

Prof. dr hab. inż. Marek Iwański, prof. zw. PŚk.
Katedra Inżynierii Komunikacyjnej
Wydział Budownictwa i Architektury
Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach
Al. Tysiąclecia P.P. 7
25-314 Kielce
e-mail: miwanski@tu.kielce.pl

Kielce, dn. 28.07.2017 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Justyny Stępień** na temat:
„Wpływ przystanków autobusowych na sprawność ruchu drogowego i komunikacji miejskiej”

Promotorem pracy doktorskiej jest Pan Prof. dr hab. inż. Andrzej Rudniki. Rozprawa została opracowana we współpracy Katedry Systemów Komunikacyjnych Politechniki Krakowskiej i Katedry Inżynierii Komunikacyjnej Politechniki Świętokrzyskiej.

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie pisma (znak BD-122/17) Pana dr hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka, prof. PŚk - Prodziekana ds. Nauki i Współpracy z Zagranicą Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 30.05.2017 roku.

2. Ocena rozprawy

2.1. Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji praca ma charakter pracy badawczej. Rozprawa została przedstawiona na 256 stronicach formatu A4, które obejmują część zasadniczą (242 strony) składającą się z 9 rozdziałów w tym wniosków i literatury (10 stron) oraz streszczenia w języku polskim i angielski (4 strony). Do rozprawy dołączono również cztery załączniki (120 stron), w których przedstawiono między innymi: lokalizacje poligonów badawczych, rysunki rozwiązania geometrycznego i organizacji ruchu analizowanych przystanków autobusowych z przyległymi skrzyżowaniami oraz ich wybrane parametry geometryczno-ruchowe, wyniki analizy skanowania wielowymiarowego MDS, algorytm wyznaczania czasu wymiany podróży, zestawy tabelaryczne wyników badań oraz dokumentację fotograficzną obiektu badań itd. Ta bardzo liczna grupa materiałów pomocniczych i dokumentacyjnych świadczy o rzetelnym sposobie realizacji eksperymentalnej (analitycznej) i obliczeniowej części pracy i jej przejrzystości oraz prawidłowo zredagowanej części tekstowej.

Doktorantka w oparciu o przegląd literatury opracowała program badań laboratoryjnych, który został zrealizowany, a wyniki badań oraz ich analiza zostały przedstawione w poszczególnych rozdziałach.

Na wstępie rozprawy doktorskiej przedstawiono wykaz najważniejszych skrótów używanych w pracy.

W rozdziale 1 (*Wprowadzenie do przedmiotu badań*) zawarto przedstawione wprowadzenie w przedmiot rozprawy. Doktorantka opisała genezę podjęcia tematu rozprawy

doktorskiej na podstawie analizy ogólnego stanu wiedzy w przedmiotowym temacie. Przedstawiła znaczenie komunalnej i prywatnej komunikacji autobusowej występującej w polskich miastach z uwzględnieniem dokumentów normatywnych w tym zakresie. Dokonana została charakterystyka przedmiotu badań z uwzględnieniem graficznych przykładów procesów związanych z funkcjonowaniem przystanku autobusowego. Doktorantka przedstawiła cel badań pojętych w ramach rozprawy naukowej. Sformułowane zostały cztery interesujące tezy naukowe oraz dwie tezy techniczne związane z ewentualnym praktycznym zastosowaniem pracy doktorskiej. Tezy naukowe dotyczą opracowania modelu funkcjonowania przystanku autobusowego wykorzystywanego przez niejednorodne grupy użytkowników oraz przepływu ruchu w jego otoczeniu z uwzględnieniem modeli szczegółowych dotyczących analizowanych zagadnień badawczych. Natomiast tezy techniczne dotyczą możliwości poprawy jakości obsługi pasażerów i warunków przepływu ruchu w obrębie przystanków wykorzystywanych przez niejednorodne grupy przewoźników. Przedstawienie w sposób graficzny przez Doktorantkę schematu ogólnej realizacji pracy naukowej oraz poszczególnych jej etapów umożliwia w bardzo przejrzysty i czytelny sposób zapoznanie się z przedmiotem badań.

W rozdziale 2 (*Przystanki autobusowe w świetle uwarunkowań prawnych i wytycznych technicznych*) przedstawiono stan uwarunkowań prawnych w zakresie funkcjonowania przystanków autobusowych oraz ich wpływu na przepływ ruchu drogowego i komunikacji miejskiej. Scharakteryzowane zostały zasady organizacji i korzystania z przystanków komunikacji w oparciu o krajowe uwarunkowania prawne. Szczegółowo przedstawiono uwarunkowania dotyczące ich lokalizacji oraz geometrii z uwzględnieniem wytycznych technicznych, które wzbogacono rysunkami. Podkreślono, że w dużej ilości krajów o lokalizacji przystanków autobusowych decydują dwie grupy czynników: komfort użytkownika - dostępność dla pieszych/podróżnych oraz bezpieczeństwo ruchu podróźnych. Doktorantka zwróciła uwagę, że wśród czynników wpływających na lokalizację przystanków autobusowych względem skrzyżowań uwzględnia się: uwarunkowania przebiegu linii autobusowych, natężenia pojazdów relacji skrótu w prawo, długość odcinka potrzebną do zatrzymania się autobusu, złożoność skrzyżowania w zakresie sterowania ruchem oraz ułatwienia przesiadania się pasażerów. Istotnym elementem tego rozdziału jest również przedstawienie zagadnień dotyczących wpływu przystanków autobusowych na sprawność funkcjonowania przyległych elementów infrastruktury. Zamieszczone liczne schematy poglądowe zapewniają czytelność przekazywanych treści oraz umożliwiają prawidłową ich analizę. Rozdział kończy się podsumowaniem. Doktorantka prezentuje siedem wniosków wynikających z analizy wykonanych studiów literaturowych, dotyczących wytycznych technicznych w zakresie funkcjonowania przystanków autobusowych w zakresie zasad ich projektowania i lokalizacji oraz korzystania z nich jak również ograniczeń wynikających z przedstawionych dokumentów normatywnych.

