

Przewodniczący Rady Dyscypliny  
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport  
dr hab. inż. Marcin Staniek, prof. PŚ

Warszawa, 12 września 2023 roku

Dr hab. inż. Konrad Lewczuk, prof. uczelni  
Wydział Transportu, Politechnika Warszawska  
ul. Koszykowa 75,  
00-662 Warszawa,  
Konrad.Lewczuk@pw.edu.pl  
Tel. +48 22 234 74 91  
Kom. +48 502 897 670

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Mariusza Wala  
pt. **Zastosowanie wybranych algorytmów sztucznej inteligencji do poprawy efektywności procesów transportu i zbiórki odpadów komunalnych**

**Promotor** dr hab. inż. Piotr Nowakowski, prof. PŚ.

### 1 Podstawa wykonania recenzji

Recenzja opracowana została na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport (pismo nr RDILGT.512.6.2023 z dnia 30 czerwca 2023), zgodnie z Uchwałą RDILGT PŚ z dnia 29 czerwca 2023 r. oraz na podstawie dostarczonej w formie wydrukowanej rozprawy doktorskiej pt. *Zastosowanie wybranych algorytmów sztucznej inteligencji do poprawy efektywności procesów transportu i zbiórki odpadów komunalnych* – na podstawie Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Recenzja stanowi element postępowania o nadanie Panu mgr inż. Mariuszowi Wali stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria lądowa, geodezja i transport.

### 2 Ogólna charakterystyka pracy

Przedmiotem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest badanie możliwości zastosowania heurystyk w postaci algorytmu mrówkowego oraz przeszukiwania tabu do racjonalizacji procesu zbiórki odpadów komunalnych określonych typów polegającej na skróceniu dystansu i czasu realizacji zbiórki w określonych warunkach.

Temat ten został przedstawiony przez Doktoranta w formie rozprawy w języku polskim, która obejmuje:

- 133 strony tekstu zasadniczego;

- bibliografię liczącą 176 pozycji, w tym: 13 odniesień do źródeł internetowych, 160 publikacji w formie artykułów, książek i materiałów konferencyjnych (w tym 30 w języku polskim, 12 pozycji współautorskich Doktoranta) oraz rozporządzenia, dokumenty i inne źródła,
- siedem rozdziałów numerowanych, w tym 1. Wstęp i 7. Wnioski oraz spis najważniejszych oznaczeń i skrótów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisy treści, rysunków i tabel oraz literaturę.

Zasadnicza treść rozprawy zawarta jest w pięciu rozdziałach. Rozprawa ma formę książkową, a jej układ jest zgodny z przyjętą dla dysertacji formą. W rozprawie najpierw opisywane są zjawiska i okoliczności leżące u podstaw zagadnienia stanowiącego temat badań, następnie sformułowano matematyczną reprezentację zagadnienia i przeprowadzono obliczenia z wykorzystaniem oprogramowania komputerowego. Wyniki obliczeń zostały przedyskutowane i na tej podstawie sformułowano wnioski kończące rozprawę oraz kierunki dalszych badań. Rozprawa nie zawiera sformułowanego wprost przeglądu literatury/stanu wiedzy (choć w tytule rozdziału drugiego jest taka zapowiedź), ale jest on skutecznie ujawniany w kolejnych rozdziałach, wraz z przedstawianiem kolejnych elementów tematu. Zastosowane przez Doktoranta podejście jest spójne, a rozprawa jest czytelna.

W rozdziale trzecim Doktorant sformułował cel badawczy, którym jest zasadniczo opracowanie modelu zbiórki i transportu odpadów „z wykorzystaniem kilku wskaźników i mierników uwzględniających czynniki związane z ekonomią i ochroną środowiska” i cel użyteczny pracy, którym jest „badanie efektów przeprowadzonych optymalizacji w warunkach rzeczywistych”. Następnie zaproponował tezę badawczą, w której stwierdził, że „Zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji wpływa w sposób wymierny na poprawę efektywności procesów transportu i zbiórki odpadów komunalnych.”

