Katowice, dn. 24.06.2023 r.

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

# RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgra inż. Arkadiusza Drabickiego
nt. ***„Modelling the impact of real-time crowding information in urban public transport networks"***
***(pol. „Modelowanie oddziaływania informacji w czasie rzeczywistym o napełnieniu pasażerskim w sieciach miejskiego transportu zbiorowego")***

**Podstawa formalna opracowania recenzji**

Podstawę opracowania recenzji stanowi Uchwała Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 19 kwietnia 2023 roku oraz pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej PK, prof. dr hab. inż. Andrzeja Szaraty z dn. 24 kwietnia 2023 roku.

## 1. Uwagi wstępne

Podstawą ubiegania się mgr inż. Arkadiusza Drabickiego o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie naukowej *Inżynieria lądowa, geodezja i transport* (dziedzina: nauki inżynieryjno-techniczne) jest rozprawa doktorska zatytułowana *„Modelling the impact of real-time crowding information in urban public transport networks"* (pol. *„Modelowanie oddziaływania informacji w czasie rzeczywistym o napełnieniu pasażerskim w sieciach miejskiego transportu zbiorowego"*). Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Andrzej Szarata, promotorem pomocniczym - dr inż. Rafał Kucharski, a konsultantami: prof. Oded Cats z Delft University of Technology oraz prof. Achille Fonzone z Edinburgh Napier University.

Dysertację tworzy zbiór pięciu opublikowanych, powiązanych tematycznie artykułów naukowych, w tym:

1. **Drabicki, A.**, Kucharski, R., Cats, O., & Szarata, A. (2021). *Modelling the effects of real-time crowding information in urban public transport systems*. Transportmetrica A: Transport Science, 17(4), 675-713. IF: 2,424, MEiN: 100 pkt,
2. **Drabicki, A.**, Kucharski, R., Cats, O., & Fonzone, A. (2017, June). *Simulating the effects of real-time crowding information in public transport networks*. In 2017 5th

D Z
Wydziału Inżynierii Lądowej
Wpłynęło dnia 0 8 LIP. 2023
L. dz. 10.510.324.2023
podpis

IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS) (pp. 675-680). IEEE.

3. **Drabicki, A.**, Cats, O., Kucharski, R., Fonzone, A., & Szarata, A. (2023). *Should I stay or should I board? Willingness to wait with real-time crowding information*. Research in Transportation Business and Management, Vol.47, 100963. IF: 4,286, MEiN: 100 pkt,
4. **Drabicki, A.**, Kucharski, R., & Cats, O. (2022). *Mitigating bus bunching with real-time crowding information*. Transportation. IF: 5,192, MEiN: 100 pkt,
5. **Drabicki, A.**, Cats, O., & Kucharski, R. (2021, June). *The potential of real-time crowding information in reducing bus bunching under different network saturation levels*. In 2021 7th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS) (pp. 1-6). IEEE.

Wskazane publikacje indeksowane są w bazach Scopus i WoS. Sumaryczna liczba punktów uzyskanych za prace tworzące dysertację wynosi 300 (wg punktacji MEiN), a ich łączny Impact Factor w roku publikacji wynosi 11,902. Wszystkie artykuły stanowiące rozprawę doktorską zostały wydane w języku angielskim w renomowanych czasopismach naukowych oraz materiałach konferencyjnych.

Współautorami publikacji są: prof. dr hab. inż. Andrzej Szarata, dr inż. Rafał Kucharski, prof. Odet Cats oraz prof. Achile Fonzone, czyli naukowcy reprezentujący różne ośrodki naukowe i pełniący funkcję promotorów oraz konsultantów w procesie przygotowania dysertacji. Pan mgr inż. Arkadiusz Drabicki jako pierwszy autor we wszystkich artykułach pełni kluczową rolę, a jego wkład, zgodnie z oświadczeniem Doktoranta, obejmuje m.in.: sformułowanie problemów i celów badawczych, wybór i uszczegółowienie metodyki analitycznej, obróbkę danych wejściowych i narzędzi analitycznych, opracowanie planu badań i przeprowadzenie szczegółowych analiz, weryfikację wyników badań, sformułowanie obserwacji z badań oraz wniosków naukowych i praktycznych, opracowanie zasadniczej wersji manuskryptów publikacyjnych, aktualizację manuskryptów publikacyjnych na podstawie recenzji merytorycznych oraz koordynację współpracy badawczej pomiędzy współautorami. Można zatem uznać, że wkład Doktoranta w przygotowanie publikacji był istotny.

Na podstawie wskazanych publikacji Autor rozprawy przygotował zwarte opracowanie w języku angielskim, uzupełnione o wykaz prac naukowych wchodzących w skład cyklu, słowniczek stosowanych skrótów, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz podsumowanie pracy w języku polskim liczące 24 strony. Materiały dostarczone przez mgra inż. Arkadiusza Drabickiego zawierają również szczegółowy opis dorobku naukowo-dydaktycznego i praktycznego Doktoranta.