Rozdział 3 (*Stan badań naukowych w zakresie przystanków autobusowych*) dotyczy stanu badań naukowych w zakresie tematyki objętej rozprawą dokorską. Na wstępie Doktorantka przedstawiła metody oceny warunków ruchu i standardu jakości obsługi na przystankach autobusowych. W skrócie przedstawiła prace badaczy, którzy zajmowali się między innymi metodami:

- wyznaczania potrzebnej liczby stanowisk postojowych na przystankach w zależności od natężenia potoku autobusów oraz średniego czasu postoju autobusu na przystanku,

- ustalania liczby stanowisk wymiany, bazującej na analizie strat czasu autobusów wynikających z konieczności dwukrotnego zatrzymania w wyniku zablokowania przystanku.

Następnie dokonana jest charakterystyka teorii niezawodności w aspekcie wykorzystania jej w odniesieniu do funkcjonowania poszczególnych elementów sieci komunikacji miejskiej, takich jak linie komunikacyjne oraz przystanki autobusowe. Doktorantka szczegółowo opisuje zagadnienia oceny strat czasu pojazdów w aspekcie funkcjonowania i wymiarowania przystanków autobusowych w celu ustalenia liczby stanowisk wymiany. Przywołane są liczne prace naukowe krajowych oraz zagranicznych badaczy. Przywołana została też metoda HCM (USA), w której przepustowość przystanku wyrażana jest maksymalną liczbą autobusów, które mogą być obsłużone na przystanku w ciągu godziny. Uwzględnione zostało też oddziaływanie specyfiki ruchu w obrębie przystanku autobusowego na proces projektowania konstrukcji nawierzchni drogowej. Następnie dokonana została charakterystyka modeli funkcjonowania przystanków autobusowych i przepływu ruchu w ich otoczeniu. Scharakteryzowana została teoria kolejek czyli masowej obsługi. Modele do jej opisu opracowywane są jako deterministyczne lub stochastyczne. Przywołane zostały badania krajowe i zagraniczne w tym zakresie. Rozdział zakończony jest podsumowaniem ze wskazaniem wniosków do ukierunkowania badań przez Doktorantkę.

W rozdziale 4 zatytułowanym *Wykonanie i przetworzenie wyników pomiarów wykonanych w otoczeniu przystanków autobusowych*, który wg recenzenta jest jednym z najważniejszych w rozprawie, ponieważ uzyskane w ramach jego realizacji bazy danych są podstawą dalszego modelowania zjawisk w obszarze przystanków autobusowych. Na wstępie Doktorantka opisała metodykę doboru poligonów badawczych, która polegała na obserwacjach wykonanych na przystankach autobusowych w 6 miastach oraz pomiarach pilotażowych w Kielcach. W ramach tych pomiarów objęto 26 przystanków autobusowych w Kielcach, które są zlokalizowane na odcinku od ul. Żytniej przez ul. Seminaryjską do ul. Wojska Polskiego. Dotyczyły one rejestracji przez obserwatorów stojących bezpośrednio na przystanku następujących zdarzeń i ich parametrów w godzinach porannych od 6.30 do 10.30 i popołudniowych od 14.00 do 18.00 w zakresie:

- momentu zatrzymania autobusu na przystanku,
- momentu rozpoczęcia i zakończenia wymiany pasażerów,
- momentu ruszania autobusu z przystanku,
- liczby pasażerów wysiadających i wsiadających,
- napełnienia pojazdu.

Na podstawie analizy uzyskanej bazy danych w ramach programu pilotażowego, potrzebnych do opracowania programu symulującego przepływ ruchu w otoczeniu przystanków autobusowych, do szczegółowych pomiarów zasadniczych wyznaczono po 9 przystanków autobusowych w Kielcach i Krakowie.

Doktorantka opisała sposób doboru próby badawczej oraz wyznaczania błędu szacunkowego. Minimalna liczebność próby oznaczona została na podstawie wyników pomiarów pilotażowych, wykonanych na przystankach w Kielcach.

Zasadnicze pomiary obejmowały jednoczesną rejestrację wszystkich przedmiotowych zdarzeń i parametrów na wytypowanych 18 przystankach autobusowych wraz z przyległymi 33 skrzyżowaniami (z sygnalizacją świetlną lub bez sygnalizacji). Pomiary wykonywano w losowo wybranych dniach tygodnia, za wyjątkiem sobót i niedziel. Łączny czas wykonywania pomiarów wynosił 85 godz. Wykonywano je w obrębie wybranych poligonów za pomocą techniki wideofilmowania, wykorzystując 3 kamery DVD. Następnie Doktorantka bardzo szczegółowo przedstawiła sposób analizy pozyskiwanych danych oraz ich zakres.

Dokonana została charakterystyka porównawcza poligonów badawczych pod względem wybranych parametrów geometryczno-ruchowych. Na podstawie opracowanych baz danych zawierających zmienne charakteryzujące poszczególne pojazdy i ich zatrzymania Doktorantka wyznaczyła podstawowe parametry je opisujące w podziale na różne grupy przewoźników w celu możliwości porównania względem siebie analizowanych przystanków. Wyodrębnione zostały czynniki wpływające na zakłócenie ruchu, które w bardzo czytelny sposób przedstawione zostały graficznie na rysunku 4.6. Szczegółowa analiza baz danych pozwoliła również na wyodrębnienie potencjalnych czynników mających wpływ na funkcjonowanie przystanków autobusowych i przyległych elementów infrastruktury. Powiązanie czynników powodujących zakłócenia ruchu pojazdów w obrębie przystanków autobusowych z rodzajami zakłóceń zobrazowano na rysunku 4.7. Rozdział zakończony jest podsumowaniem, które zawiera 11 bardzo szczegółowych merytorycznych wniosków obrazujących zakres i cel badań wykonanych przez Doktorantkę.

Doktorantka w **rozdziale 5** zatytułowanym *Model wyboru miejsca zatrzymania autobusów i innych pojazdów na przystanku* w pierwszej kolejności Doktorantka zwraca uwagę na pogarszanie się warunków funkcjonowania silnie obciążonych przystanków autobusowych, które wynika z odmiennego ich wykorzystywania przez poszczególnych przewoźników. Podjęcie racjonalnych działań w tym zakresie wymaga między innymi rozpoznania sposobu ich wykorzystania oraz czynników wpływających na zajmowane pozycje pojazdów w trakcie wymiany pasażerów przez pojazdy różnych grup użytkowników. Miejsce zatrzymania pojazdu wpływa zaś na czas dojścia pasażerów do pojazdu, a tym samym na postój pojazdów ich obsługujących. W związku z tym, dla potrzeb opracowania modelu symulacyjnego niezbędne jest opracowanie matematycznego opisu pozycji zajmowanej przez pojazdy różnych użytkowników.