W kolejnych rozdziałach Autor realizuje swoje zamierzenie badawcze. Układ treści rozprawy, jej podział na rozdziały i podrozdziały oraz sformułowanie celu, tezy i wniosków są ogólnie prawidłowe i logiczne oraz pozostają w zgodności z przyjętymi zasadami pisania pracy naukowej. Widoczny jest wyraźny podział na część określającą bieżący stan wiedzy w zakresie rozprawy oraz część praktyczną, w której Doktorant przedstawił wyniki badań. Badania zostały odpowiednio udokumentowane za pomocą grafik oraz tabel.

Stwierdzam zatem, że **struktura pracy odpowiada charakterowi dysertacyjnemu, a język rozprawy i dobór literatury świadczą o dobrej znajomości podjętej przez Doktoranta problematyki.**

### 3 Ocena doboru tematu

Gospodarka odpadami komunalnymi jest jednym z elementów składowych idei zrównoważonego rozwoju, a także idei gospodarki o obiegu zamkniętym, do której słusznie odnosi się Doktorant w swojej rozprawie. Jest ona również przedmiotem regulacji prawnych, które narzucają określone standardy i warunki jej realizacji. Gospodarka odpadami jest też usługą rynkową, która generuje koszty, w tym koszty ponoszone bezpośrednio przez mieszkańców, koszty ponoszone przez przedsiębiorców i koszty środowiskowe. Odpowiednia gospodarka odpadami, a w szczególności efektywne mechanizmy zbierania i przetwarzania

odpadów do postaci dóbr ponownie użytecznych są czynnikami minimalizowania negatywnego wpływu odpadów wytwarzanych przez gospodarstwa domowe na środowisko i na życie ludzi.

Zagadnienie planowania zwózki odpadów, które podjął Doktorant jest istotną składową gospodarki odpadami. Transport drogowy – ciężarowy wykorzystywany do zwózki odpadów z jednej strony powoduje zanieczyszczenie powietrza i hałas oraz zwiększa kongestię, a z drugiej strony jest predystynowany do przemieszczania odpadów z miejsc wytworzenia do miejsc przetwarzania, utylizacji i składowania ze względu na swoją elastyczność i dostępność. Dodatkowo należy zauważyć, że transport odpadów wytwarzanych przez osiedla ludzkie ma duże znaczenie dla lokalnego ruchu ciężarowego. Pojazdy zbierające odpady muszą przemieszczać się w wąskich ulicach dojazdowych, często w godzinach wyjazdu mieszkańców do pracy lub powrotu do domów, co może dodatkowo negatywnie wpływać na jakość życia i sytuację ruchową.

Odpowiednie planowanie transportu – zbiórki odpadów z obszarów osiedli ludzkich jest więc istotną potrzebą społeczności, która wymaga ekologicznych i dopasowanych rozwiązań swoich problemów bytowych, biznesu, który maksymalizuje swoje zyski i mieszkańców, którzy minimalizują swoje koszty. Optymalizacja systemów zbiórki odpadów polegająca na konstruowaniu tras dla pojazdów ciężarowych o minimalnej łącznej długości i/lub czasie realizacji z dodatkowym uwzględnieniem ograniczeń takich jak okna czasowe zbiórki, rodzaje odpadów, strategię zbiórki czy pojemność pojazdów, jest więc zadaniem istotnym.

Należy stwierdzić, że narzędzia wybrane przez Doktoranta do racjonalizacji zbiórki odpadów są odpowiednie. Chociaż przeszukiwanie tabu i algorytm mrówkowy nie są narzędziami nowymi, to dobrze sprawdzają się one w zakresie rozwiązywania problemów klasy VRP. Ze względu na dobre rozpoznanie tych narzędzi oraz ich względną sprawność obliczeniową mogą one zostać szeroko wykorzystane w praktycznych zastosowaniach. Istotna pozostaje w tym przypadku jakość wdrożeń wybranych heurystyk w praktyce, do poprawy której mogą przyczynić się badania prowadzone przez Doktoranta. Ponieważ optymalizacja tras zbiórki opiera się na analizie danych, możliwy jest wgląd w schematy zbierania odpadów. Władze lokalne mogą wykorzystywać te dane do podejmowania świadomych decyzji dotyczących dostosowania usług i planowania na przyszłość.

