

Recenzja spełnia wymagania formalne

prof. dr hab. inż. Andrzej Szarata
Katedra Systemów Transportowych i Logistycznych
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Krakowska

Kraków, dnia 8 października 2025 r.

Przewodniczący Rady Dyscypliny
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport
Politechniki Śląskiej

prof. dr hab. inż. Piotr Folęga

Recenzja

pracy doktorskiej

mgr inż. Adriana Barchańskiego

p.t.: „Metoda synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym w aspekcie czasu podróży pasażera w publicznym transporcie zbiorowym”

(Promotor: dr hab. inż. Renata Żochowska, prof. P.Śl.

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Kłos)

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria lądowa, geodezja i transport na Politechnice Śląskiej, prof. dr hab. inż. Piotra Folęgi.

Recenzowana praca liczy 272 strony i została podzielona na 7 rozdziałów, spis literatury, rysunków i tabel oraz 3 załączniki. Praca zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim oraz wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń.

Rozprawa podejmuje niezwykle aktualny problem badawczy związany z poprawą jakości i efektywności publicznego transportu zbiorowego poprzez synchronizację rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych. Autor koncentruje się na wpływie odchyłek od rozkładu jazdy (niepunktualności) na średni czas oczekiwania pasażerów w procesie przesiadania się z pociągów na autobusy miejskie. Celem pracy jest opracowanie i weryfikacja metody synchronizacji rozkładów jazdy, która uwzględni rzeczywiste (stochastyczne) odchyłki czasu przyjazdów i odjazdów środków transportu, a tym samym pozwala skrócić średni czas oczekiwania pasażerów.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Inżynieria Lądowa i Transport

wpłynęło dnia 5 XI 2025
nr 79/2025 zał.

1. Ocena poszczególnych części rozprawy

Rozdział pierwszy pełni funkcję wprowadzenia do problematyki badawczej i stanowi solidne teoretyczne uzasadnienie podjętego tematu. Autor przedstawia w nim tło i znaczenie badań nad synchronizacją rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych, wskazując na rosnące znaczenie transportu zbiorowego w przeciwdziałaniu negatywnym skutkom suburbanizacji oraz w realizacji zasad zrównoważonej mobilności miejskiej.

Omówione zostały kluczowe pojęcia i zależności występujące w systemie transportu publicznego – takie jak czas podróży, czas oczekiwania, przesiadka, węzeł przesiadkowy – które stanowią podstawę dalszego modelowania. Autor szczegółowo charakteryzuje proces zmiany środka transportu w węźle przesiadkowym, analizując jego elementy w ujęciu jednostkowym i systemowym. Wskazuje, że czas oczekiwania należy do grupy najbardziej uciążliwych składników podróży i stanowi znaczący czynnik wpływający na decyzje pasażerów.

W rozdziale przedstawiono również uzasadnienie naukowe i praktyczne wyboru tematu oraz określono obszar badań, obejmujący integrację transportu kolejowego z komunikacją miejską. Autor wyraźnie sytuuje swoje badania w kontekście aktualnych trendów międzynarodowych oraz idei zrównoważonego transportu, podkreślając znaczenie poprawy jakości usług poprzez skrócenie czasu przesiadek i zwiększenie niezawodności połączeń.

Całość rozdziału charakteryzuje się dużą klarownością i precyzją pojęciową. Wprowadzenie skutecznie buduje teoretyczne ramy dla dalszych analiz i modelowania przedstawionych w kolejnych częściach pracy. Można jednak wskazać kilka drobnych uwag o charakterze porządkującym lub redakcyjno-merytorycznym, które nie podważają wartości treści, ale mogłyby poprawić jej przejrzystość i spójność:

- Mocno rozbudowana warstwa definicyjna (wprowadzenie zawiera bardzo szczegółowe definicje i powiązania między pojęciami), co jest poprawne, lecz chwilami powoduje przeciążenie tekstu i utrudnia odbiór.
- Nadmierne powoływanie się na akty prawne w części definicyjnej – przytaczanie pełnych definicji ustawowych jest poprawne formalnie, ale mogłoby być zastąpione skróconymi odniesieniami, by zachować charakter naukowy, a nie legislacyjny tekstu.
- Zakres pojęcia „czas podróży” – Autor przyjmuje definicję „uogólnionego kosztu podróży” i odnosi ją do czasu podróży, co jest poprawne w sensie ekonomicznym, ale wymagałoby krótkiego doprecyzowania, że koszt uogólniony obejmuje także czynniki pozaczasowe (np. komfort podróży, poziom napełnienia, postrzeganie poszczególnych etapów przez pasażera itp.).