Do chwili obecnej praktycznie badane były w Polsce przystanki, z których korzystały głównie autobusy przewodnika komunalnego, gdzie sposób zajmowania stanowisk postojowych w większości przypadków jest uporządkowany. Również badania światowe nie odzwierciedlają sposobu wykorzystania przystanku z tak dużym zróżnicowaniem zajmowanych pozycji przez przewoźników. Opracowane więc modele symulacyjne nie odzwierciedlają problemów jakie występują na przystankach, które są przedmiotem badań rozprawy. Na podstawie wielokrotnej analizy nagrań wykonanych techniką wideofilmowania na badanych przystankach odnotowano pozycje, zajmowane przez pojazdy w celu wymiany pasażerów, odnosząc je do odległości charakterystycznych, zinwentaryzowanych w terenie, elementów infrastruktury w obrębie przystanku, z uwzględnieniem zmiany długości zatrzymujących się pojazdów. Przykłady sposobu zatrzymania się pojazdu na przystanku przedstawiono na fot. 5.1. Na podstawie zebranego materiału została utworzona przez Doktorantkę baza danych zatrzymań, która pozwala dla każdego zatrzymania pojazdu określić zmienne (cechy), uwzględnione w analizie statystycznej jako czynnik wpływający na położenie zatrzymywania autobusów i innych pojazdów na przystankach. Wykonane zostały szerokie badania wpływu istotności czynników oddziałujących na położenie miejsca zatrzymania przez pierwszy pojazd na przystanku. W celach analizy stosowano jedne z trzech testów:

- dla zmiennej ilościowej stosowano test na istotność współczynnika korelacji Pearsona,
- dla zmiennej dychotomicznej stosowano test t-Studenta,
- dla zmiennej nominalnej zastosowano jednoczynnikową analizę wariancji.

Opracowany został przez Doktorantkę model regresji wielorakiej na położenie miejsca zatrzymania autobusów i innych pojazdów na przystanku autobusowym. Wyniki analiz przedstawiono przy pomocy cząstkowych wykresów regresji, które zaprezentowano na rys. 5.4 i 5.5. Wyznaczone podstawowe parametry modelu regresji na położenie miejsca

zatrzymania pojazdu na przystanku dla przewoźnika miejskiego zostały zestawione w tabeli 5.2. Natomiast dla pozostałych użytkowników w tabeli 5.3. Następnie Doktorantka dokonała oceny wpływu uzyskanych wyników na model symulacyjny funkcjonowania przystanku autobusowego. Rozdział kończy się podsumowaniem i 4 głównymi wnioskami dotyczącymi wykonanych badań oraz ich wiarygodności.

W **rozdziale 6** zatytułowanym *Model obsługi pasażerów na przystanku autobusowym wykorzystywanym przez różnych przewoźników* na wstępie Doktorantka przedstawiła aktualny stan badań w zakresie modelowania czasu postoju autobusów na przystankach obsługiwanych tylko przez jednorodnego przewoźnika. Analizowano w nich czynniki wpływające na czas wymiany pasażerów, odnoszące się zarówno do infrastruktury przystankowej jak i taborowej. Szczegółowo przedstawiono rozpatrywane podczas badań kryteria dotyczące czasu wymiany pasażerów. Zakres tych badań nie obejmował jednak opracowania modelu symulacyjnego obsługi pasażerów, odwzorowującego funkcjonowanie przystanku, który jest wykorzystywany przez różnych przewoźników, w tym również prywatnych.

Scharakteryzowane zostały prace M. Bauera i A. Moleckiego, dwóch polskich badaczy, którzy zajmowali się między innymi zagadnieniami dotyczącymi modelowania czasu wymiany pasażerów miejskiego przewoźnika jak również wpływem losowych czynników na proces modelowania. Przywołane zostały też zagraniczne prace badawcze H. Shi i A. Tirachini dotyczące analizy wpływu czasu postoju autobusu i związanego z tym czasu wymiany pasażerów na przepustowość przystanku oraz badań jednostkowych czasów wymiany pasażerów w zależności od liczby drzwi i sposobu realizacji opłaty.

Analiza tych prac pozwoliła na opracowanie przez Doktorantkę własnego podejścia, w którym między innymi analizowano przemieszczanie się pojedynczych pasażerów. Związane jest to z koniecznością opisu funkcji przystanku z rozregulowanym systemem obsługi pasażerów, w przypadku którego pojazdy zatrzymują się w różnych odstępach między sobą oraz od czoła przystanku, a pasażerowie oczekują na autobusy często w dużym rozproszeniu. Dodatkowo takie podejście umożliwia odwzorowanie czasu dojścia pasażerów do autobusu z dalszej odległości, czyli z opóźnieniem. Doktorantka w opracowywanym modelu symulacyjnym na czas wymiany pasażerów uwzględniła wpływ ich rozmieszczenia na przystanku (położenie miejsc oczekiwania pasażerów mierzone jest od czoła przystanku), położenie miejsca zatrzymania autobusów i innych pojazdów na przystanku, jednostkowe czasy wsiadania i wysiadania pasażerów w zależności od rodzaju przewoźnika i autobusu oraz zróżnicowanie prędkości poruszania się podróźnych. Następnie dokonana została analiza rozmieszczenia pasażerów oczekujących na przystankach z których korzystają różni przewoźnicy. Wyznaczone zostały parametry pozycji oczekiwania pasażerów, estymowane z prób pomiarowych dla analizowanych przystanków, które zestawiono w tablicy 6.2. Wykonano analizy dopasowania parametrów rozkładu teoretycznego dla rozkładów empirycznych zmiennej położenia miejsca oczekiwania pasażerów na przystanku w podziale na grupy, dla każdego z analizowanych przystanków. Obliczenia wykonano w dwóch grupach, oddzielnie dla pasażerów przewoźnika miejskiego oraz pozostałych użytkowników. Analizy wykonano dla następujących rozkładów ciągłych: beta, gamma, normalny, logarytmo-normalny, wykładniczy, logistyczny i Weibulla.