Podsumowując, optymalizacja tras jest niezbędna w przypadku zbiórki odpadów komunalnych, ponieważ poprawia wydajność, zmniejsza koszty, minimalizuje negatywny wpływ na środowisko, zwiększa niezawodność usług i przyczynia się do ogólnej efektywnej gospodarki odpadami na obszarach miejskich.

Biorąc pod uwagę wyżej wymienione czynniki, a także powstałe do tej pory opracowania w tym temacie stwierdzam, że **podjęte przez Doktoranta zagadnienie ma potencjał badawczy i jest dysertabilne**. Ponieważ przedstawione w rozprawie badania mają wysoki potencjał aplikacyjny, stwierdzam, że realizacja tematu stanowi **przykład dobrze rozumianych badań stosowanych**. Badania te zostały przedstawione przez Doktoranta w kolejnych rozdziałach pracy.

#### 4 Analiza treści rozprawy

Praca rozpoczyna się od *Wstępu*, w którym nakreślono ogólne tło dla prowadzonych badań.

Rozdział **drugi**, pt. *Zbiórka, transport i zagospodarowanie odpadów w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym – przegląd literatury* skupia się w dużej części na idei gospodarki i obiegu zamkniętym (GOZ) i sposobie jej wdrażania, także w Polsce. Doktorant przedstawia szeroko problematykę gospodarowania odpadami, w tym sposoby segregacji i przetwarzania odpadów oraz czynniki oddziaływania na środowisko transportu odpadów z gospodarstw domowych w procesie ich zbierania takie jak emisja szkodliwych składników spalin i hałas. Omówił także kwestię narzędzi wspomagania planowania zbiórki odpadów klasyfikując to zagadnienie w obrębie problematyki VRP oraz wskazując na wykorzystywane dotychczas rozwiązania (algorytmy) opisane w literaturze przedmiotu. W ramach przeglądu literatury Doktorant dokonał rozdzielenia na literaturę polską i zagraniczną oraz przedstawił swoje własne badania dotyczące przedmiotu pracy.

Rozdział **trzeci** został poświęcony omówieniu celu badawczego i utylitarnego, tezy badawczej i zakresu pracy i jest on pewnego rodzaju podsumowaniem ustaleń z rozdziału drugiego.

W rozdziale **czwartym** pt. *Charakterystyka zbiórek odpadów w oparciu o prawodawstwo Unii Europejskiej oraz Ustawy o odpadach* Doktorant opisał podstawowe akty prawne regulujące kwestię zbiórki odpadów, przedstawił podział odpadów na kategorie, omówił metody zbierania odpadów, etapy zbiórki i ogólne parametry systemu gospodarki odpadami.

Rozdział **piąty** pt. *Założenia modelowe optymalizacji zbiórki i transportu odpadów z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji* rozpoczyna się od schematu realizacji części obliczeniowej badania. W części 5.1. Doktorant sformułował wybrane wskaźniki efektywności zbiórki odpadów i mierniki oddziaływania na środowisko (efektywności ekonomicznej, masy zebranych odpadów na jednostkę odległości / czasu, emisji CO<sub>2</sub> / tlenków azotu / pyłu zawieszonego). Sformułowanie mierników można uznać za osiągnięcie naukowe. Następnie omówił model sieci transportowej, wybrane ograniczenia zadania optymalizacyjnego i funkcje kryterium (sformułowanie matematyczne problemu) oraz algorytmy: przeszukiwania tabu i mrówkowy wykorzystane w rozwiązaniu zadania optymalizacji zbiórki odpadów. Przedstawił także (choć bardzo pobieżnie) aplikację „System SZO” wykorzystaną do obliczeń.

Rozdział **szósty** pt. *Planowanie zbiórki i transportu odpadów – studium przypadku dla gmin województwa śląskiego* poświęcony został omówieniu obszarów, na których prowadzone są zbiórki będące przedmiotem badań, parametrów pojazdów oraz opisowi i charakterystyce tras, które będą poddawane racjonalizacji (określane w rozprawie jako próba reprezentatywna). Poczynając od rozdziału 6.6. Doktorant przedstawił wyniki optymalizacji tras z wykorzystaniem algorytmów przeszukiwania tabu i mrówkowego dla wybranych tras. Za istotne należy uznać wyniki realizacji tras poddawanych optymalizacji przez kierowców w warunkach rzeczywistych. W rozdziale szóstym podano wyznaczone wartości mierników i wskaźników proponowanych w rozdziale piątym.