Zapoznając się wstępnie z treścią opublikowanych artykułów naukowych oraz opracowaniem przygotowanym przez Doktoranta, stanowiącym dysertację, stwierdzam, że stanowią one spójną merytorycznie całość i prezentują zagadnienia o wspólnej tematyce dotyczącej modelowania oddziaływania informacji w czasie rzeczywistym o zatłoczeniu pojazdów w sieciach miejskiego transportu zbiorowego, która jednoznacznie wpisuje się w dyscyplinę *Inżynieria lądowa, geodezja i transport*.

## 2. Ogólna charakterystyka struktury i treści dysertacji

Dysertacja składa się z pięciu rozdziałów, obejmujących łącznie ponad 100 stron, w tym 42 rysunki i 23 tabele. Każdy z rozdziałów podzielony jest na mniejsze części (podrozdziały) i zawiera oddzielne wykazy literatury. Zasadniczy trzon pracy tworzą rozdziały 2, 3 i 4, zawierające odpowiednio zredagowane wersje publikacji wchodzących w skład cyklu, co zostało podkreślone przez zamieszczenie na początku każdego z tych rozdziałów wykazów publikacji, na podstawie których je przygotowano.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie w problematykę badawczą dotyczącą modelowania oddziaływania informacji w czasie rzeczywistym o napełnieniu pasażerskim (ang. *RTCI – real-time crowded information*) w sieciach miejskiego transportu zbiorowego. W tej części Doktorant przedstawił uwarunkowania i przesłanki podjęcia tematu, określił lukę badawczą i sformułował trzy zasadnicze pytania badawcze. Rozdział 1 dysertacji zawiera także ogólną charakterystykę badanego zagadnienia pod względem przyjętej metodyki badawczej, obejmującej dynamiczne modelowanie symulacyjne rozłożenia podroży w transporcie zbiorowym, badania ankietowe preferencji pasażerskich i zastosowanie modeli wyboru dyskretnego. We wprowadzeniu Doktorant przedstawił także ogólną strukturę pracy oraz wkład naukowy i utylitarny dysertacji w zakresie oddziaływania systemów RTCI w sieciach miejskiego transportu zbiorowego.

W rozdziale drugim opisano algorytm wyboru trasy (linii komunikacyjnej) przez pasażera w warunkach dostępności informacji o zatłoczeniu w środkach transportu zbiorowego. Rozdział ten składa się z dwóch podrozdziałów. W pierwszym z nich przedstawiono prace badawcze w zakresie testowania i walidacji proponowanego algorytmu RTCI prowadzonych na modelach prostych sieci transportowych, natomiast drugi zawiera wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych na modelu rzeczywistej sieci transportu zbiorowego w Krakowie.

Rozdział trzeci odnosi się do drugiego pytania badawczego dotyczącego wpływu informacji RTCI na skłonność pasażerów do wyboru późniejszego, ale mniej zatłoczonego odjazdu z tego samego przystanku. W tej części pracy przedstawiono wyniki badań ankietowych, na podstawie których opracowane zostały modele wyboru dyskretnego, opisujące gotowość pasażerów do oczekiwania (ang. *WTW – willingness to wait*) na kolejny kurs w ramach tej samej linii komunikacyjnej w zależności od RTCI. W badaniach symulacyjnych wzięto pod uwagę dwa scenariusze: scenariusz A, w którym system RTCI udostępnia pasażerowi informację o umiarkowanym poziomie napełnienia pojazdu dla pierwszego odjazdu i niskim poziomie napełnienia pojazdu dla drugiego odjazdu oraz scenariusz B, w którym pasażer otrzymuje informację o wysokim poziomie napełnienia pojazdu dla pierwszego odjazdu i umiarkowanym poziomie napełnienia pojazdu dla drugiego odjazdu. Badania wykazały zróżnicowany udział respondentów deklarujących gotowość wyboru późniejszego odjazdu w zależności od analizowanego scenariusza i przesunięcia czasowego podróży (o 5 lub 10 minut).

W rozdziale czwartym zamieszczono opis modelu symulującego wpływ RTCI na przesunięcia czasowe w decyzjach pasażerów w warunkach zakłóceń. Podobnie jak w rozdziale drugim, najpierw zaprezentowano wyniki wstępnych badań, obejmujących testy i weryfikację proponowanego algorytmu RTCI w zakresie wyboru kolejnego kursu przez pasażerów prowadzone na modelach prostych sieci transportowych, a następnie przedstawiono

implementację algorytmu dla modelu sieci rzeczywistego korytarza autobusowego w Warszawie. Analizy symulacyjne uwzględniały zjawisko deregulacji ruchu (tzw. *bus bunching*) polegające na grupowaniu pojazdów transportu zbiorowego, których odjazdy zaplanowane były w regularnych odstępach czasu, ale na skutek różnych czynników dotrzymanie rozkładu jazdy staje się niemożliwie i pojazdy poprzedzające zostają doganiane przez pojazdy odjeżdżające w kolejnych kursach. W efekcie zwiększające się odchylenia czasów odjazdu powodują większe zróżnicowanie w napełnieniu pojazdów jadących w krótszych odstępach czasu (tworzących grupę).

