



Politechnika
Śląska

DYSCYPLINA NAUKOWA
INŻYNIERIA LĄDOWA,
GEODEZJA I TRANSPORT

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Mariusz Wala

**Zastosowanie wybranych algorytmów sztucznej inteligencji
do poprawy efektywności procesów transportu i zbiórki
odpadów komunalnych**

Application of selected artificial intelligence algorithms to
improve the efficiency of transport and collection
of municipal solid waste

Promotor:

dr hab. inż. Piotr Nowakowski, prof. Politechniki Śląskiej

GLIWICE 2023

Spis treści

| | |
|---|-----|
| 1. Wstęp | 6 |
| 2. Zbiórka, transport i zagospodarowanie odpadów w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym – przegląd literatury | 11 |
| 2.1. Holistyczne ujęcie wykorzystania zasobów i potencjał ich ponownego wykorzystania..... | 12 |
| 2.2. Wybrane czynniki oddziaływania na środowisko przy transporcie i zbiórce odpadów z gospodarstw domowych..... | 15 |
| 2.3. Interdyscyplinarny zakres wymagań prowadzenia zbiórek i transportu odpadów komunalnych..... | 18 |
| 2.4. Wspomaganie zbiórki i transportu odpadów z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji..... | 21 |
| 2.5. Badania własne przygotowawcze do realizacji pracy doktorskiej..... | 29 |
| 3. Cel badawczy, cel użyteczny, teza i zakres pracy | 36 |
| 4. Charakterystyka zbiórek odpadów w oparciu o prawodawstwo Unii Europejskiej oraz Ustawy o odpadach | 38 |
| 4.1. Podział i kategorie odpadów komunalnych oraz metody ich zbierania..... | 40 |
| 4.2. Zbiórka, transport i zagospodarowanie odpadów z gospodarstw domowych – kluczowe ogniwa łańcucha logistyki zwrotnej..... | 42 |
| 4.3. Wspomaganie wymiarowania i parametryzacji systemów zbiórki odpadów komunalnych..... | 45 |
| 5. Założenia modelowe optymalizacji zbiórki i transportu odpadów z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji | 47 |
| 5.1. Wyznaczanie wskaźników efektywności zbiórki odpadów oraz mierników oddziaływania na środowisko naturalne..... | 49 |
| 5.2. Model sieci transportowej i algorytmy sztucznej inteligencji wykorzystane w rozwiązaniu zadania optymalizacji zbiórki odpadów..... | 54 |
| 6. Planowanie zbiórki i transportu odpadów – studium przypadku dla gmin województwa śląskiego | 63 |
| 6.1. Obszar prowadzonych badań zbiórek odpadów..... | 63 |
| 6.2. Parametry eksploatacyjne i ekonomiczne środków transportu wykorzystywanych w zbiorce odpadów..... | 69 |
| 6.3. Wybór próby reprezentatywnej tras zbiórki w badanym obszarze..... | 71 |
| 6.4. Opracowanie statystyczne wyników dla próby reprezentatywnej zbioru tras zbiórki odpadów..... | 74 |
| 6.5. Wyniki badań czasu i długości tras przed optymalizacją dla wybranych gmin w województwie śląskim..... | 80 |
| 6.6. Wyniki optymalizacji tras z wykorzystaniem algorytmów przeszukiwania tabu i mrówkowego..... | 86 |
| 6.7. Zestawienie porównawcze długości i czasu zrealizowanych tras przed i po optymalizacji..... | 97 |
| 6.8. Wyniki realizacji tras przez kierowców w warunkach rzeczywistych po optymalizacji..... | 101 |
| 6.9. Wyniki badań efektywności ekonomicznej i wskaźników masy zebranych odpadów przed i po optymalizacji..... | 106 |
| 6.10. Wyniki badań poziomów emisji przed i po optymalizacji dla zrealizowanych tras zbiórki..... | 112 |
| 7. Wnioski | 119 |
| Spis literatury..... | 121 |
| Spis rysunków..... | 131 |
| Spis tablic..... | 133 |