Rozdział **siódmy** pt. *Wnioski* jest syntetycznym podsumowaniem uzyskanych wyników i ich podstaw teoretycznych. Wnioski końcowe sformułowane w rozdziale punktuja najważniejsze osiągnięcia i ustalenia Doktoranta. Rozdział kończy się nakreśleniem planu dalszych prac badawczych.

## 5 Ocena merytoryczna rozprawy i jej celu

Zamierzenia Autora sformułowane w postaci głównego celu rozprawy – „*zwiększenie efektywności ekonomicznej zbiórki i transportu odpadów*” wymagałoby przeprowadzenia badań rynku wychodzących poza zakres rozprawy, jednakże zamierzenia sformułowane w postaci celów badawczego i użytecznego można uznać za zrealizowane. U podstaw opracowania rozprawy leżą publikacje współautorskie Autora, który dążył w nich do poszerzenia swojego aparatu badawczego.

Cele rozprawy doktorskiej obejmowały realizację następujących zadań cząstkowych:

- opracowanie modelu zbiórki i transportu odpadów z gospodarstw domowych z uwzględnieniem czynników związanych z ekonomią i ochroną środowiska,
- wykorzystanie wybranych algorytmów sztucznej inteligencji do optymalizacji zbiórki,
- porównanie mierników masy zebranych odpadów oraz emisji w trakcie transportu z wartościami uzyskanymi w trakcie realizacji zadań transportowych przed optymalizacją,
- zbadanie efektów przeprowadzonych optymalizacji w warunkach rzeczywistych.

Tak postawiony cel można uznać za poprawny i spójny. Nakreśla on obszar badań Doktoranta oraz wskazuje zaplanowane do osiągnięcia wyniki teoretyczne i użyteczne. Teza badawcza sformułowana w rozdziale trzecim została udowodniona, a zaplanowany zakres prac zrealizowany.

O oryginalności badań Doktoranta stanowią następujące elementy:

- Opracowanie modelu matematycznego zbiórki i transportu odpadów uwzględniającego wskaźnik efektywności ekonomicznej, mierniki masy zebranych odpadów oraz mierniki oddziaływania na środowisko.
- Zastosowanie algorytmów przeszukiwania tabu i mrówkowego w celu uzyskania wymiernych efektów w postaci poprawy efektywności transportu i zbiórki odpadów.
- Weryfikacja w rzeczywistym systemie transportowym uzyskanych wyników potwierdzająca poprawność założeń metody.

Rozdziały od czwartego (częściowo) do szóstego należy uznać za oryginalne osiągnięcie naukowe Doktoranta. Plan i realizacja prac badawczych wystawiają Autorowi rozprawy pozytywną ocenę w dziedzinie modelowania i optymalizacji systemów transportowych.

Rozprawa napisana została poprawnym językiem. Układ treści opiniowanej rozprawy jest w swoim założeniu logiczny, struktura poszczególnych ogólnie poprawna i komunikatywna. Pewne zastrzeżenia w tym zakresie sformułowano w punkcie 6. recenzji.

Reasumując, stwierdzam, że zarówno **teoretyczny jak i praktyczny cel rozprawy** został osiągnięty, a moja **ocena merytoryczna rozprawy jest pozytywna**.

## 6 Uwagi do rozprawy i pytania

Sformułowane poniżej uwagi i pytania nie wpływają w sposób zasadniczy na ocenę merytoryczną, ale porządkują niektóre elementy rozprawy oraz ukierunkowują przyszłe prace Doktoranta.