W ostatnim rozdziale dysertacji Autor przedstawił podsumowanie przeprowadzonych badań, sformułował wnioski, odniósł się do pytań badawczych określonych we wcześniejszej części pracy oraz wskazał możliwości praktyczne zastosowania wyników badań i kierunki dalszych prac badawczych.

W mojej ocenie przyjęta przez Doktoranta **struktura pracy jest właściwa**. Zamieszczony wykaz skrótów porządkuje i ujednolica stosowaną notację, co wpływa korzystnie na czytelność pracy. Treści zawarte w kolejnych rozdziałach odpowiadają ich tytułom i stanowią logiczne rozwinięcie zagadnień podjętych w dysertacji.

## 3. Ocena merytoryczna rozprawy

### 3.1. Ocena doboru tematu

Jednym z kluczowych czynników wpływających na postrzeganie jakości transportu zbiorowego jest komfort podróży. Zatłoczenie środków transportu zbiorowego może oddziaływać na decyzje podejmowane przez potencjalnych pasażerów i zniechęcać ich do odbywania podróży transportem zbiorowym, co z kolei może wpływać niekorzystnie na cały miejski system transportowy. Pasażerowie rezygnując z transportu zbiorowego i wybierając pojazdy prywatne do realizacji podróży mogą przyczyniać się do wzrostu kongestii w sieci drogowo-ulicznej, powodującej zwiększenie poziomu emisji szkodliwych substancji, wzrost wypadkowości oraz wydłużenie czasu podroży, co przekłada się bezpośrednio na szeroko pojęte koszty transportu. W tym kontekście informacja udostępniona poprzez system RTCI może w efektywny sposób wpływać na decyzje pasażerów związane z wyborem określonej opcji podróży, przyczyniając się tym samym do poprawy jakości podróży i efektywności funkcjonowania miejskiego transportu zbiorowego.

Dostępność informacji o aktualnych warunkach ruchu oraz oferowanie alternatywnych sposobów kontynuowania podróży umożliwia podróżnym dokonywanie bieżącej korekty w planie podróży. Przy uwzględnieniu wpływu informacji dostarczanej podczas realizacji podroży (typu *en-route*) istotna jest jej aktualność i związana z nią wiarygodność wpływająca na decyzje podejmowane przez pasażerów transportu zbiorowego. Obecnie systemy RTCI nie są jeszcze szeroko rozpowszechnione, a ich wdrożenia w rzeczywistych sieciach miejskiego transportu zbiorowego mają charakter fragmentaryczny lub pilotażowy. Ze względu na ograniczony poligon badawczy również analizy dotyczące oddziaływania RTCI na zachowania transportowe pasażerów nie były jak dotąd prowadzone na szeroką skalę. Jednak coraz bardziej rozbudowane architektury ITS stwarzają możliwości pozyskiwania danych o potokach pasażerskich w czasie rzeczywistym umożliwiając tym samym rozwój metod i narzędzi

kształtujących zachowania transportowe w sieciach miejskiego transportu zbiorowego. **Zachodzi zatem potrzeba prowadzenia badań w tym zakresie.**

W dysertacji zidentyfikowano lukę badawczą polegającą na niewystarczającym i niepełnym stanie wiedzy dotyczącym badań, metod i analiz wpływu systemów RTCI na decyzje pasażera oraz dalsze funkcjonowanie sieci miejskiego transportu zbiorowego. W związku z tym podjęto badania w trzech powiązanych ze sobą obszarach:

- modelowanie wpływu informacji RTCI na wybór trasy przejazdu (przesunięcie przestrzenne) w skali całej sieci transportu zbiorowego,
- badania wpływu informacji RTCI na skłonność pasażerów do wyboru późniejszego, ale mniej zatłoczonego odjazdu z tego samego przystanku (przesunięcie czasowe),
- analizy symulacyjne wpływu RTCI na jakość podróży w sytuacji zakłóceń w funkcjonowaniu transportu zbiorowego (efekt *bus bunching*).