Rozdział drugi stanowi przegląd stanu wiedzy i literatury dotyczącej problematyki synchronizacji rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych. Autor systematycznie

przedstawia kluczowe aspekty teoretyczne i praktyczne związane z funkcjonowaniem transportu zbiorowego, ze szczególnym uwzględnieniem roli węzłów przesiadkowych w zapewnieniu ciągłości podróży i integracji systemów transportowych.

W pierwszej części omówiono znaczenie węzłów przesiadkowych w organizacji podróży w publicznym transporcie zbiorowym, wskazując, że są one elementem kluczowym dla efektywności całego systemu, wpływającym na decyzje pasażerów o wyborze środka transportu. Autor podkreśla, że jakość i niezawodność przesiadki – w tym minimalizacja czasu oczekiwania – decydują o postrzeganiu atrakcyjności transportu zbiorowego.

W kolejnych częściach zaprezentowano narzędzia i metody synchronizacji rozkładów jazdy – od klasycznych, deterministycznych modeli czasowych po rozwiązania wykorzystujące podejścia heurystyczne i symulacyjne. Autor dokonuje krytycznej analizy dotychczasowych badań krajowych i zagranicznych, wskazując, że większość opracowań pomija wpływ odchyłek od rozkładu jazdy (niepunktualności) oraz zmienność czynników stochastycznych, takich jak czas przejścia między peronami i przystankami. W niektórych fragmentach Autor szczegółowo opisuje prace innych badaczy, ale nie zawsze dokonuje wystarczającego porównania metod ani ich krytycznej oceny. Warto byłoby wyraźniej wskazać, dlaczego poszczególne rozwiązania nie są wystarczające w kontekście problemu badawczego pracy.

W końcowej części rozdziału sformułowano wnioski z przeglądu literatury, które jednoznacznie uzasadniają potrzebę opracowania nowej metody synchronizacji rozkładów jazdy. Autor wskazuje istniejącą lukę badawczą – brak metod uwzględniających odchyłki od rozkładu jazdy w ujęciu dynamicznym i probabilistycznym – oraz określa kierunki dalszych badań. Dostrzeżone niewielkie nieścisłości terminologiczne – miejscami termin „synchronizacja rozkładów jazdy” używany jest wymiennie z pojęciem „koordynacja rozkładów”, które w literaturze transportowej nie zawsze są tożsame (koordynacja ma szerszy zakres). Nie jest to jednak błąd, lecz raczej kwestia doprecyzowania pojęć.

Całość rozdziału cechuje się dużą starannością, szerokim zakresem analizy i umiejętnym powiązaniem literatury z praktycznymi problemami organizacji transportu. Rozdział drugi stanowi solidną podstawę teoretyczną do opracowania autorskiego modelu i metody zaprezentowanej w dalszych częściach pracy.

Rozdział trzeci poświęcony jest opracowaniu modelu węzła przesiadkowego i jego otoczenia, stanowiącego podstawę dalszych analiz optymalizacyjnych. Autor przedstawia w nim strukturę i elementy modelu opisującego funkcjonowanie transportu zbiorowego w obszarze oddziaływania węzła przesiadkowego, integrującego transport kolejowy i autobusową komunikację miejską.

W pierwszej części rozdziału zdefiniowano strukturę modelu, obejmującą elementy infrastruktury (perony, stanowiska przystankowe, drogi przejścia), układ tras linii komunikacyjnych oraz relacje podróży między segmentami źródłowymi i docelowymi. Autor

opisuje zależności przestrzenne i czasowe zachodzące w węźle oraz przedstawia sposób odwzorowania potoków pasażerskich w skali doby.

W dalszej części omówiono zapotrzebowanie na przewozy pasażerskie, sposób jego modelowania oraz czynniki wpływające na zmienność ruchu w ciągu dnia. Szczególną uwagę poświęcono modelowi zależności czasowych między przyjazdami i odjazdami środków transportu oraz czynnikom stochastycznym, takim jak odchyłki od rozkładu jazdy i zróżnicowanie czasu przejścia pasażerów między stanowiskami.