*Uwagi ogólne:*

1. W rozprawie występują dość liczne błędy edycyjne, interpunkcyjne i stylistyczne (np. *w ramach pracy opracowany zamiast opracowano* – s. 4., *w modelu liniowym zamiast liniowym* – s. 9, *dotyczy to zarówno odpady resztkowe oraz tworzywa* – s. 14, *generowane jest wiele zanieczyszczeń oraz wpływa on...* – s. 15, zdanie: *Obszar, w którym prowadzono badania oraz zakres uzyskanej poprawy założonych parametrów zbiórki*. nie jest umocowane w tekście – s. 25, *do zbiórki z mając na uwadze* – s. 31, *badanych z zbiórek odpadów* – s. 32, *dla jednego ładowaniu akumulatora* – s. 32, *opracowanie modelu zbiórki odpadów pod kątem*, [zdanie urwane] – s. 37, *wykorzystanie algorytmu sztucznej inteligencji* – s. 37, *na częstość uzależnioną pory roku* – s. 39, *uczestników system począwszy od* – s. 39, *W wspólnych punktach* – s. 40, *urządzenie (...), które zagęszczają* – s. 41, *określona ilość zamiast określoną ilość* – s. 41, *wpływu na środowisko naturalnego* – s. 48, *w puncie* – s. 51, *zmiennie decyzyjne określającą przebywanie* – s. 56, *na zabudowie wielorodzinnej* – s. 69, *z funkcją kompaktująca* – s. 70, *m3 zamiast m<sup>3</sup>* – s. 72, *zależna od liczby punktów odbioru i ilością odpadów* – s. 77, *zarządzających zbiórka* – s. 86, *CO2* – s. 119). Ze względu na pomijalny wpływ tych błędów na wartość merytoryczną rozprawy jedynie wskazuję na konieczność uważnej korekty redakcyjnej opracowań Doktoranta w przyszłości.
2. W rozprawie zastosowano tzw. teksty wiszące pomiędzy nagłówkami 2. i 2.1., 4. i 4.1, 5. i 5.1, 6. i 6.1, co do których trudno jest określić przynależność do rozdziałów. W niektórych przypadkach teksty te są obszerne.
3. Treści w rozprawie nie są podzielone równomiernie pomiędzy rozdziały. Rozdział 5. ma dwa podrozdziały, a rozdział 6. już dziesięć. Rozprawa zyskałaby na czytelności, gdyby treść została podzielona dodatkowo na rozdziały trzeciego poziomu, np. rozdział 5.1 w części dotyczącej modelu matematycznego i częściach dotyczących obu heurystyk, a treści odpowiednio do nich przypisane.
4. W tabelach 6.7 – 6.14 w wierszach podsumowujących zastosowano wartość pod pierwiastkiem kwadratowym jako odchylenie standardowe, co może być mylące przy odczycie wartości finalnej.

*Uwagi i pytania szczegółowe:*

5. Ustalenia przedstawiane w rozdziale 1. *Wstęp* nie są kluczowe dla tematu rozprawy. Podobnie omawiane w rozdziale 1. i w innych rozdziałach (np. tekst pomiędzy nagłówkiem 2 i 2.1) pojęcie Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ). GOZ jest pojęciem niewątpliwie związanym z tematem rozprawy i tworzącym ramy dla budowy systemów przetwarzania odpadów, ale nie wydaje się być bezpośrednim czynnikiem wymuszającym optymalizację procesów transportowych firm zajmujących się zbiórką odpadów. Czynnikiem takim jest rachunek ekonomiczny przedsiębiorstwa wynikający ze sposobu wykorzystania floty samochodowej i niezawodność usług. Podobnie ma się rzecz z systemem gospodarowania odpadami komunalnymi, który jest omawiany m.in. w rozdziale 2.1. Wydaje się, że procesy sortowania i przetwarzania odpadów, jakkolwiek stanowiące istotny fragment całego procesu technologicznego, nie są kluczowe dla głównego problemu badawczego.
6. Na s. 15 Doktorant stwierdza, że „*zbiórka odpadów wymaga wykorzystania pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi*”. W innym miejscu rozprawy oczywiście podaje,

że można wykorzystywać do tego także pojazdy elektryczne, jednakże nasuwa to pytanie – czy proponowana metodyka może być wykorzystana w przypadku floty pojazdów elektrycznych? Jeżeli tak, to jakie należałoby wprowadzić do niej modyfikacje i ograniczenia?