Najważniejsze oznaczenia i skróty stosowane w pracy

| <u>Skrót</u> | <u>Wyjaśnienie</u> |
|-----------------|---|
| CO | tlenek węgla |
| CO ₂ | dwutlenek węgla |
| DMC | dopuszczalna masa całkowita |
| GIS | (ang. Geographic Information System) system informacji geograficznej |
| GOZ | gospodarka o obiegu zamkniętym |
| GPS | (ang. Global Positioning System) globalny system pozycjonowania |
| HDS | samochody ciężarowe z dźwigiem hydraulicznym |
| IoT | (ang. Internet of Things) - Inernet rzeczy |
| NMHC | węglowodory nie metanowe |
| NO _x | tlenki azotu |
| PKB | przychód krajowy brutto |
| PM | pył zawieszony |
| PRP | (ang. Pollution Routing Problem) rowinięcie problemu marszrutyzacji uwzględniające emisje spalin |
| PSO | (ang. Particle Swarm Optimization) optymalizacja za pomocą roju cząstek |
| PSZOK | punkt selektywnej zbiórki odpadów komunalnych |
| SZO | system zbiórki odpadów |
| THC | węglowodory całkowite |
| UE | Unia Europejska |
| VRP | (ang. Vehicle Routing Problem) problem marszrutyzacji |
| WCRP | (ang. Waste Collection Routing Problem) rozwinięcie problemu marszrutyzacji o zbiórkę odpadów |

Streszczenie

Rosnące koszty wydobycia surowców naturalnych oraz negatywny wpływ ich pozyskania na środowisko naturalne wpłynęły na wprowadzenie modelu gospodarki o obiegu zamkniętym. Główne założenia tej koncepcji przyjmują, że obieg surowców odbywa się w zamkniętej pętli. Bardzo ważnym elementem GOZ jest również problematyka transportu i zbiórki odpadów. Dokonany przegląd literatury zarówno światowej jak i krajowej potwierdza ważność podnoszonej w niniejszej dysertacji problematyki związanej z optymalizacją procesów transportu i zbiórki odpadów. W ramach pracy opracowany model matematyczny zbiórek i transportu odpadów opisany przez wskaźnik efektywności ekonomicznej oraz mierniki masy zebranych odpadów i mierniki emisji – jako czynniki oddziaływania na środowisko naturalne. W pracy zastosowano algorytmy sztucznej inteligencji – przeszukiwania tabu oraz mrówkowy do optymalizacji tras pojazdów uczestniczących w zbiórkach. Studium przypadku oraz dane do modelu były pobrane ze zbiórek odpadów segregowanych – tworzyw sztucznych i wielkogabarytowych odbywających się w gminach miejskich i wiejskich województwa śląskiego. Do badań wybrano 18 tras zbiórki odpadów - 7 tras zbiórki odpadów z tworzyw sztucznych realizowanych na terenie zabudowy wielorodzinnej zwartej, oraz 11 tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych realizowanych na terenie rozproszonej zabudowy jednorodzinnej. Wyznaczono mierniki ekonomiczne (miernik masy zebranych odpadów, efektywność ekonomiczną zbiórki) oraz mierniki oddziaływania na środowisko (miernik emisji NO_x, PM, CO₂).

Wybrane trasy zrealizowano ponownie w oparciu o zoptymalizowany plan trasy wyznaczony wg algorytmu mrówkowego. Dzięki zastosowaniu algorytmów sztucznej inteligencji – przeszukiwania tabu i mrówkowego uzyskano wymierne efekty poprawy efektywności transportu i zbiórki odpadów. Dla odpadów tworzyw sztucznych i odpadów wielkogabarytowych znacząco ograniczono czas przejazdu i długość tras, które wyniosły od 11-21% dla czasu wykonywanych tras oraz od 21-22% dla długości wykonywanych tras. W wyniku realizacji tras rzeczywistych na podstawie zoptymalizowanych planów sekwencji punktów odbioru odpadów uzyskano bardzo zbliżone wyniki do wyznaczonych modelowo parametrów tras z zastosowaniem algorytmów sztucznej inteligencji. Wyniki badań poprawy efektywności transportu i zbiórki odpadów z gospodarstw domowych, a także opracowany model i metoda obliczeniowa mogą zostać wykorzystane w przedsiębiorstwach transportowych.