Efektom dokonanych analiz i obliczeń było opracowanie modelu symulacji procesu wymiany, dla którego ogólny schemat blokowy przedstawiono na rysunku 6.7. Natomiast szczegółowy schemat ideowy algorytmu obliczania czasu wymiany pasażerów, przeniesiony na język programowania, z podziałem na poszczególne bloki oraz opisem przedstawiono w złączniku nr 3. Doktorantka do modelu symulacyjnego wprowadziła następujące dane:

- wylosowane z odpowiedniego rozkładu liczby pasażerów wsiadających i wysiadających z autobusu,

- wylosowane z odpowiedniego rozkładu położenie miejsca zatrzymania autobusu na przystanku,
- wylosowane z odpowiedniego rozkładu jednostkowe czasy wysiadania kolejnych pasażerów z autobusów i innych pojazdów,
- wylosowane z odpowiedniego rozkładu jednostkowe czasy wsiadających kolejnych pasażerów do autobusów i innych pojazdów,
- wylosowane z odpowiedniego rozkładu położenia miejsca oczekiwania na przystanku kolejnych pasażerów wsiadających do autobusów i innych pojazdów,
- wylosowane z odpowiedniego rozkładu prędkości poruszania się na przystanku pasażerów wsiadających do pojazdu.

Opisane zostały przyjęte parametry modelu symulacyjnego procesu wymiany. Doktorantka w dalszej części tego rozdziału dokonała weryfikacji opracowanego modelu symulacyjnego obliczania czasu wymiany pasażerów z wykorzystaniem bazy danych materiału pomiarowego. Wyniki analiz przedstawiła w bardzo czytelny sposób graficznie na rysunkach 6.8 – 6.11. Następnie wykonana została analiza dopasowania parametrów rozkładów teoretycznych do liczby pasażerów wsiadających i wysiadających. Przedstawione zostały przykładowe analizy dla wybranych przystanków autobusowych. Istotnym czynnikiem, który został uwzględniony w procesie opracowania modelu symulacyjnego wymiany pasażerów było uwzględnienie czasu technicznego tj. czasu po zakończeniu wymiany pasażerów od momentu ruszenia pojazdu z przystanku pod warunkiem, że pojazd może włączyć się do ruchu bez strat czasu.

Rozdział zakończony jest 15 bardzo istotnymi szczegółowymi wnioskami dotyczącymi procesu obsługi pasażerów jako podstawowego komponentu funkcjonowania przystanku autobusowego. Wpływa na niego wiele czynników, w tym o charakterze losowym, a model procesu wymaga ujęcia probabilistycznego i złożonych zależności, szczególnie dla rozpatrywanych w rozprawie przystanków wykorzystywanych przez różnych przewoźników.

Na wstępie **rozdziału 7** zatytułowanego *Model przemieszczania się autobusów i innych pojazdów w obrębie przystanku autobusowego* przedstawiony został stan dotychczasowych badań w zakresie modelowania przemieszczania się pojazdów w obrębie przystanku autobusowego. Przede wszystkim w tych badaniach symulowano głównie przemieszczanie się autobusów podjeżdżających na stanowiska wymiany pasażerów i ich zatrzymywanie się w kolejce. W opracowanych modelach pomijano też wpływ zakłóceń od innych przewoźników. Natomiast czas tracony po zakończeniu wymiany pasażerów w wyniku warunków ruchowych, panujący na sąsiednich pasach ruchu i skrzyżowaniach jest opisywany w uproszczeniu rozkładami prawdopodobieństwa.

Na potrzeby realizacji rozprawy Doktorantka charakteryzuje modele jazdy za liderem wykorzystywane w symulacji pojazdów, przy czym zwraca uwagę, że istotną rolę odgrywa grupa modeli odstępów między poruszającymi się pojazdami w kolumnach. Dokonana zostaje charakterystyka kilku najbardziej istotnych przedmiotowych modeli opracowanych przez badaczy zagranicznych i krajowych (Krawiec, Celiński, Drąg). Następnie analizowany jest proces modelowania jazdy za liderem w ujęciu logiki rozmytej, który został opracowany na potrzeby budowy modelu przepływu ruchu w otoczeniu przystanku autobusowego. Przedstawione są założenia do testowania symulacji przepływu ruchu w otoczeniu przystanków autobusowych. Analizowane odcinki opasów ruchu są w opracowanym przez Doktorantkę modelu charakteryzowane przez 13 danych odzwierciedlających całościowo proces ruchowy między innymi w zakresie geometrii, obecności sygnalizacji świetlanej za przystankiem, odległość przystanku od skrzyżowania przystanku, odległość od czoła przystanku do linii warunkowego zatrzymania na wlocie skrzyżowania i najmniejszego

zarejestrowanego położenia miejsca zatrzymania pojazdu pozostałych użytkowników na przystanku celem wymiany pasażerów względem przyjętego przekroju 0 metra. Uwzględniany w opracowanym przez Doktorantkę modelu symulacyjnym potok ruchu stanowi ciąg pojazdów, które opisywane są w przekroju początkowym poprzez wczytywane z baz danych wybrane zdarzenia i przypisane mu takie parametry jak: rodzaj pojazdu, pas ruchu, rodzaj przewoźnika, moment wjazdu pojazdu w strefę pomiaru, prędkość chwilowa pojazdu w momencie wjazdu w obszar kontrolowany, miejsce zatrzymają się autobusów i innych pojazdów na pasie ruchu z przystankiem autobusowym, informacja o zajmowaniu pasa ruchu przez autobusy zatrzymujące się na przystanku oraz włączające się do ruchu po procesie wymiany pasażerów i czas postoju autobusu na przystanku. Następnie Doktorantka wykonała testowe symulacje przepływu ruchu w otoczeniu przystanku autobusowego oraz dobrała kształty zbiorów rozmytych i opasujących je funkcji. Przedstawione zostały przykłady obliczeniowe. Przy czym kształt zbiorów rozmytych i opisujące je funkcje zostały ustalone na podstawie wykonanych wcześniej prac z tego zakresu przez innych badaczy oraz testowych symulacji na bazie zgromadzonego przez Doktorantkę materiału badawczego. Dokonana została weryfikacja modelu przemieszczania się pojazdów w otoczeniu przystanku autobusowego na podstawie zgromadzonego materiału badawczego. Do jego weryfikacji zastosowano zgodność danych z pomiarów z danymi z symulacji jako miejsce zatrzymania na przystanku w celu wymiany pasażerów. W podsumowaniu zawarto ocenę wykonanych testowych symulacji dla opracowanego przez Doktorantkę modelu przemieszczania się pojazdów w otoczeniu przystanku autobusowego oraz stwierdzenie dotyczące wstępnej jego weryfikacji i ustalenia kierunków dalszej jego modyfikacji. Przedstawione zostało osiem wniosków dotyczących wykonanego zakresu prac badawczych w zakresie weryfikacji opracowanego modelu symulacyjnego.