7. Doktorant dotyka kwestii emisji szkodliwych składników spalin w wielu miejscach rozprawy (np. rozdział 2.2.). Jednocześnie formułuje zależności o charakterze liniowym łączące spalanie i emisję z pokonywanym dystansem na co wskazują tabele 6.24 – 6.26. Uśredniona zmiana emisji CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i PM podana w tabelach 6.24 – 6.26 (ostatnie kolumny) jest taka sama dla każdego z wymienionych związków w kolejnych trasach, co oznacza, że jest proporcjonalna do skrócenia drogi. Czy nie należałoby rozważyć także innych elementów wchodzących w skład cyklu roboczego, o którym pisze na s. 18, takich jak postoje z włączonym silnikiem, prędkość jazdy na poszczególnych odcinkach itd.? W jaki sposób oszacowano emisję spalin na etapie obliczeń (Doktorant deklaruje wykorzystanie HBEFA)?
8. Przegląd literatury, którego fragmenty są rozmieszczone w różnych miejscach w rozprawie (np. w rozdziałach 2.4. i 2.5.) zyskałby znacznie na podziale rozważanej literatury na podkategorie i osobne omawianie tych zagadnień. Dodatkowo nie wskazano jasno czym różni się sposób wykorzystania algorytmu mrówkowego i przeszukiwania tabu przez Doktoranta od innych przypadków implementacji tych algorytmów? Czy metody sztucznej inteligencji stosowane w innych obszarach planowania transportu mogą być przydatne w zagadnieniu zbiórki odpadów?
9. Na s. 34 Doktorant wskazuje na przeprowadzenie ankiety przedsiębiorstw, jednakże nie podaje szczegółów dotyczących liczności próby, pytań ankietowych i odpowiedzi.
10. W toku rozprawy Doktorant często zamiennie używa pojęć „miernik” i „wskaźnik”. Jaka jest interpretacja tych pojęć?
11. W tytule podrozdziału 4.3 zawarto pojęcie „Wspomaganie wymiarowania”, tymczasem brak jest odniesienia się do tego w tekście podrozdziału.
12. Na s. 48 i kolejnych (rozdział 6.3.) Doktorant podaje, że wybrano próbę reprezentatywną charakteryzującą populację wszystkich zbiórek dokonywanych w obszarze. Co oznacza, że próbą ta jest reprezentatywna?
13. Na s. 49, a następnie na s. 62 podano, że obliczenia zostały wykonane z wykorzystaniem oprogramowania pn. *System SZO*, jednakże nie omówiono dostatecznie tego narzędzia; zakresu parametryzacji, sposobu wykorzystania, walidacji itd. Czy narzędzie to umożliwia szacowanie emisji szkodliwych składników spalin?
14. Model matematyczny, którego elementy podawane są począwszy od s. 50 nie jest spójny w kwestii oznaczeń i indeksacji oraz pojęciowej. Nie wyprowadzono struktury formalnej oznaczeń. **Indeksy  $i$ ,  $k$ ,  $r$ ,  $v$  i inne są traktowane bardzo swobodnie** oznaczając zupełnie inne pojęcia w kolejnych wzorach. We wzorze (7)  $G$  oznacza graf struktury, zaś we wzorze (8) oznacza już zbiór wierzchołków tego grafu. Część zbiorów zdefiniowano wprost (np.  $N(s)$ ), część zaś wprowadzono pośrednio przez podanie ich elementów. Podobnie parametry modelu są umieszczane bezpośrednio w formułach (np.  $q_i$  i  $Q^v$  we wzorze (17)) bez zdefiniowania ich wartości i granic. Część indeksów i parametrów modelu nie została zdefiniowana, a w wybranych wzorach (np. (3)) podane w wyjaśnieniu symbole są inne niż we wzorze. Liczności zbiorów, ich

oznaczenia i indeksacje podawane są z wykorzystaniem kilku różnych konwencji. Zmienna  $m^y_{ij}$  nie została wykorzystana, ale we wzorze (12) wprost minimalizuje się sumę tych zmiennych bez określenia warunków ograniczających. W wybranych wzorach (np. (15)) brakuje kwantyfikatorów lub pojawiają się nieuprawnione znaki (np. „=” we wzorze (16)). We wzorze (20) wprowadzono pojęcie wektora rozwiązań, ale nie zdefiniowano jego kształtu. **Wskazane nieścisłości modelu utrudniają jego zrozumienie i przyswojenie, jednakże nie uniemożliwiają stwierdzenia ogólnej poprawności jego założeń.**