Autor wprowadza także pojęcie macierzy potoków pasażerów i jej rozkładu czasowego, co umożliwia ilościowe opisanie procesów przesiadkowych w ujęciu dynamicznym. Model uwzględnia różne okresy funkcjonowania węzła (poranny szczyt, międzyszczyt, popołudniowy szczyt, wieczór) oraz pozwala odwzorować zróżnicowanie warunków ruchu i zapotrzebowania.

W opisie modelu Autor płynnie przechodzi między poziomem koncepcyjnym (schemat funkcjonalny węzła), a formalnym (zależności matematyczne i zmienne decyzyjne). Dla czytelnika nie zawsze może być jasne, gdzie kończy się model opisowy, a zaczyna model obliczeniowy. Warto byłoby wyraźniej rozdzielić te dwa poziomy – np. w formie diagramu lub zestawienia założeń i zmiennych. Należy zwrócić uwagę, że opracowany model jest bardzo szczegółowy, ale miejscami nadmiernie rozbudowany pod względem liczby oznaczeń i symboli. To utrudnia śledzenie zależności pomiędzy elementami (np. między segmentami, potokami, kierunkami jazdy i relacjami podróży). Nie wpływa to na poprawność, ale na czytelność i praktyczną użyteczność modelu.

W modelu założono, że pasażerowie wybierają pierwszy dostępny autobus w relacji docelowej, pomijając indywidualne preferencje lub subiektywną ocenę komfortu, zatłoczenia czy punktualności. Tego rodzaju uproszczenie jest dopuszczalne na poziomie modelu deterministycznego, jednak wymagałoby krótkiego uzasadnienia (np. przyjęcia założenia o racjonalności zachowań pasażerów w warunkach codziennych podróży). Można odnieść wrażenie, że przyjęte założenie dotyczące funkcjonowania transportu jest statyczne i nie przewiduje reakcji po stronie organizatora (np. korekty rozkładu jazdy w odpowiedzi na systematyczne opóźnienia). W praktyce takie sprzężenie zwrotne istnieje i mogłoby zostać uwzględnione przynajmniej w formie komentarza lub ograniczenia modelu.

Należy podkreślić, iż cały rozdział stanowi spójną koncepcyjnie i logicznie zbudowaną strukturę modelową, która stanowi bazę dla sformułowania zadania optymalizacyjnego w kolejnym rozdziale. Opracowany model jest szczegółowy, realistyczny i dobrze dostosowany do potrzeb symulacji procesów przesiadkowych w rzeczywistych warunkach funkcjonowania transportu miejskiego.

Rozdział czwarty stanowi rdzeń metodologiczny pracy i poświęcony jest sformułowaniu zadania optymalizacyjnego synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym. Autor, wychodząc od opracowanego w poprzednim rozdziale modelu węzła

i jego otoczenia, precyzuje tu założenia matematyczne, zmienne decyzyjne, ograniczenia oraz funkcję celu opisującą proces synchronizacji.

W pierwszej części rozdziału przedstawione są założenia do budowy zadania optymalizacyjnego, obejmujące m.in. dane wejściowe (rozkłady przyjazdów pociągów, odjazdów autobusów, potoki pasażerskie, odchyłki od rozkładu jazdy) oraz definicję zmiennej decyzyjnej — momentów odjazdu autobusów w kursach poszczególnych linii komunikacyjnych. Autor przyjmuje realistyczne ograniczenia dotyczące m.in. minimalnych odstępów między kursami, zachowania ciągłości ruchu, cykliczności rozkładów oraz wymogów techniczno-organizacyjnych przewoźników. Następnie szczegółowo opisuje strukturę ograniczeń i funkcję kryterium. Funkcją celu jest minimalizacja średniego czasu oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu w węźle przesiadkowym w skali doby. W modelu uwzględniono również wpływ czynników stochastycznych — takich jak odchyłki od planowanych przyjazdów i odjazdów oraz zróżnicowanie czasów przejść pieszych.

W ostatniej części rozdziału zaprezentowano jednokryterialne zadanie optymalizacyjne, w którym proces synchronizacji przedstawiono w ujęciu formalnym, umożliwiającym zastosowanie algorytmów przeszukiwania przestrzeni rozwiązań. Model jest przygotowany do implementacji w narzędziu obliczeniowym przedstawionym w kolejnym rozdziale.