W rozdziale 8 Model symulacyjny przepływu ruchu na odcinku międzywęzłowym z uwzględnieniem funkcjonowania przystanku autobusowego został opisany szczegółowo opracowany przez Doktorantkę model symulacyjny w celu odwzorowania przepływu ruchu na jednokierunkowym odcinku między skrzyżowaniami z uwzględnieniem funkcjonowania przystanku autobusowego. Przedstawiony został on za pomocą ogólnego schematu blokowego symulacji na rysunku 8.2, który przeniesiono na język programowania. Następnie opisane są wszystkie jego elementy poczynając od parametrów losowanych podczas generacji pojazdów przez charakterystykę sposobu odwzorowania poruszania się pojazdów w analizowanym obszarze, która została przedstawiona za pomocą schematu blokowego na rysunku 8.3 i 8.4. Zawarto na nich jednokrotną zmianę pasa ruchu, natomiast w przypadku, gdy w obrębie przystanku zlokalizowane jest więcej niż dwa pasy ruchu mogą być realizowane także dodatkowe zmiany pasów ruchu, które wynikają z konieczności zajęcia odpowiedniego pasa ruchu na skrzyżowaniu. Następnie ze względu na niewystarczającą zgodność w odwzorowaniu sposobu zmiany pasów ruchu w opracowanym modelu symulacyjnym Doktorantka dokonała rozszerzenia algorytmu odwzorowującego te manewry. Przedstawione zostało w sposób szczegółowy w modelu tzw. „grzecznościowe” hamowanie lub opóźnienie ruszania w kolejce w celu umożliwienia zmiany pasa ruchu przez autobus włączający się do ruchu z sąsiadującego z przystankiem pasa na pas zajmowany przez pojazd analizowany. Ilustrację tego manewru przedstawiono na rysunku 8.6. Istotnym też uzupełnieniem opracowanego modelu symulacyjnego było uwzględnienie w nim algorytmu dotyczącego losowego podjęcia decyzji przez kierującego autobusem dotyczącej zatrzymania i rozpoczęcia wymiany pasażerów na przystanku. Dokonana została weryfikacja modelu symulacyjnego w zakresie poszczególnych modeli cząstkowych. Wynik tych analiz przedstawiono na kilku histogramach (rys. 8.7 – 8.13). Opracowany model symulacyjny pozwala na obliczenie sześciu podstawowych mierników jakości obsługi na przystanku oraz

oceny warunków ruchu w jego otoczeniu. Schemat modelowania położenia miejsca zatrzymania autobusu na przystanku przedstawiony został na rysunku 8.14, modelowania czasu postoju na przystanku związanego z obsługą pasażerów - na rysunkach 8.15 – 8.17. Natomiast modelowania przepływu ruchu na odcinku między skrzyżowaniami na rysunku 8.18 – 8.20.

W celu ograniczenia niekorzystnych skutków wykorzystywania przystanków autobusowych przez różnych przewoźników i użytkowników, obniżających sprawność ruchu drogowego i komunikacji miejskiej Doktorantka opracowała propozycje ich usprawnienia. Wskazała też na potrzebę dalszej rozbudowy modelu symulującego. Rozdział zakończony jest 11 wnioskami, które podsumowują opracowany model symulacyjny.

W **rozdziale 9 (Podsumowanie pracy)** na wstępie dokonane zostało podsumowanie wykonanych przez Doktorantkę badań. Cele pracy naukowej zrealizowano głównie poprzez zbudowanie modelu symulującego przepływ ruchu na odcinku między skrzyżowaniami z uwzględnieniem funkcjonowania przystanku autobusowego w aspekcie rzeczywistego nieuporządkowanego jego wykorzystania przez różne grupy przewoźników. Można do nich zaliczyć: pojazdy komunikacji miejskiej i zamiejscowej (w tym prywatnych przewoźników), taksówki oraz pojazdy nieuprawnione, w warunkach zakłóceń w ruchu. Opracowany model stanowi narzędzie wspomagające analizy efektywności funkcjonowania przystanków, pozwalające na ustalenie, czy zastosowanie określonych rozwiązań technicznych i organizacyjnych może wpływać na poprawę jakości realizowanej obsługi pasażerów na przystanku i warunków ruchu w ich otoczeniu. Model został ukierunkowany na obliczanie mierników, które odnoszone są do różnych grup przewoźników i użytkowników oraz zakłóceń ruchu i obsługi pasażerów. Spełnione zostały przyjęte przez Doktorantkę założenia dotyczące uwzględnienia odmiennej specyfiki zachowań pasażerów i kierowców autobusów miejskiego przewoźnika oraz pozostałych grup przewoźników. Należy zaznaczyć, że przedmiotowy model tworzono wieloetapowo. W pierwszym etapie opracowano i zweryfikowano model obsługi pasażerów na przystanku. Natomiast w kolejnym etapie zbudowano i zweryfikowano model przemieszczania się autobusów i pozostałych pojazdów w otoczeniu przystanku autobusowego. Opracowany model posiada postać modułową, która umożliwia oraz ułatwia możliwość kolejnych modyfikacji. Dokonano weryfikacji pełnego modelu symulacyjnego wykonując testowanie przepływu ruchu na odcinku między skrzyżowaniami, które obejmowało wszystkie zbadane komponenty modelu.