Mając na uwadze złożoność sieci miejskiego transportu zbiorowego trudno oszacować konsekwencje decyzji podejmowanych przez pasażerów wynikających z pozyskania przez nich informacji o zatłoczeniu środków transportu w czasie rzeczywistym. W dysertacji rozważane są dwie płaszczyzny decyzyjne: przesunięcie przestrzenne (tzw. *spatial shift*), polegające na wyborze przez pasażera innej trasy (linii) na podstawie informacji o bieżącym poziomie napełnienia na dalszych odcinkach sieci transportu zbiorowego (tzw. *downstream-based-RTCI*) oraz przesunięcie czasowe (tzw. *temporal shift*), polegające na wyborze przez pasażera późniejszego odjazdu z danego przystanku na podstawie informacji o bieżącym poziomie napełnienia pasażerskiego w nadjeżdżających pojazdach transportu zbiorowego (tzw. *upstream-based-RTCI*). Odwzorowanie takich zmian w modelowaniu procesów decyzyjnych użytkowników systemu transportowego jest trudnym zadaniem i wymaga przeprowadzenia wielu badań symulacyjnych dla różnych scenariuszy. W badaniach dotyczących wpływu RTCI na przesunięcie przestrzenne do budowy modelu symulacyjnego wykorzystano istniejące badania preferencji pasażerskich, natomiast przy ocenie oddziaływania RTCI na przesunięcie czasowe podroży do wykonania analiz symulacyjnych konieczne było przeprowadzenie badań empirycznych preferencji pasażerskich.

Recenzowana rozprawa doktorska prezentuje oryginalne podejście do modelowania oddziaływania informacji w czasie rzeczywistym o napełnieniu pasażerskim w sieciach miejskiego transportu zbiorowego. W mojej ocenie problematyka badawcza podejmowana przez Doktoranta ma charakter nowatorski, a wyniki badań mogą mieć szerokie zastosowanie zarówno w zwiększeniu komfortu podróży, jak i poprawie wydajności systemu transportu zbiorowego. Temat podejmowany w recenzowanej dysertacji charakteryzuje się znacznym poziomem złożoności. Doktorant w swojej pracy powiązał dwa ważne postulaty przewozowe zgłaszane przez pasażerów w odniesieniu do transportu zbiorowego: komfort podroży wyrażany stopniem zatłoczenia w pojeździe i informację pasażerską, która jest jednym z kluczowych czynników decydujących o możliwościach skorzystania przez pasażerów z usług oferowanych przez organizatora transportu zbiorowego.

Mając na uwadze powyższe, pozytywnie oceniam wybór tematu pracy. Uważam, że problem badawczy podjęty w dysertacji przez mgra inż. Arkadiusza Drabickiego jest ważny i aktualny z punktu widzenia modelowania procesów decyzyjnych pasażerów transportu zbiorowego, a uzyskane wyniki badań mają charakter naukowy i praktyczny.

### 3.2. Ocena celu naukowego i zakresu rozprawy

Zasadniczym celem recenzowanej rozprawy doktorskiej jest *„dostarczenie wkładu naukowego w postaci metod (narzędzi) modelowania efektów dostarczania informacji o napełnieniu pasażerskim w czasie rzeczywistym (RTCI) na decyzje podróżnych o wyborze trasy lub kursu przejazdu w systemach miejskiego transportu zbiorowego (TZ)"*. W kontekście analizowanego problemu badawczego uważam, że cel ten został właściwie sformułowany, jest użyteczny i zasadny.

Doktorant sformułował również trzy otwarte pytania badawcze odnoszące się do prowadzonych prac analitycznych, które umożliwiły osiągnięcie celu zasadniczego w sposób etapowy. Pytania te determinują zakres naukowy rozprawy w następujący sposób:

1. *„Jaki może być efekt globalny wpływu informacji RTCI na wybór trasy przejazdu w skali sieci transportu zbiorowego?"*
2. *„Jaki jest wpływ informacji RTCI na skłonność pasażerów do wyboru późniejszego, ale mniej zatłoczonego odjazdu z tego samego przystanku?"*
3. *„Czy dostępność informacji RTCI może przyczynić się do poprawy jakości podróży w sytuacji zakłóceń funkcjonowania sieci?"*

Wyniki prac naukowych prowadzonych przez Doktoranta odnoszące się do postawionych pytań badawczych zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach i materiałach konferencyjnych oraz przedstawione w rozprawie jako cykl artykułów tworzący odrębne rozdziały pracy. Zdefiniowane przez mgra inż. Arkadiusza Drabickiego pytania badawcze dzielą zatem dysertację na trzy zasadnicze części. W odniesieniu do pytania 1. opracowano algorytm, który na podstawie modelu symulacyjnego w sposób dynamiczny odwzorowuje oddziaływanie RTCI na decyzje podróżnych dotyczące wyboru trasy przejazdu oraz wynikających z nich konsekwencji w funkcjonowaniu sieci miejskiego transportu zbiorowego. Aby odpowiedzieć na pytanie 2. przeprowadzono badania ankietowe wpływu RTCI na gotowość pasażerów do oczekiwania na późniejszy odjazd na danym przystanku w celu realizacji podroży mniej zatłoczonym pojazdem transportu zbiorowego. Natomiast prace badawcze w ramach odpowiedzi na pytanie 3. wymagały budowy dynamicznego modelu oddziaływania RTCI na decyzje dotyczące wyboru kursu (odjazdu) z danego przystanku, który umożliwia ocenę potencjalnych skutków dostarczania RTCI w sytuacji zakłóceń funkcjonowania sieci miejskiego transportu zbiorowego, na przykładzie problemu deregulacji kursowania pojazdów (tzw. *bus bunching problem*). Otrzymane wyniki wykazały zasadność prowadzonych badań teoretycznych, symulacyjnych i empirycznych w analizowanym obszarze.