W opracowanej metodzie przyjęte zostało (jako jedyne) kryterium minimalizacji średniego czasu oczekiwania pasażerów. Jest to rozwiązanie spójne z celem pracy, jednak pomija inne potencjalnie istotne kryteria, takie jak niezawodność połączeń, regularność odjazdów, koszty operacyjne lub równomierność obciążenia linii. Wielokryterialne ujęcie zwiększyłoby praktyczną wartość modelu. W rozdziale nie uwzględniono również analizy wpływu zmian danych wejściowych (np. potoków pasażerskich, odchyłek czasowych, częstotliwości kursów) na wyniki optymalizacji. Choć takie analizy pojawiają się później, już na etapie formułowania modelu warto byłoby określić jego odporność na zmiany parametrów. Można zwrócić uwagę na skromne odniesienia do innych metod optymalizacji — Autor nie omawia szerzej alternatywnych podejść (np. algorytmów genetycznych, symulowanego wyżarzania, heurystyk lokalnych), choć w dalszej części wykorzystuje *tabu search*. Krótkie porównanie potencjalnych metod mogłoby wzmocnić argumentację wyboru narzędzia. W pracy nie przedstawiono sposobu utworzenia alternatywnych rozkładów jazdy na podstawie zmiennej decyzyjnej $\overline{war}$: czy zbiór $\overline{war}_{j\alpha}$ określa się jednorazowo i jest niezmienny dla każdego uruchomienia modelu symulacyjnego?

Cały rozdział cechuje się wysokim poziomem precyzji formalnej, logicznym powiązaniem z wcześniejszymi etapami pracy oraz czytelną strukturą prowadzącą od opisu problemu do jego matematycznej postaci. Rozdział ten stanowi kluczowy element łączący część teoretyczną i obliczeniową rozprawy, tworząc solidne podstawy do konstrukcji autorskiej metody synchronizacji rozkładów jazdy.

Rozdział piąty stanowi kluczową część aplikacyjną pracy, w której Autor przedstawia opracowaną autorską metodę synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym. Na podstawie wcześniej zdefiniowanego modelu i zadania optymalizacyjnego Autor konstruuje kompletną procedurę obliczeniową służącą do wyznaczania zsynchronizowanych rozkładów jazdy, minimalizujących średni czas oczekiwania pasażerów zmieniających środek transportu.

W pierwszej części rozdziału przedstawiono ogólny schemat metody, oparty na podejściu iteracyjnym i symulacyjnym, wykorzystującym elementy przeszukiwania przestrzeni rozwiązań z użyciem algorytmu *tabu search*. Autor opisuje etapy procesu — od przygotowania danych wejściowych, poprzez generowanie zbioru rozwiązań dopuszczalnych, po oceny wpływu czynników stochastycznych (odchyłek od rozkładów jazdy i zmiennych czasów przejść pieszych). Kolejne części rozdziału prezentują pięcioetapową strukturę metody:

Etap 1 — wyznaczenie zbioru rozwiązań dopuszczalnych przy zachowaniu wszystkich ograniczeń organizacyjnych i technicznych.

Etap 2 — modelowanie wpływu czynników losowych poprzez symulację rzeczywistych warunków funkcjonowania transportu.

Etap 3 — pełne przeszukiwanie możliwych modyfikacji rozkładów w poszczególnych kierunkach jazdy.

Etap 4 — optymalizacja lokalna przy użyciu procedury *tabu search* w celu poprawienia bieżącego rozwiązania.

Etap 5 — ocena efektów synchronizacji, w tym redukcji średniego czasu oczekiwania pasażerów.

W rozdziale opisano również narzędzie obliczeniowe opracowane na potrzeby realizacji metody. Program umożliwia automatyczne przetwarzanie danych wejściowych, symulację przebiegów synchronizacji oraz wizualizację wyników w postaci rozkładów jazdy i wskaźników efektywności.

W rozdziale dostrzeżone drobne niedoskonałości niemające jednak wpływu na bardzo wysoką ocenę opracowanego podejścia. Pobieżnie omówiono pojęcie zbieżności i stabilności opracowanej metody (brakuje informacji o kryteriach zakończenia iteracji czy o warunkach zapewniających stabilność wyników). Brak analizy zbieżności może utrudniać ocenę, czy uzyskane rozwiązanie jest optymalne globalnie, czy lokalnie. Ponadto dość ogólnikowo potraktowano weryfikację parametrów wejściowych symulacji — ponieważ metoda opiera się na danych wejściowych dotyczących odchyłek, potoków pasażerskich i czasów przejść, brak informacji w jakim stopniu parametry te zostały skalibrowane lub zweryfikowane empirycznie, może mieć wpływ na wiarygodność symulacji. Brakuje nieco analizy wrażliwości — w metodzie *tabu search* efekty zależą od długości listy tabu, liczby iteracji czy sposobu generowania sąsiedztwa rozwiązań. Autor nie prezentuje, jak zmiana