Sformułowano 21 generalnych wniosków dotyczących realizowanej pracy w zakresie charakteru, złożoności i losowości zmiennych analizowanych procesów w obrębie przystanków autobusowych i przyległych odcinków ulic. Wykazano możliwości odwzorowania badanych procesów ruchu w sposób bliski rzeczywistości za pomocą zdekomponowania modelu funkcjonowania przystanku autobusowego, wykorzystywanego przez niejednorodne grupy użytkowników, na powiązane ze sobą probabilistyczne modele cząstkowe: model wyboru miejsca zatrzymania autobusu na przystanku, model wielostanowiskowej obsługi pasażerów, model przemieszczania się pojazdów na sąsiednich pasach ruchu oraz model zmiany pasów ruchu. Na podstawie opracowanego programu komputerowego do symulacji przepływu ruchu w języku *Python* wraz z doбором kształtu zbiorów rozmytych i opisujących je funkcji przynależności wykazano, że jest możliwe opisanie przemieszczania się pojazdów w otoczeniu przystanku komunikacyjnego za pomocą modelu jazdy za liderem z parametrami estymowanymi na podstawie reguł logiki rozmytej. Doktorantka stwierdziła, że porównanie wartości mierników oceny warunków ruchu i jakości obsługi pasażerów uzyskanych z symulacji i z pomiarów wskazuje na bliskie odwzorowanie w modelu procesów ruchowych zachodzących w obrębie przystanków autobusowych wykorzystywanych przez niejednorodne grupy użytkowników. W związku

z tym, model może być wykorzystany do obliczania mierników efektywności różnorodnych rozwiązań technicznych, organizacyjnych i prawnych, usprawniających funkcjonowanie przystanków i przyległej infrastruktury. Przedstawiono również wiele wniosków o charakterze bardziej szczegółowym dotyczących analizowanych w rozprawie zagadnień. Doktorantka również wskazała na możliwości praktycznego wykorzystania uzyskanych rezultatów pracy między innymi do analizy zarówno istniejących, jak i dopiero projektowanych przystanków i przyległej infrastruktury drogowej.

Wskazano dalsze kierunki pracy badawczej, między innymi polegające na rozbudowie opracowanego przez Doktorantkę modelu o moduł uwzględniający punktualność przybywania na przystanek pojazdów komunikacji zbiorowej oraz uwzględnienie wpływu lokalizacji przystanku bezpośrednio na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją wraz z analizą efektywności funkcjonowania strategii udzielania priorytetu przejazdu dla komunikacji zbiorowej, stanowiących komponent systemu sterowania (ITS). Recenzent bardzo pozytywnie ocenia dalsze plany naukowe mgr inż. Justyny Stępień, których realizacja przyczyni się do dalszego Jej rozwoju naukowego.

W wykazie Literatury podano 138 publikacji. Należy zaznaczyć, że znacząca ich większość została opublikowana po 2000 roku. Przy czym pozycje literatury opublikowane przed 2000 rokiem zaliczane są również do fundamentalnych dla rozpatrywanej tematyki badawczej. Wśród podanych pozycji Doktorantka jest autorem jednej publikacji.

Na zakończenie rozprawy zamieszczono streszczenie rozprawy doktorskiej w języku polskim i angielskim. Przedstawiono w nim przedmiot badań, zakres metod badawczych i ich cel. Dokonano omówienia uzyskanych wyników badań.

W zakończeniu rozprawy zamieszczono cztery załączniki dotyczące poszczególnych etapów badawczych.

2.2. Aktualność tematu

Rozprawa doktorska mgr inż. Justyny Stępień dotyczy istotnego problemu z zakresu miejskiej komunikacji zbiorowej a zwłaszcza wpływu przystanków autobusowych na sprawność ruchu drogowego i komunikacji miejskiej. Rozwój motoryzacji oraz zmiany gospodarcze w Polsce spowodowały, że część przystanków autobusowych na terenie miasta, stanowiących istotny element infrastruktury transportu miejskiego, jest intensywnie wykorzystywanych nie tylko przez różne rodzaje autobusów miejskiego przewoźnika ale również i grupy innych przewodników.

Problemy związane z funkcjonowaniem i wpływem przystanków autobusowych z których korzystają tylko miejscy przewoźnicy w naszym kraju są już na odpowiednim poziomie rozpoznane. Opracowane zostały dla nich metody wyznaczania potrzebnej liczby stanowisk postojowych na przystankach autobusowych w zależności od natężenia potoku autobusów oraz średniego czasu postoju autobusu na przystanku. Zostały sformułowane wytyczne projektowe, w których zawarto zasady wymiarowania geometrycznego przystanków i ich lokalizacji. Niestety nie odnoszą się one dla do sytuacji wykorzystywania przystanku autobusowego przez różnych przewoźników, w tym zamiejskich. Również w metodach obliczania przepustowości skrzyżowań uwzględnia się obecność przystanku autobusowego jako czynnika redukującego przepustowość relacji, pasów i grup pasów na wlotach. Jednak dotyczy to przypadku przystanków zlokalizowanych na pasach ogólnodostępnych bez uwzględnienia wpływu korzystania z tych przystanków różnych grup przewoźników.

Wraz z rozwojem usług komunikacyjnych, w celu zapewnienia wygody pasażerów, w miastach przystanki autobusowe wykorzystywane są wspólnie przez przewoźnika komunalnego oraz prywatnych przewoźników którzy realizują głównie kursy zamiejskie ale również w ograniczonym zakresie i miejskie. Dlatego też, w celu podniesienia jakości

funkcjonowania poszczególnych elementów infrastruktury komunikacyjnej i spójnego powiązania świadczonych usług przewozowych przez różne podmioty niezbędne jest sformułowanie zasad zarządzania i koordynacji wykorzystania przystanków autobusowych.

W związku z tym, przedstawiona praca dotyczy bardzo aktualnego problemu związanego z dokonaniem identyfikacji i analizy procesów ruchu oraz obsługi pasażerów w obrębie miejskich przystanków autobusowych, wykorzystywanych przez równe grupy użytkowników.

2.3. Ocena programu i zakresu pracy

Obiektem badań realizowanych w rozprawie są procesy ruchu i wymiany pasażerów w obrębie przystanków autobusowych, wykorzystywanych przez różne grupy przewoźników i innych użytkowników, wraz z przyległymi, sąsiadującymi odcinkami ulic między skrzyżowaniami, obciążonymi ruchem pojazdów.