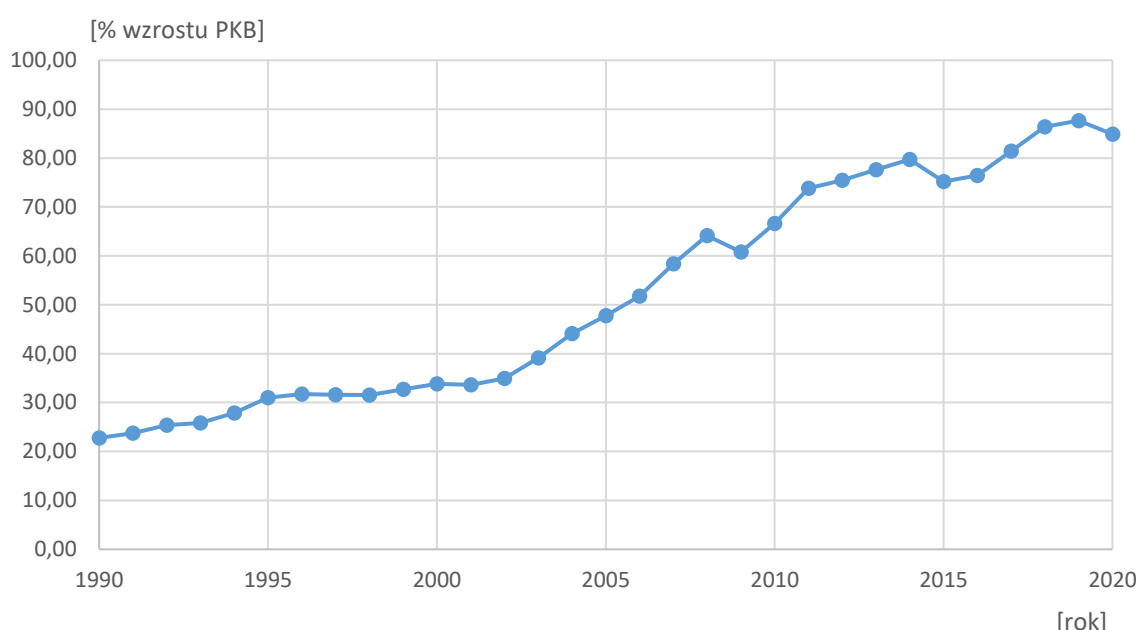
Summary

The growing costs of extracting natural resources and the negative impact of their acquisition on the natural environment have introduced the model of the circular economy. The main assumptions of this concept assume that the circulation of raw materials takes place in a closed loop. A crucial element of the circular economy is also the issue of transport and waste collection. A review of the world literature was made and national confirms the importance of the issues raised in this dissertation concerning the optimization of transport and waste collection processes. As part of the work, a mathematical model of waste collection and transport was developed, described by the economic efficiency index and mass meters of collected waste and emissions - as factors affecting the natural environment. The work uses artificial intelligence algorithms - taboo search and ant search to optimize the routes of vehicles participating in collections. The case study and data for the model were taken from collections of segregated waste – plastics and large-scale events in urban and rural communes of the Silesian Voivodeship. Eighteen waste collection routes were selected for the study - seven plastic waste collection routes implemented in the area of compact multi-family housing, and eleven large-size waste collection routes implemented in the area of dispersed single-family housing. Economic measures (measure of mass of collected waste, economic efficiency of collection) and measures of environmental impact (NO_x , PM, CO_2 emission factors) were determined.