tych parametrów wpływa na jakość uzyskanych wyników. Jeszcze jeden wątek wymaga doprecyzowania - funkcja celu zagadnienia optymalizacyjnego (4-19) na s. 110 w przedstawionej postaci zakłada, że do oszacowania tak naprawdę wartości oczekiwanej (*expected value*) średniego czasu oczekiwania na przesiadkę w węźle transportowym jest wykorzystywany stały zbiór pasażerów $\bar{\Pi}$. Oznacza to, że w poszczególnych symulacjach każdy z elementów zbioru $\bar{\Pi}$ będzie reprezentował tego samego pasażera o wyznaczonej motywacji podróży, celu podróży, wieku, itd. W takim układzie dla uzyskania poprawnej oceny wartości funkcji celu dodatkowo trzeba wygenerować dużą próbkę alternatywnych zbiorów $\bar{\Pi}$ dla każdego elementu $\bar{z}_s$, żeby pozbyć się ewentualnego wpływu na wyniki oceny $\bar{FC}$ specyficznych kombinacji elementów w zbiorze $\bar{\Pi}$. Czy w ramach badań eksperymentalnych wykonano takie symulacje?

Pomimo tych drobnych uwag, całość rozdziału charakteryzuje się bardzo wysokim poziomem szczegółowości, precyzją formalną i konsekwentnym powiązaniem z wcześniejszymi rozdziałami teoretycznymi. Autor w sposób logiczny i uporządkowany przedstawia kolejne etapy metody, łącząc podejście analityczne z praktyczną implementacją. Po raz kolejny potwierdza tym samym swoje ponadprzeciętne umiejętności, ogromną wiedzę i kunszt matematyczny.

Rozdział piąty stanowi rdzeń oryginalnego wkładu naukowego pracy – prezentuje w pełni autorską, zintegrowaną metodę synchronizacji rozkładów jazdy, której celem jest poprawa jakości i niezawodności transportu zbiorowego w rzeczywistych warunkach funkcjonowania węzłów przesiadkowych.

Rozdział szósty ma charakter empiryczny i weryfikacyjny – Autor przedstawia w nim proces walidacji opracowanej metody synchronizacji rozkładów jazdy na przykładzie rzeczywistych węzłów przesiadkowych zlokalizowanych w Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (GZM). Celem rozdziału jest sprawdzenie, w jakim stopniu zaproponowana metoda pozwala na poprawę funkcjonowania transportu zbiorowego w warunkach rzeczywistych.

W pierwszej części Autor prezentuje charakterystykę analizowanych węzłów, opisując ich układ komunikacyjny, strukturę połączeń, potoki pasażerskie i specyfikę przesiadek. Następnie analizuje obsługę węzłów przez linie komunikacyjne oraz parametry ruchowe, które stanowią dane wejściowe do obliczeń.

Kolejne części rozdziału opisują przebieg zastosowania metody – od wykorzystania procedury przeszukiwania lokalnego, poprzez wyznaczenie zsynchronizowanych rozkładów jazdy, aż po analizę efektów uwzględnienia odchyłek od rozkładu jazdy. Autor porównuje wyniki uzyskane z zastosowaniem swojej metody z obowiązującymi rozkładami oraz z rozwiązaniami dopuszczalnymi, wykazując wyraźne zmniejszenie średniego czasu oczekiwania pasażerów.

W ostatniej części przedstawiono analizę wpływu czynników stochastycznych na efektywność synchronizacji oraz różnice między poszczególnymi przypadkami testowymi. Wyniki potwierdzają hipotezę badawczą – uwzględnienie odchyłek od rozkładu jazdy w procesie synchronizacji prowadzi do istotnego skrócenia czasu oczekiwania i zwiększenia niezawodności przesiadek.