Mając na uwadze analizowany problem badawczy, uważam, że pytania badawcze zostały sformułowane prawidłowo i są ściśle powiązane z zasadniczym celem recenzowanej dysertacji, co świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Autora dysertacji. Ponadto wyniki badań prowadzonych przez Doktoranta wykazały zasadność prowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych w analizowanym obszarze i stanowią ważny przyczynek w sensie poznawczym i utylitarnym w problematyce modelowania oddziaływania informacji w czasie rzeczywistym o napełnieniu pasażerskim w sieciach miejskiego transportu zbiorowego. W mojej ocenie świadczy to oryginalności przyjętego podejścia.

### 3.3. Ocena doboru metod do rozwiązania problemu przedstawionego w rozprawie

Modelowanie oddziaływania informacji w czasie rzeczywistym o napełnieniu pasażerskim w sieciach miejskiego transportu zbiorowego wymaga użycia odpowiednich metod i narzędzi symulacyjnych. Ich dobór jest bardzo ważnym i trudnym zadaniem, ponieważ może wpływać na dokładność i wiarygodność otrzymanych wyników. W recenzowanej dysertacji przedstawiono zbiór metod i narzędzi umożliwiających badania i ocenę skutków dostarczania informacji RTCI w sieciach miejskiego transportu zbiorowego, z perspektywy zarówno użytkownika, jak i operatora sieci.

Do osiągnięcia celu zdefiniowanego w dysertacji mgr inż. Arkadiusz Drabicki zastosował modelowanie matematyczne umożliwiające rozbudowę dynamicznych modeli symulacyjnych oraz opracował modele wyboru dyskretnego, uzupełnione badaniami ankietowymi preferencji pasażerskich. Instrumentarium stosowane przez Doktoranta jest zatem różnorodne i dostosowane do potrzeb analitycznych problemu badawczego.

Do opracowania algorytmów RTCI wykorzystano model mikroskopowy BusMezzo stanowiący nowoczesne otwarte środowisko symulacyjne, oparte na modelu agentowym i umożliwiające dynamiczne rozłożenie podróży realizowanych transportem zbiorowym. Wkład Doktoranta w rozwój tego narzędzia polegał na rozszerzeniu algorytmu odwzorowującego w sposób dynamiczny wybór trasy i kursu (odjazdu) dokonywany przez pasażera o uwzględnienie wpływu RTCI na oczekiwaną użyteczność podróży. Rozszerzony algorytm decyzyjny wyznacza prawdopodobieństwo wyboru opcji podróży w warunkach dostępności RTCI w sieciach miejskiego transportu zbiorowego.

Do analizy skutków RTCI na proces podejmowania decyzji przez pasażerów zastosowano modele wyboru dyskretnego, których szacowanie oparto na paradygmacie maksymalizacji losowej użyteczności (ang. *RUM – random utility maximization*). Podejście to zakłada, że pasażerowie dokonują wyborów w taki sposób, aby maksymalizować postrzeganą (oczekiwaną) użyteczność podróży, określaną przez indywidualnego decydenta zarówno na podstawie wcześniejszej wiedzy o warunkach podróży, jak i aktualnych informacji pozyskanych w czasie rzeczywistym.

Prace analityczne w ramach budowy modeli wyboru dyskretnego wymagały przeprowadzenia empirycznych badań preferencji pasażerskich dla hipotetycznych scenariuszy wyboru. Takie badania można wykonywać w sytuacji braku odpowiedniego poligonu badawczego, co ma miejsce w sytuacji braku wdrożenia systemu RTCI w rzeczywistych sieciach miejskiego transportu zbiorowego. Wyniki badań eksperymentalnych zostały wykorzystane do analizy potencjalnego wpływu RTCI na wybory pasażerów dotyczące odjazdu na przystankach transportu zbiorowego i uzyskania danych do budowy modeli wyboru dyskretnego.

Modele symulacyjne oraz badania empiryczne, zrealizowane w ramach recenzowanej dysertacji, stanowią wartościowe narzędzia umożliwiające opis oddziaływania RTCI na proces decyzyjny pasażerów oraz funkcjonowanie transportu zbiorowego w ujęciu sieciowym. W związku z tym mogą mieć zastosowanie jako wsparcie działań strategicznych i operacyjnych w zakresie optymalnego wykorzystania zasobów przewozowych transportu zbiorowego w czasie rzeczywistym w zależności od aktualnych potrzeb, scenariuszy i warunków sieciowych, co w efekcie może wpłynąć korzystnie na poprawę jakości podróży.