Selected routes were re-executed based on an optimized route plan determined according to the ant algorithm. Thanks to the use of artificial intelligence algorithms - tabu and ant search, measurable effects of improving the efficiency of transport and waste collection have been achieved. For plastic waste and bulky waste, the travel time and the length of routes were significantly reduced, ranging from 11-21% for the time of the routes and from 21-22% for the length of the routes. As a result of implementing real routes based on optimized plans for the sequence of waste collection points, very similar results were obtained to model-defined route parameters using artificial intelligence algorithms. Results of research to improve the efficiency of transport and waste collection from households, as well as the developed model and calculation method can be used in transport companies.

1. Wstęp

W wielu krajach na całym świecie w ostatnich trzydziestu latach nastąpił wzrost gospodarczy. Konsekwentnie wzrastają również: konsumpcja dóbr, dochód narodowy i produkcja, które składają się na realną wartość przychodu krajowego brutto (PKB) per capita lub globalnie. Wzrost gospodarczy jest największy w krajach rozwijających się i zarazem gęsto zaludnionych. Przykładem takich państw są Chiny, w których wzrost w latach 2015 - 2017 szacowano na ponad 6,5% rocznie, w Indiach na około 7%, a w Indonezji na 5% rocznie [1].

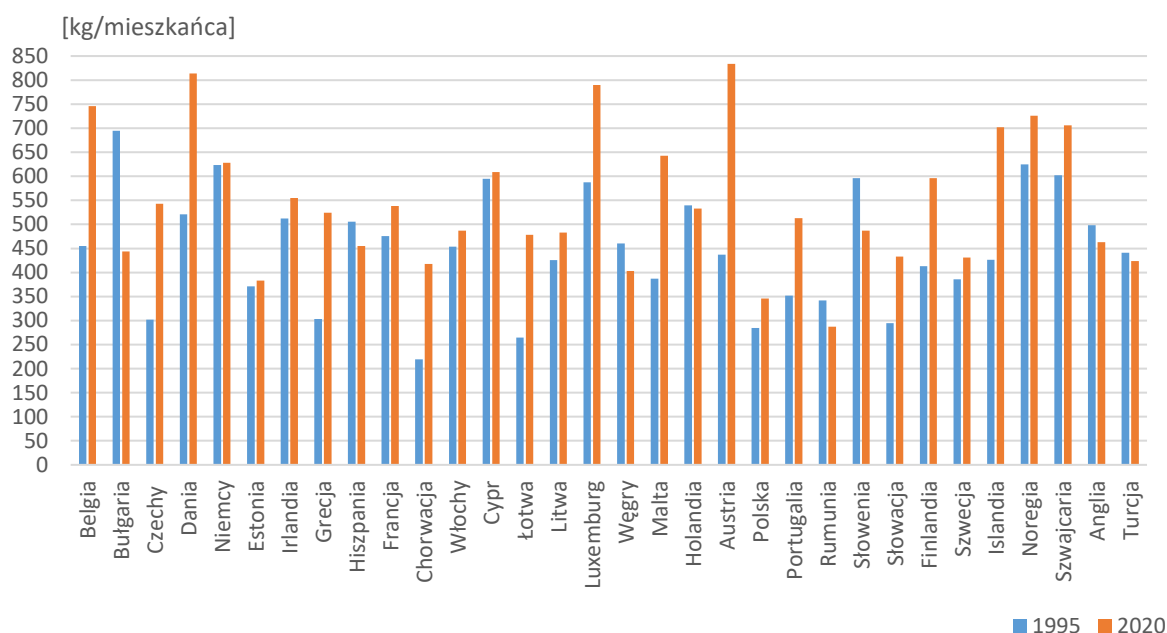


Rys. 1.1. Zmiany wartości produktu krajowego brutto w skali globalnej w latach 1990-2020 (opracowanie własne na podstawie [1])

W latach 1990 - 2020 wzrost PKB osiągnął poziom 22,78 miliarda USD w 1990 r. do 84,91 miliarda USD w 2020 r. [2]. Dane szczegółowe wzrostu PKB zaprezentowano na rysunku 1.1. Z danych Banku Światowego wynika, że do 2000 roku wartość produktu krajowego brutto w skali globalnej utrzymywała się na stabilnym poziomie, natomiast po 2000 r. nastąpił gwałtowny wzrost do poziomu ponad dwukrotnie wyższego w porównaniu do 1990 r.