Z przeprowadzonej walidacji wynika, że weryfikacja metody została przeprowadzona jedynie dla kilku węzłów przesiadkowych w GZM. Choć Autor argumentuje, że są to przypadki reprezentatywne, zbyt wąska próba badawcza ogranicza możliwość pełnej generalizacji wyników. Warto byłoby choć krótko odnieść się do potencjalnej różnorodności węzłów (np. o innej strukturze lub natężeniu ruchu). Wydaje się również, że brak jest formalnej oceny istotności różnic między rozwiązaniami. Wyniki prezentują zauważalne skrócenie średniego czasu oczekiwania, lecz brakuje analizy statystycznej (np. testu istotności różnic lub analizy wariancji), która potwierdziłaby, że uzyskane efekty są nieprzypadkowe i stabilne. Brakuje nieco analizy wrażliwości – nie przedstawiono, jak zmiana podstawowych założeń (np. rozkładu odchyłek, liczby kursów czy długości okresów funkcjonowania) wpływa na końcowe rezultaty. Taka analiza wrażliwości byłaby istotna dla oceny odporności metody na zmienność danych wejściowych. W niektórych miejscach Autor opisuje zmiany czasu oczekiwania w sposób ogólny (np. „znaczne skrócenie” lub „poprawa efektywności”), bez podania dokładnych wartości procentowych lub przedziałów zmienności. Dokładniejsze przedstawienie wyników liczbowych zwiększyłoby przejrzystość analizy. Rozdział nie zawiera również informacji o jakości i wiarygodności danych źródłowych (np. punktualności pociągów, danych pasażerskich). Uwzględnienie możliwych błędów pomiarowych zwiększyłoby transparentność wyników.

Pomimo wskazanych uwag (nie umniejszają one w żadnym stopniu bardzo wysokiej oceny!), rozdział charakteryzuje się dużą starannością analityczną, logicznym układem oraz wysokim stopniem praktycznej użyteczności. Stanowi on bezpośredni dowód skuteczności i poprawności opracowanej metody, a uzyskane wyniki mają znaczenie zarówno aplikacyjne, jak i poznawcze dla planowania i optymalizacji transportu publicznego.

Rozdział siódmy ma charakter podsumowujący – Autor dokonuje w nim oceny osiągniętych rezultatów, weryfikacji tezy badawczej oraz formułuje wnioski i rekomendacje dotyczące dalszych kierunków badań.

W pierwszej części rozdziału autor przedstawia ocenę realizacji celu pracy, wskazując, że opracowana metoda synchronizacji rozkładów jazdy w węźle przesiadkowym spełniła zakładane założenia i pozwoliła na skrócenie średniego czasu oczekiwania pasażerów przy uwzględnieniu odchyłek od rozkładu jazdy. Wyniki uzyskane w rozdziale szóstym jednoznacznie potwierdzają, że uwzględnianie niepunktualności w procesie planowania rozkładów jazdy prowadzi do poprawy niezawodności i efektywności przesiadek.

Następnie Autor przeprowadza weryfikację tezy badawczej, stwierdzając, że została ona potwierdzona w pełni. Opracowany model oraz zastosowana metoda optymalizacji umożliwiają dostosowanie rozkładów jazdy autobusów miejskich do rzeczywistych warunków funkcjonowania transportu i zachowań pasażerów, przyczyniając się do wzrostu jakości usług publicznego transportu zbiorowego.

W dalszej części Autor formułuje rekomendacje praktyczne, podkreślając możliwość wykorzystania zaproponowanej metody w procesach planistycznych i zarządczych — zarówno w istniejących, jak i nowoprojektowanych węzłach przesiadkowych. Wskazuje również na potrzebę integracji narzędzia obliczeniowego z systemami planowania i monitorowania transportu miejskiego.

W rozdziale można dostrzec niewystarczające omówienie ograniczeń opracowanej metody - Autor koncentruje się na pozytywnych efektach, natomiast nie omawia szerzej jej ograniczeń – np. uproszczeń modelu, braku wielokryterialności czy wrażliwości na jakość danych wejściowych. Wskazanie takich ograniczeń byłoby dowodem krytycznego spojrzenia i podniosłoby wartość naukową podsumowania. Ponadto pomimo bardzo obszernych opisów i uzasadnień w początkowej części pracy, dostrzeżono zbyt lakoniczne przedstawienie znaczenia praktycznego uzyskanych wyników. Wprawdzie wspomniano o możliwości zastosowania metody w praktyce planistycznej, brakuje jednak konkretnego odniesienia do potencjalnych użytkowników (np. zarządów transportu, biur planowania, operatorów systemów). Krótkie wskazanie potencjalnych scenariuszy wdrożenia zwiększyłoby walor aplikacyjny wniosków.