15. Doktorant w wielu miejscach w modelu używa pojęcia „funkcja kryterium” lub „funkcja celu” ale faktycznie nie są to funkcje zadania optymalizacyjnego omawianego w rozprawie. Postać ostateczna funkcji celu podana została we wzorze (22), chociaż w sposób niejawny. W weryfikacji obliczeniowej nie podano wszystkich parametrów wymienianych w rozwinięciach funkcji celu (22).
16. Doktorant nie omówił parametrów algorytmu mrówkowego i przeszukiwania tabu, które zastosował do obliczeń, a przy weryfikacji obliczeniowej nie przedstawiono wprost zbioru danych. Są one ujawniane stopniowo wraz z lekturą rozprawy, jednakże korzystne byłoby zdefiniowanie danych zagadnienia wraz z definicją parametrów kontrolnych obu porównywanych heurystyk na początku.
17. Czy skrócenie dystansów w drodze optymalizacji przełożyło się na stopień wykorzystania pojemności pojazdów? Można domniemać, że nie była ona ograniczeniem istotnym w rozważanych przypadkach, ale czy w konfrontacji z liczbą wykorzystanych pojazdów może mieć znaczenie decydujące?

Przedstawione powyżej uwagi i pytania mają charakter wyłącznie dyskusyjny i nie rzutują znacząco na jakość osiągnięcia naukowego Pana mgra inż. Mariusza Wala.

## 7 Ocena metod stosowanych oraz samodzielności rozwiązania zagadnienia

Samodzielność rozwiązania zagadnienia przedstawionego w rozprawie nie budzi zastrzeżeń. Doktorant na podstawie analizy literatury oraz własnych badań wybrał odpowiedni aparat badawczy umożliwiający sformułowanie problemu oraz jego rozwiązanie. Zastosowane metody świadczą o umiejętności Doktoranta do samodzielnego rozwiązywania rzeczywistych problemów badawczych związanych z modelowaniem procesów transportowych.

Przedstawione metody obliczeniowe oraz metody analizy wyników i syntezy uzyskanej wiedzy do postaci użytecznych zależności są w ogólności **prawidłowe i prowadzą do oczekiwanego wyniku** – opracowania modelu zbiórki i transportu odpadów z gospodarstw domowych.

Przeprowadzone eksperymenty obliczeniowe, opracowana metodyka oraz umiejętność formułowania i rozwiązywania problemów, jak również korzystania z techniki komputerowej, pozwalają na stwierdzenie o dobrym opanowaniu wiedzy w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie naukowej **Inżynieria lądowa, geodezja i transport.**



## 8 Podsumowanie i konkluzja oceny rozprawy doktorskiej

Przeprowadzona analiza rozprawy doktorskiej uzasadnia opinię, że stanowi ona oryginalny i znaczący wkład w badania nad modelowaniem procesów zbiórki odpadów z wykorzystaniem transportu samochodowego.

Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że rozprawa Pana mgr. inż. Mariusza Wala pt. *Zastosowanie wybranych algorytmów sztucznej inteligencji do poprawy efektywności procesów transportu i zbiórki odpadów komunalnych* prezentuje wymaganą ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie Inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz dowodzi umiejętności prowadzenia badań naukowych. Rozprawa przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, tym samym spełnia wymagania przewidziane Ustawie z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) w brzmieniu po wejściu ustawy z dnia 23 czerwca 2016 roku o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym oraz niektórych innych ustaw.

Stawiam wniosek o przyjęcie opracowania przedstawionego do recenzji jako rozprawy na stopień doktora nauk w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie naukowej Inżynieria lądowa, geodezja i transport i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*dr hab. inż. Konrad Lewczuk, prof. PW*