Pomiary parametrów ruchu autobusów i innych pojazdów w strefie przystanków prowadzono techniką bezpośrednią przez obserwatorów znajdujących się na przystankach z wykorzystaniem techniki wideofilmowania. Analiza nagrań dokonana została za pomocą programu Movie Studio.

Doktorantka parametry komponentów modelu symulacyjnego funkcjonowania przystanków autobusowych wyznaczała za pomocą metod rachunku prawdopodobieństwa oraz statystyki matematycznej z wykorzystaniem analizy opisowej, estymacji wartości średniej, analizy wariancji, analizy korelacji i regresji oraz analiz numerycznych.

Mgr inż. Justyna Stępień w celu budowy modelu symulacyjnego funkcjonowania przystanku autobusowego oraz jego oddziaływania na ruch pojazdów opracowała autorski program komputerowy w języku programowania Python.

Zakres rozprawy doktorskiej jest sformułowany w sposób bardzo przejrzysty i szczegółowy. Przedstawiony został on w postaci ogólnego schematu blokowego. Poszczególne zaś jego składowe Doktorantka również przedstawiła w postaci pięciu schematów balowych dedykowanych określonej zakresowi realizowanej rozprawy.

Należy podkreślić kompleksowe podejście Doktorantki do realizowanego tematu w zakresie wykonanych badań, prac analitycznych oraz modelowych.

Przyjęty program badań zasługuje na bardzo pozytywną ocenę. Doktorantka wykazała się przygotowaniem do prowadzenia prac badawczych, analizy wyników i komputerowego modelowania.

2.4. Tezy i cel naukowy

Sformułowano w rozprawie doktorskiej cztery naukowe tezy oraz dwie tezy techniczne związane z ewentualnymi praktycznymi zastosowaniami rezultatów wykonanych badań.

Tezy naukowe dotyczą możliwości opisu zachodzących procesów na przystanku autobusowych oraz w obrębie przylegającego do niej pasa ruchu, który obsługiwany jest nie tylko przez autobusy miejskiego przewoźnika ale również i innych przewoźników. Dotyczą one możliwości analizy rozpatrywanego problemu naukowego w wyniku powiązania ze sobą probabilistycznych modeli cząstkowych dotyczących modelu wyboru miejsca zatrzymania autobusu na przystanku, modelu wielostanowiskowej obsługi pasażerów, modelu przemieszania pojazdów na sąsiednich pasach ruchu i modelu zmiany pasów ruchu. Doktorantka stawia również tezę, że przepływ ruchu w otoczeniu przystanku daje się opisać jako model jazdy za liderem, z parametrami estymowanymi na podstawie reguł logiki rozmytej. Natomiast w zakresie tez technicznych mgr inż. Justyna Stępień uważa, że obecnie obowiązujące metody i zasady projektowania przystanków są nieprzydatne w przypadku kiedy korzystają z nich niejednorodne grupy użytkowników oraz poprawa obsługi pasażerów i warunków

przepustowości jest możliwa poprzez zastosowanie dostępnych środków organizacji przewozów.

Przedstawione przez Doktorantkę tezy naukowe oraz techniczne należy uznać za bardzo trafnie sformułowane i świadczące o dojrzałości Jej jako badacza z zakresu inżynierii ruchu a w szczególności komunikacji zbiorowej.

Celem pracy była identyfikacja i analiza procesów ruchu oraz obsługi pasażerów w obrębie miejskich przystanków autobusowych, wykorzystywanych przez różne grupy użytkowników.

Uzyskane w rozprawie wyniki badań oraz opracowany model dotyczący opisu zachodzących procesów na przystanku autobusowych oraz w obrębie przylegającego do niego pasa ruchu, który obsługiwany jest nie tylko przez autobusy miejskiego przewoźnika, ale również i innych przewoźników są oryginalnym osiągnięciem Doktorantki.

Praca jest napisana językiem poprawnym. Zamieszczone w niej w dużej ilości rysunki w istotny sposób podnoszą wartość merytoryczną pracy.

2.5. Struktura i edycja rozprawy

W strukturze rozdziałów rozprawy występuje pewne zróżnicowanie w zakresie ich objętości. Rozdział 2 i 3 (*2. Przystanki autobusowe w świetle uwarunkowań prawnych i wytycznych technicznych* oraz *3. Stan badań naukowych w zakresie przystanków autobusowych*) w aspekcie merytorycznym dotyczą praktycznie tego samego zakresu problemowego i według recenzenta można je było zapisać w postaci jednego rozdziału dotyczącego wprowadzenia w przedmiot badań. Rozdział 5 *Model wyboru miejsca zatrzymania autobusów i innych pojazdów na przystanku* w zakresie objętości jest jednym z najmniejszych, lecz zgodnie z przyjętym schematem realizacji rozprawy przez Doktorantkę można przyjąć taką strukturę edycji rozprawy. W zależności od potrzeb w poszczególnych rozdziałach Doktorantka omawiane zagadnienia przedstawiła również w sposób graficzny za pomocą dużej ilości rysunków poglądowych, które ułatwiają analizę przedstawianych zagadnień.

Do rozprawy dołączono 4 załączniki, w których zaprezentowano zestawienia rysunków, fotografii i tabel. Ten bogaty zestaw materiałów pomocniczych w znaczący sposób wzbogaca merytoryczną stronę pracy naukowej.

W rozprawie występują sporadycznie drobne błędy o charakterze redakcyjnym i stylistycznym. Doktorantka dość często stosuje słowo *przeprowadzono* w doniesieniu do wykonanych badań. Według recenzenta można je zastąpić alternatywnie zwrotem *zrealizowano* lub *wykonano*, które są bardziej poprawne.

3. Uwagi i pytania recenzenta do pracy

Po zapoznaniu się z pracą doktorską pojawiają się u recenzenta pewne uwagi i pytania dotyczące zrealizowanej rozprawy naukowej w następujących kwestiach:

a) Strona formalna rozprawy

Doktorantka stosuje w pracy określenia: *model obsługi pasażerów* oraz *model wymiany pasażerów*. Doprecyzowania wymaga, czym różnią się przedmiotowe modele oraz jakie procesy obejmują swym zakresem.