W końcowym fragmencie rozdziału przedstawiono kierunki dalszych badań, obejmujące m.in. rozwój metody w kierunku synchronizacji wielomodalnej, zastosowanie danych czasu rzeczywistego, analizę kosztów operacyjnych oraz wykorzystanie metod uczenia maszynowego w procesie predykcji odchyłek od rozkładu jazdy. Uwagę zwracają zbyt ogólnie sformułowania odnoszące się do tych kierunków - brakuje doprecyzowania, *jaki konkretne problemy badawcze* autor zamierzałby w ich ramach rozwiązać (np. w jaki sposób dane czasu rzeczywistego miałyby zostać zintegrowane z modelem, czy jakie algorytmy ML byłyby odpowiednie do predykcji opóźnień). Brakuje nieco hierarchizacji i oceny wykonalności dla wskazanych kierunków badań – wymieniono je równorzędnie, bez wskazania priorytetów, potencjalnych trudności czy wymagań dotyczących danych. Warto byłoby dodać ocenę, które z nich są możliwe do realizacji w krótkim czasie, a które wymagają rozbudowanych badań interdyscyplinarnych. Zdaniem Recenzenta wartościowym kierunkiem badań były aspekty ekonomiczne, w szczególności ocena wpływu synchronizacji na koszty operacyjne przewoźników czy na ogólną efektywność systemu.

Całość rozdziału siódmego stanowi spójną i logiczną konkluzję rozprawy, ukazującą dojrzałość naukową autora oraz pełną realizację postawionych celów. Rozdział ten zamyka pracę w sposób klarowny, podkreślając zarówno wartość poznawczą, jak i aplikacyjną uzyskanych wyników.

2. Dobór literatury.

Dobór literatury w rozprawie doktorskiej należy ocenić jako bardzo dobry, wszechstronny i adekwatny do zakresu badań. Autor wykorzystał łącznie 269 pozycji bibliograficznych, z czego większość to publikacje zagraniczne. Świadczy to o szerokim horyzoncie badawczym i bardzo dobrym rozeznaniu w światowym dorobku naukowym. W literaturze dominują prace z zakresu organizacji i modelowania transportu publicznego, teorii przesiadek, metod optymalizacji oraz zastosowań heurystyk i symulacji w planowaniu rozkładów jazdy. Mocną stroną jest równowaga między źródłami teoretycznymi i praktycznymi, a także trafne włączenie literatury zagranicznej z uznanych czasopism naukowych, co nadaje pracy wymiar międzynarodowy. Autor prawidłowo wykorzystuje cytowania, odnosząc się do nich w kontekście argumentacji i uzasadnienia własnych wyborów metodologicznych. Pewnym ograniczeniem jest niewielki udział najnowszych publikacji (z ostatnich 2–3 lat), szczególnie w obszarze cyfryzacji i wykorzystania danych czasu rzeczywistego w planowaniu transportu, oraz brak wyraźnego wskazania najważniejszych źródeł referencyjnych stanowiących podstawę autorskiego podejścia. Mimo tych drobnych niedociągnięć, dobór literatury należy uznać za kompletny, merytorycznie trafny i w pełni uzasadniony z punktu widzenia celów i tematyki rozprawy.

3. Ocena redakcji pracy

Rozprawa doktorska została przygotowana starannie i w sposób w pełni profesjonalny pod względem redakcyjnym. Praca jest logicznie uporządkowana, ma przejrzystą strukturę i klarowny układ treści – od części wprowadzającej, poprzez część teoretyczno-metodologiczną, aż po analityczno-empiryczną i wnioski końcowe. Tekst napisany jest poprawnym, precyzyjnym językiem naukowym, a terminologia transportowa i matematyczna stosowana jest konsekwentnie. Liczne rysunki, tabele i wzory zostały wkomponowane w tekst w sposób czytelny i wspierający narrację, choć miejscami partie matematyczne są bardzo zwarte i wymagają większej przejrzystości zapisu. Zachowano spójność oznaczeń, układu odniesień oraz konsekwentny sposób cytowania literatury. Nieliczne drobne różnice w formatowaniu tabel i wykresów nie wpływają na odbiór całości. Praca jest bardzo dobrze zredagowana i dopracowana stylistycznie. Z uwagi na złożoność prowadzonych analiz język rozprawy jest miejscami – ze względu na używanie specjalistycznej terminologii – hermetyczny i zawiły, choć nigdy nie pozbawiony precyzji. Pod względem redakcyjnym praca prezentuje bardzo wysoki poziom, łącząc naukową ścisłość z dobrą komunikatywnością tekstu.