Reasumując, uważam, że mgr inż. Arkadiusz Drabicki posiada wiedzę w zakresie metod modelowania matematycznego i potrafi opracować odpowiednie narzędzia informatyczne umożliwiające symulację procesów decyzyjnych pasażerów w warunkach dostępności RTCI. Doktorant wykorzystując umiejętnie wiedzę i doświadczenie we właściwy sposób dobrał metody i narzędzia do analizy wybranego zagadnienia i rozwiązania problemu badawczego.

### 3.4. Ocena naukowej wartości rozprawy

Naukowa wartość rozprawy w sposób bezpośredni wiąże się z weryfikacją pytań badawczych sformułowanych w rozdziale pierwszym dysertacji i obejmuje:

- w ramach modelowania wpływu RTCI na wybory tras przez pasażerów w sieciach miejskiego transportu zbiorowego:
    - opracowanie modelu matematycznego i algorytmu wyboru trasy (linii) przez pasażerów transportu zbiorowego z uwzględnieniem RTCI,
    - rozbudowę modelu BusMezzo w sposób umożliwiający badanie oddziaływania RTCI na decyzje pasażerów dotyczących wyboru trasy (linii),
    - przeprowadzenie wstępnych badań symulacyjnych w zakresie oddziaływania RTCI na wybór trasy (linii) na modelach prostych sieci transportowych,
    - uporządkowanie wiedzy w zakresie modelowania zatłoczenia w systemach transportu zbiorowego,
    - uporządkowanie wiedzy w zakresie systemów informacji o zatłoczeniu w środkach transportu zbiorowego w czasie rzeczywistym,
    - przeprowadzenie analiz symulacyjnych wpływu dostępności RTCI na wybór trasy (linii) przez pasażerów w skali całej sieci miejskiego transportu zbiorowego na przykładzie Krakowa,
- w ramach badań preferencji pasażerskich dotyczących gotowości do oczekiwania na kolejny kurs (odjazd) w warunkach RTCI:
    - uporządkowanie wiedzy w zakresie modelowania gotowości do oczekiwania na kolejny kurs (odjazd) w warunkach dostępności informacji o zatłoczeniu w pojazdach transportu zbiorowego,
    - przeprowadzenie empirycznych badań preferencji pasażerskich w zakresie gotowości do oczekiwania na kolejny kurs (odjazd) w warunkach RTCI,
    - opracowanie metody szacowania modeli wyboru dyskretnego dla potrzeb modelowania gotowości do oczekiwania na kolejny kurs (odjazd) w warunkach dostępności RTCI,
    - przeprowadzenie analizy wyników badań ankietowych w zakresie gotowości do oczekiwania na kolejny kurs (odjazd) w warunkach RTCI,
- w ramach modelowania wpływu RTCI na wybory odjazdów przez pasażerów w sieciach miejskiego transportu zbiorowego w warunkach deregulacji kursowania linii autobusowej (efekt *bus bunching*):
    - przeprowadzenie wstępnych badań symulacyjnych w zakresie oddziaływania RTCI na wybór odjazdu w warunkach zakłóceń na modelach prostych sieci transportowych,

- opracowanie modelu matematycznego i algorytmu wyboru odjazdu w warunkach deregulacji kursowania linii transportu zbiorowego z uwzględnieniem RTCI,
- rozbudowę modelu BusMezzo w sposób umożliwiający badanie oddziaływania RTCI na decyzje pasażerów dotyczących wyboru odjazdu w warunkach deregulacji kursowania linii,
- przeprowadzenie analiz symulacyjnych wpływu dostępności RTCI na wybór odjazdu przez pasażerów na rzeczywistego korytarza autobusowego w Warszawie.

Wyniki badań prowadzonych w ramach dysertacji mają także wymiar praktyczny, obejmujący m.in.:

- zrozumienie wpływu dostępności RTCI na wybory dokonywane przez pasażerów podczas podróży (przesunięcie przestrzenne i czasowe),
- identyfikację procesów związanych z pozyskiwaniem danych o zatłoczeniu w pojazdach, ich przetwarzaniem, a następnie udostępnieniem w formie RTCI w systemach transportu zbiorowego,
- określenie wpływu dostępności RTCI na budowę baz danych dotyczących realizacji podróży transportem zbiorowym umożliwiających ocenę wydajności usług trasnportowych,
- określenie wpływu dostępności RTCI na zmniejszenie deregulacji kursowania pojazdów (efekt *bus bunching*) i wahań liczby pasażerów w kolejnych odjazdach.

Wymierny efekt pracy stanowią także narzędzia informatyczne opracowane w ramach dysertacji. Umożliwiają one prowadzenie dalszych badań, obejmujących złożone obliczenia i analizy symulacyjne w zakresie oddziaływania RTCI na wybory dokonywane przez pasażerów w transporcie zbiorowym. Wskazuje to zarówno na naukowy, jak i praktyczny charakter rozprawy.

