoszę zatem do Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej o jej przyjęcie i dopuszczenie **Pana mgr. inż. Jana Paszkowskiego** do publicznej obrony pracy doktorskiej.

Katowice, dn. 06 września 2023 r.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jan Paszkowski', with a stylized flourish at the end.