4. Ogólna ocena pracy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Adriana Barchańskiego stanowi dojrzałe, spójne i oryginalne opracowanie naukowe, łączące wysoki poziom teoretyczny z wyraźnym potencjałem aplikacyjnym. Autor w sposób twórczy podjął aktualny problem synchronizacji rozkładów jazdy w węzłach przesiadkowych, opracowując autorską metodę uwzględniającą wpływ odchyłek od rozkładu jazdy, co stanowi nowatorski wkład w rozwój badań nad organizacją transportu zbiorowego. Do mocnych stron pracy należy przemyślana koncepcja badawcza, poprawnie zbudowany model matematyczny, wysoki poziom metodyczny i empiryczna weryfikacja wyników na rzeczywistych danych GZM. Praca cechuje się spójnością logiczną, przejrzystą strukturą, wysoką kulturą językową oraz starannością redakcyjną. Osiągnięte wyniki mają znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne, a zaproponowana metoda może stanowić użyteczne narzędzie wspomagające planowanie transportu publicznego, co dowodzi dużych kompetencji badawczych i inżynierskich Autora. Recenzowana praca doktorska pomimo zgłoszonych uwag, głównie o charakterze wątpliwości bądź usterek (zapewne znaczna część z nich jest dyskusyjna), jest ambitnie zamierzoną i w pełni poprawnie zrealizowaną dysertacją.

5. Wniosek końcowy i jego uzasadnienie

Uzasadnieniem wysokiej oceny pracy są następujące jej walory:

- Autor opracował autorską metodę synchronizacji rozkładów jazdy z uwzględnieniem odchyłek od rozkładu jazdy, co stanowi istotne i oryginalne rozszerzenie dotychczasowych badań w dziedzinie organizacji transportu publicznego.
- Praca zawiera kompletny model teoretyczny, poprawnie sformułowane zadanie optymalizacyjne oraz skutecznie zaimplementowaną procedurę obliczeniową opartą na metodach heurystycznych (*tabu search*).
- Opracowana metoda została zweryfikowana empirycznie na rzeczywistych danych z węzłów przesiadkowych GZM, a uzyskane wyniki potwierdzają jej efektywność w skracaniu czasu oczekiwania pasażerów i poprawie jakości przesiadek.
- Rozprawa ma przejrzysty układ, a kolejne rozdziały tworzą logiczny ciąg od analizy problemu, przez modelowanie i optymalizację, po weryfikację i wnioski końcowe.
- Tekst napisany jest w sposób precyzyjny, klarowny i zgodny z zasadami języka naukowego, a materiał ilustracyjny (tabele, wykresy, schematy) został opracowany czytelnie i z dużą dbałością o szczegóły.
- Autor oparł swoje badania na 269 pozycjach bibliograficznych, w tym licznych publikacjach zagranicznych, co świadczy o bardzo dobrym rozeznanii w światowym dorobku naukowym.
- Tematyka pracy wpisuje się w nowoczesne kierunki rozwoju transportu publicznego: integrację systemów, mobilność multimodalną oraz zastosowanie metod sztucznej inteligencji i analizy danych w planowaniu transportu.

- Uzyskane rezultaty mają potencjał wdrożeniowy i mogą zostać wykorzystane przez jednostki planujące i zarządzające transportem miejskim, co nadaje pracy wymiar praktyczny i społeczny.
- Sposób prowadzenia analiz, konstrukcja modeli oraz formułowanie wniosków wskazują na bardzo wysoki poziom kompetencji badawczych, analitycznych i inżynierskich.
- Wielki trud badawczy, wykraczający poza zwyczajową pracochłonność prac doktorskich;

Wykazane uwagi krytyczne w żadnym stopniu nie osłabiają wysokiej oceny pracy. W podsumowaniu wniosku wyrażam opinię, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane stosownymi przepisami pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Adriana Barchańskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej w dyscyplinie Inżynieria Lądowa Geodezja i Transport.

Ponadto, wobec bardzo wysokiej merytorycznej wartości pracy, chciałbym złożyć wniosek o wyróżnienie dysertacji przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Lądowa, geodezja i transport na Politechnice Śląskiej.

prof. dr hab. inż. Andrzej Szarata