Wyjaśnienia wymaga także przyjęte przez Doktorantkę podejście do analizy *czasu traconego po zakończeniu wymiany pasażerów*. Zmienna ta jest częściowo analizowana w rozdziale 6. *Model obsługi pasażerów na przystanku autobusowym wykorzystywanym przez różnych przewoźników*, ale także w rozdziale 7. *Model przemieszczania się autobusów i innych pojazdów w obrębie przystanku autobusowego* i 8. *Model symulacyjny przepływu ruchu na odcinku międzywęzłowym z uwzględnieniem funkcjonowania przystanku autobusowego*.

b) Wyniki badań doświadczalnych

Doktorantka opracowała w pracy modele cząstkowe przepływu ruchu i obsługi pasażerów w oparciu o wyniki badań poligonowych, wykonanych w okresach szczytowych natężeń ruchu i kursowania autobusów na 18 wytypowanych przystankach autobusowych w Kielcach i Krakowie (Rozdział 4, str. 72). Biorąc pod uwagę cel i zakres pracy wykonane badania można uznać za wystarczające, jednakże rozszerzenie pomiarów na większą liczbę przystanków, także zlokalizowanych na niezależnych od siebie ciągach komunikacyjnych pozwoliłoby na bardziej wiarygodną estymację parametrów z prób pomiarowych i lepszą weryfikację uzyskanych rezultatów analiz. Należy stwierdzić, że rozważenia wymagało także rozdzielenie przetworzonych wyników pomiarów poligonowych na część, wykorzystywaną do opracowania modeli symulacyjnych oraz na część potrzebną do ich testowania i weryfikacji uzyskanych wyników analiz.

Podczas wykonywanych pomiarów poligonowych zarejestrowano 383 wartości czasu wymiany pasażerów dla *taksówek i pozostałych pojazdów z obsługą pasażerów* (Rozdział 4, str. 85). W celu dokładniejszego oszacowania parametrów z próby pomiarowej, wykorzystywanych do opracowania modelu obsługi pasażerów na przystanku wskazane byłoby rozszerzenie zakresu badań w zakresie tej grupy pojazdów.

W celu wykonania bardziej szczegółowej analizy zmienności intensywności pasażerów wsiadających i wysiadających, także w okresach międzyszczytowych uzasadnione byłoby wykonanie pomiaru ciągłego w dłuższym przedziale czasowym np. 12-godzinnym. Uzyskane wyniki pozwoliłyby na podjęcie próby opracowania modelu obsługi pasażerów na przystanku w oparciu o niestacjonarne rozkłady prawdopodobieństwa.

c) Opracowane modele symulacyjne

W celu lepszego odwzorowania procesu obsługi pasażerów na przystankach, wykorzystywanych przez różne grupy przewoźników należało uwzględnić w modelu wymiany pasażerów napełnienia autobusów oraz nierównomierność obciążenia drzwi, wykorzystywanych do wymiany pasażerów, szczególnie w odniesieniu do przewoźnika miejskiego.

W modelu przemieszczania się pojazdów między skrzyżowaniami, pełniejsze zamodelowanie pracy sygnalizacji, także acyklicznej i warunkach funkcjonowania systemów sterowania ITS, pozwoliłoby na lepszą estymację strat czasu autobusów na przystankach oraz pozostałych pojazdów i szersze możliwości praktycznego wykorzystania opracowanego modelu symulacyjnego.

Uzasadnione byłoby rozszerzenie analiz, polegających na poszukiwaniu zależności pomiędzy teoretycznymi rozkładami prawdopodobieństwa, wykorzystanymi w opracowanych modelach cząstkowych, a parametrami estymowanymi z prób pomiarowych np. interwałem przyjazdu kolejnych autobusów w zakresie modelowania liczby pasażerów wsiadających i wysiadających. W opracowanym modelu symulacyjnym funkcjonowania przystanku autobusowego nie uwzględniono stochastycznej zależności kolejnych interwałów przyjazdu pojazdów.

Wskazane byłoby, aby Doktorantka wyjaśniła jak ocenia wpływ braku uwzględnienia tych czynników na wyniki wykonanych przebiegów symulacyjnych.

Wyjaśnienia wymaga także, jaki wpływ na wyniki, uzyskiwane z opracowanego modelu symulacyjnego mogą mieć dokonujące się stale zmiany w taborze autobusowym.

Jednocześnie należy zaznaczyć, że Doktorantka wskazuje w rozprawie na możliwości dalszego uszczegółowienia opracowanych modeli przepływu ruchu i obsługi pasażerów ze względu na zastosowanie modularnej budowy modelu symulacyjnego, która pozwala na jego późniejsze modyfikacje.

d) Dyskusja wyników i wnioski

Rozdział 9 zatytułowany został *Podsumowanie pracy*. Na wstępie Doktorantka przedstawiła zakres wykonanych badań. Następnie sformułowanych jest 21 interesujących wniosków generalnych. Według recenzenta wnioski te powinny być podzielone na odpowiadające postawionym na początku rozprawy doktorskiej tezom a w kolejności następnej rozwinięciem bardziej szczegółowych wyników badań. Przedstawiona została również możliwość praktycznego zastosowania uzyskanych rezultatów badań. Należy stwierdzić, że dyskusja wyników badań wykonana przez Doktorantkę jest przedstawiona w sposób czytelny i rzeczowy, chociaż wg recenzenta brak jest hierarchizacji wyników badań.

Doktorantka przedstawiła kierunki dalszych badań, które pozwolą na pogłębienie problemowego zagadnienia rozpatrywanego w rozprawie doktorskiej.

4. Ocena końcowa

Doktorantka Pani mgr inż. Justyna Stępień samodzielnie opracowała postawione w celu pracy zagadnienia. Posługując się prawidłową metodyką zrealizowała program badawczy w zakresie laboratoryjnym.

Sformułowane w recenzji uwagi krytyczne nie obniżają w sposób istotny wartości rozprawy. Mając powyższe na uwadze stwierdzam, że tezy postawione na początku pracy zostały udowodnione, **wyrażam więc przekonanie**, że rozprawa doktorska **mgr inż. Justyny Stępień pt.: „Wpływ przystanków autobusowych na sprawność ruchu drogowego i komunikacji miejskiej” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim** zgodnie z „Ustawą o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku stanowiąc oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W związku z tym, **stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Stępień do publicznej obrony.**