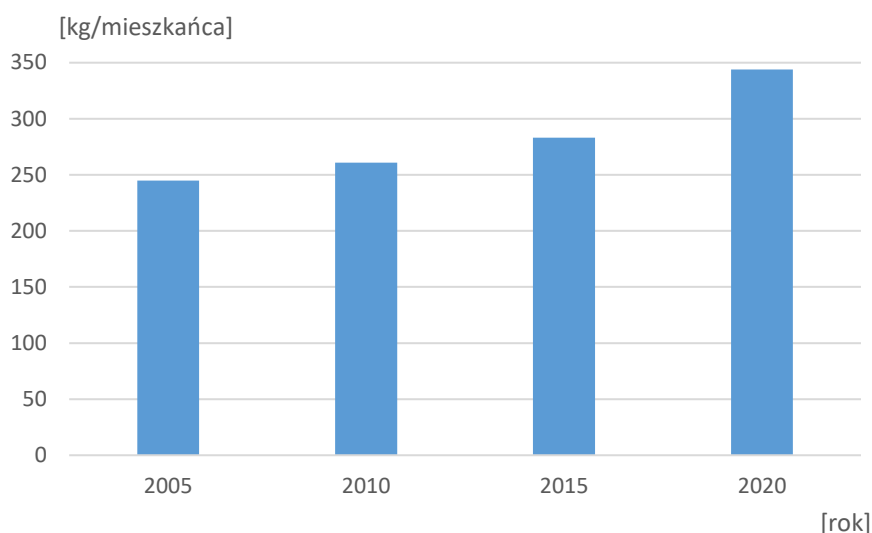
Siła nabywcza mieszkańców oraz wzrost liczby ludności są równocześnie głównymi czynnikami powodującymi wzrost ilości wytwarzanych odpadów. Globalny strumień odpadów szacowany jest na około 1,3 miliarda ton rocznie. Prognozy wzrostu

wskazują, że ilość wytwarzanych odpadów komunalnych może osiągnąć w 2025 r. wartość około 2,2 miliarda ton [1]. W Unii Europejskiej (UE) wzrost masy zebranych odpadów na mieszkańca w latach 1995 – 2020 kształtował się na poziomie ok. 8,2% [3]. Największy wzrost ilości wytwarzanych odpadów na mieszkańca w stosunku do roku 1995 odnotowano w takich krajach jak Belgia, Dania, Austria, Islandia, Chorwacja natomiast najmniejszy w takich jak: Niemcy, Estonia, Polska i Szwecja. Zmiany ilości wytwarzanych odpadów w poszczególnych krajach członkowskich UE przedstawiono na rysunku 1.2.



Rys. 1.2. Porównanie ilości wytworzonych odpadów komunalnych na mieszkańca w roku 1995 oraz 2020 (opracowanie własne na podstawie [2])