## 4. Uwagi szczegółowe i pytania problemowe

### 4.1. Uwagi merytoryczne

W mojej ocenie recenzowana rozprawa została napisana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym. Mam jednak kilka pytań, które nasunęły się podczas analizy treści pracy. Odpowiedzi oczekuję podczas publicznej obrony.

1. Jako jeden z kierunków dalszych badań Doktorant wskazał rozwój algorytmów generujących informację o napełnieniu (zatłoczeniu) pojazdów transportu zbiorowego w kierunku uwzględnienia reakcji użytkowników na otrzymywaną informację. Z czego wynika taka potrzeba i czy prowadzono już pilotażowe badania w tym zakresie?
2. W części stanowiącej podsumowanie pracy w języku polskim zamieszczono następujący tekst: *„W wariancie dostępu do informacji RTCI całkowity postrzegany koszt podróży maleje o niecałe 3%, ale za to znacząco maleją koszty związane z*

*doświadczeniem przez pasażerów skutków nadmiernego zatłoczenia pasażerskiego – tj. braku możliwości wejścia do pojazdu, czy też przejazdu w nadmiernie zatłoczonym pojeździe. Jak się okazuje, koszty te w skali globalnej spadają o 30%"*. Proszę o wyjaśnienie, w jaki sposób wyznaczono całkowity postrzegany koszt podróży?

3. Oddziaływanie RTCI na wybory dokonywane przez pasażerów w zakresie zmiany trasy (linii) lub kursu (odjazdu) może zależeć od stopnia zawodności systemu wyrażonego np. poziomem punktualności. Czy w modelowaniu procesów decyzyjnych pasażerów brano pod uwagę tego typu czynniki?
4. W badaniach gotowości pasażerów na oczekiwanie (*WTW – willingness to wait*) na kolejny kurs (odjazd) ważnym czynnikiem może być uciążliwość oczekiwania zależna m.in. od miejsca, w którym znajduje się pasażer podejmujący decyzję. Czy w prowadzonych badaniach ankietowych brano pod uwagę wyposażenie i lokalizację przystanków oraz stan infrastruktury przystankowej?
5. W części stanowiącej podsumowanie pracy w języku polskim zamieszczono następujący tekst: *„Użyteczność $U_{r+1}$ opisuje zatem skłonność do oczekiwania (WTW – z ang. willingness to wait) na późniejszy odjazd tej samej linii na danym przystanku, przede wszystkim w zależności od użyteczności informacji RTCI $\beta_{RTCI}^{s}$ o poziomie zatłoczenia obu kursów w scenariuszu s oraz uciążliwości $\beta_{wt}$ wymaganego czasu oczekiwania $t_{wt}$"*. W jaki sposób należy rozumieć pojęcia: *użyteczność informacji o określonym poziomie zatłoczenia* oraz *uciążliwość wymaganego czasu oczekiwania* i od jakich czynników zależą te wielkości?
6. Budując model oddziaływania RTCI na wybór odjazdu (kursu) przez pasażera założono, że decyzja taka *„może nastąpić nie więcej niż jeden raz"*. Jak należy to rozumieć i dlaczego przyjęto tak sformułowane założenie?
7. Oddziaływanie RTCI na zachowania komunikacyjne i wybór przez pasażerów odpowiedniej opcji podróży może zależeć również od czasu i kanału dystrybucji informacji. Czy w prowadzonych badaniach uwzględniono te czynniki?
8. Czy opracowane modele przedstawione w dysertacji można również zastosować do analizy oddziaływania RTCI na procesy decyzyjne pasażerów transportu zbiorowego w zakresie wyboru innego podsystemu transportowego podczas podróży?

Należy zaznaczyć, że przedstawione wyżej uwagi mają charakter dyskusyjny i nie podważają mojej wysokiej oceny rozprawy.

### 4.2. Uwagi dotyczące redakcji rozprawy

Uważam, że recenzowana rozprawa została napisana dobrym językiem naukowym i zredagowana starannie. Jednak w kilku miejscach wystąpiły błędy redakcyjne, stylistyczne i językowe. Wśród nich należy wskazać następujące kwestie:

- w streszczeniu Doktorant nawiązuje do trzech zasadniczych rozdziałów pracy, w których zawarto wyniki prac naukowych. W tym miejscu Autor dysertacji pisze o rozdziałach 1-3. Chodzi oczywiście o rozdziały 2-4;

- w podrozdziale „*2.2.1. Introduction*" zamieszczono podrozdział o niewłaściwej numeracji „*1.3. Research gap and contribution*";
- w dysertacji Doktorant bada gotowość pasażerów do oczekiwania (*WTW – willingness to wait*) na późniejszy odjazd tej samej linii na danym przystanku. W części stanowiącej podsumowanie pracy w języku polskim w kilku miejscach Autor dysertacji używa zwrotu „zjawisko WTW", co w mojej ocenie nie jest właściwe. Zgodnie z definicją podaną w słowniku PWN[1] pojęcie „*zjawisko*" ma trzy znaczenia i definiowane jest jako: „*1. «to, co się wydarzyło»; 2. «coś niezwykłego lub ktoś zadziwiający, wyjątkowy»; 3. «nierealne, piękne widzenie senne lub urojenie»*";
- w treści dysertacji znalazły się drobne błędy stylistyczne i językowe.