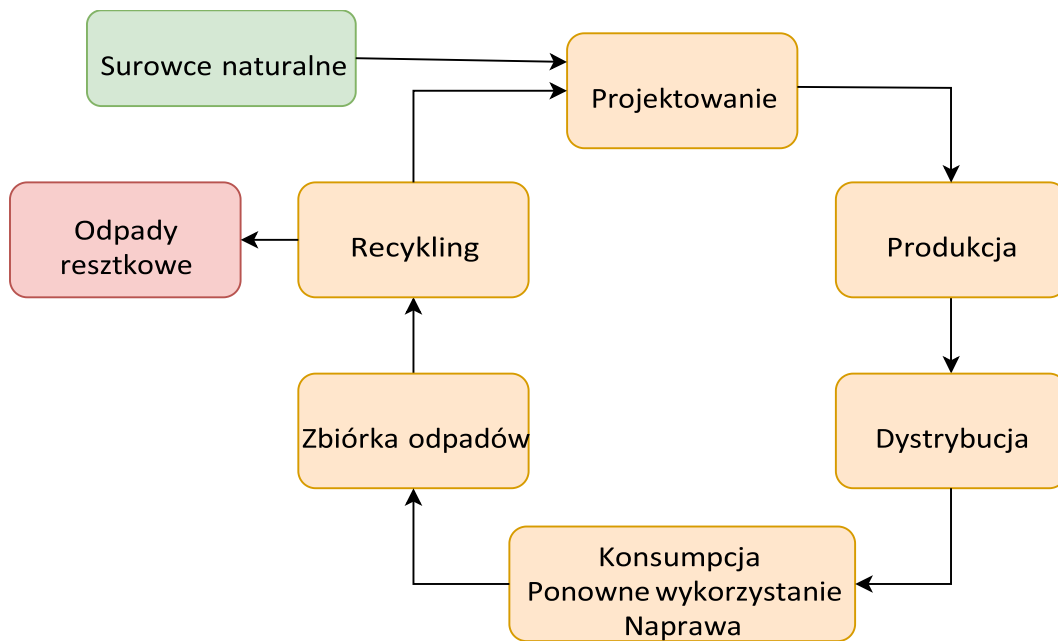
W Polsce ilość odpadów komunalnych wytwarzanych w przeliczeniu na mieszkańca w latach 2005 – 2020 przedstawiono na rysunku 1.3. Wzrost masy wytworzonych odpadów komunalnych na mieszkańca kształtował się w latach 2005 – 2020 na poziomie około 40%, wzrastając z poziomu 250 kg w 2005 roku do 350 kg w 2020 roku – zwiększenie masy zbieranych odpadów komunalnych zaobserwowano w szczególności po 2015 roku.



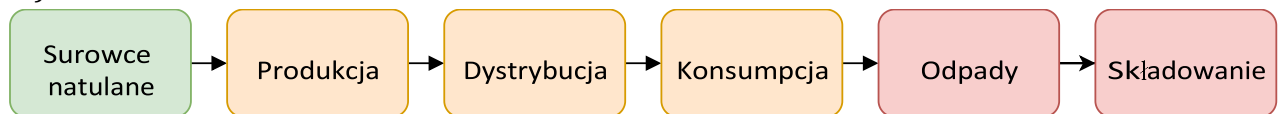
Rys. 1.3. Masa wytwarzanych odpadów komunalnych [kg/mieszkańca] w Polsce (opracowanie własne na podstawie [4])

W wyniku globalnego wzrostu gospodarczego z jednej strony wzrasta ilość wytwarzanych odpadów, a z drugiej strony następuje wzrost wykorzystania zasobów naturalnych do produkcji wszelkich dóbr. Rosnące koszty wydobycia surowców naturalnych oraz negatywny wpływ ich pozyskania na środowisko naturalne wpłynęły na zmianę modelu gospodarki. Koncepcja gospodarki o charakterze liniowym, w której ponowne wykorzystanie surowców jest zanedbywane, a końcowy etap zużytych wytworów stanowią składowiska odpadów zostaje zastąpiona przez gospodarkę o obiegu zamkniętym (GOZ). W literaturze spotyka się określenie GOZ lub gospodarka cyrkularna [5]. Główne założenia tej koncepcji przyjmują, że obieg surowców odbywa się w zamkniętej pętli. Zwiększona troska o środowisko naturalne, racjonalne korzystanie z zasobów oraz włączenie zaangażowania społeczeństwa przy wdrażaniu GOZ, stały się kluczowymi czynnikami, które miały zapewnić wdrożenie tej nowej koncepcji gospodarki w skali globalnej [6]. Na rysunku 1.4 przedstawiono schematycznie koncepcję GOZ oraz model gospodarki o charakterze liniowym.