Ponadto poszczególne części dysertacji zawierają ponumerowane w sposób niezależny rysunki, tabele i wzory, co w mojej ocenie jest pewną uciążliwością. Rozumiem, że rozdziały powstawały niezależnie jako odrębne publikacje, jednak uważam, że po połączeniu ich w jedną całość stanowiącą zwarte opracowanie należało uporządkować numerację.

Proszę, aby Doktorant nie odnosił się do powyższych uwag w trakcie obrony, lecz ewentualnie uwzględnił je w przyszłych publikacjach.

Reasumując, stwierdzam, że mgr inż. Arkadiusz Drabicki sprawnie posługuje się językiem naukowym, rozprawa doktorska jest napisana w sposób czytelny i przejrzysty, a ewentualne drobne błędy redakcyjne oraz uchybienia językowe i stylistyczne nie obniżają jej wartości merytorycznej.

**5. Ocena końcowa rozprawy**

Uważam, że treść recenzowanej rozprawy stanowi spójną i uporządkowaną całość. Doktorant na podstawie przeglądu literatury określił zasadniczy cel pracy oraz sformułował pytania badawcze determinując tym samym zakres naukowy dysertacji. Zapoznanie się z aktualnym stanem wiedzy pozwoliło mgrowi inż. Arkadiuszowi Drabickiemu zbudować modele decyzyjne umożliwiające prowadzenie badań symulacyjnych w zakresie oddziaływania informacji w czasie rzeczywistym o napełnieniu pasażerskim (RTCI) w sieciach miejskiego transportu zbiorowego.

Główny cel dysertacji został osiągnięty, a opracowane metody modelowania efektów dostarczania informacji o napełnieniu pasażerskim w czasie rzeczywistym (RTCI) na decyzje podróżnych o wyborze trasy lub kursu przejazdu w systemach miejskiego transportu zbiorowego stanowią **oryginalne rozwiązania problemów naukowych**. Wymiernym efektem pracy są narzędzia informatyczne wspomagające procesy obliczeniowe oparte na autorskich algorytmach przedstawionych w dysertacji.

Rozprawa doktorska napisana jest na dobrym poziomie naukowym, a uwagi zgłoszone w p. 4 (głównie w formie pytań lub uwag o charakterze redakcyjnym) nie obniżają wysokiej oceny pracy. Poszczególne etapy pracy zostały przedstawione w sposób zwarty i przejrzysty. Doktorant w sposób właściwy dobrał aparat matematyczny do rozwiązania problemu badawczego, potwierdzając w ten sposób **swoją wiedzę teoretyczną w zakresie badanego**

[1] https://sjp.pwn.pl/

**zagadnienia**. Wnioski sformułowane przez Doktoranta na podstawie uzyskanych wyników badań świadczą o umiejętności analizy i krytycznej oceny, co stanowi ważną cechę **w samodzielnym prowadzeniu prac o charakterze naukowo-badawczym**.

Temat podjęty w pracy jest ważny, zarówno pod względem teoretycznym, jak i praktycznym. W związku z powyższym, w mojej ocenie, **dysertacja wnosi istotny wkład w rozwój nauk inżynieryjno-technicznych** w zakresie modelowania oddziaływania informacji o napełnieniu pasażerskim w czasie rzeczywistym (RTCI) na procesy decyzyjne pasażerów transportu zbiorowego. Recenzowana rozprawa doktorska może być zatem podstawą do nadania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie *Inżynieria lądowa, geodezja i transport.*

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Arkadiusza Drabickiego pt. *„Modelling the impact of real-time crowding information in urban public transport networks"* (pol. *„Modelowanie oddziaływania informacji w czasie rzeczywistym o napełnieniu pasażerskim w sieciach miejskiego transportu zbiorowego"*):

- stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie *Inżynieria lądowa, geodezja i transport*,
- prezentuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Autora dysertacji.

Wobec powyższego stwierdzam, że recenzowana dysertacja spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003 „o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" (Dz. U. 2003, Nr 65, poz. 595), wraz z jej późniejszymi zmianami oraz w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669), wraz z jej późniejszymi zmianami.

Stawiam zatem wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgra inż. Arkadiusza Drabickiego przez Radę Naukową Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej i dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów postępowania kwalifikacyjnego w zakresie uzyskania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *Inżynieria lądowa, geodezja i transport.*

.....

dr hab. inż. Renata Żochowska, prof. PŚ