a)



b)



Rys. 1.4. Modele gospodarki: a) model gospodarki o obiegu zamkniętym, b) model gospodarki liniowej (opracowanie własne)

W modelu liniowym (rys. 1.4 b) następuje pozyskiwanie surowców naturalnych, następnie ich przetwarzanie i wykorzystanie, a powstające odpady należące do różnych kategorii trafiają na wysypiska lub składowiska odpadów. Model gospodarki oparty o model liniowy funkcjonował przez wiele lat w skali globalnej. Z kolei w modelu GOZ, po wydobywaniu surowców, wykorzystaniu ich do produkcji różnych dóbr, ich dystrybucji i wykorzystaniu następuje etap zbierania i transportu powstałych odpadów. Trafiają one następnie do zakładów przetwarzających odpady, gdzie poddawane są one procesom sortowania oraz przetwarzania. W procesach sortowania odpady zostają rozdzielone na dwa strumienie – na surowce wtórne oraz odpady resztkowe. Surowce wtórne kierowane są do dalszych procesów odzysku lub recyklingu, natomiast odpady resztkowe poddawane są unieszkodliwianiu. Ważnym elementem w modelu GOZ jest selektywna zbiórka odpadów, która polega na rozdzielaniu poszczególnych frakcji materiałowych

w miejscu ich powstania z podziałem na kilka podstawowych kategorii. Do głównych kategorii zaliczane są odpady surowcowe tj. tworzywa sztuczne, metale, szkło, papier i makulatura oraz pozostałe odpady. Inne kategorie odpadów stanowią odpady ulegające biodegradacji, odpady wielkogabarytowe, zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, żużel paleniskowy oraz zmieszane odpady komunalne. Do zbiórki odpadów stosowane są kontenery, pojemniki lub worki o różnych pojemnościach oraz różnej kolorystyce. Tak zorganizowany system zbiórki odpadów wymaga doboru odpowiednich pojazdów do zbiórki. Stosowane są pojazdy specjalistyczne funkcją kompaktująca tzw. śmieciarki, pojazdy z zabudową skrzyniową oraz samochody ciężarowe z dźwigiem hydraulicznym (HDS) [6], [7].

2. Zbiórka, transport i zagospodarowanie odpadów w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym – przegląd literatury

Zgodnie z koncepcją GOZ, której głównym elementem jest ograniczenie wykorzystania zasobów naturalnych, należy tak zorganizować system zbiórki i transportu różnych kategorii odpadów, aby w maksymalnym stopniu zwiększyć ilość odpadów poddawanych odzyskowi lub recyklingowi. W związku z tym w prawodawstwie UE idea wdrożenia GOZ pojawiła się w VI Programie działań w zakresie środowiska naturalnego (Decyzja 1600/2002/WE z 22.07.2002 r. ustanawiająca wspólnotowy program działań w zakresie środowiska naturalnego). Wskazano i podkreślono w nim znaczenie działań promujących racjonalne gospodarowanie zasobami naturalnymi i właściwe zarządzanie powstającymi odpadami. Jednymi z najważniejszych elementów, na które zwrócona została uwaga przy opracowaniu dokumentu, było zwiększenie efektywności wykorzystania zasobów oraz zmniejszenie ilości wytwarzanych odpadów [8]. W 2021 r. zatwierdzono w Parlamencie Europejskim nowy plan działania UE w zakresie GOZ. W założeniach planu proponuje się podjęcie dodatkowych środków w celu osiągnięcia gospodarki neutralnej pod względem emisji dwutlenku węgla, opartej o recykling i o całkowicie zamkniętym obiegu do 2050 r. [9].

W Polsce projekt pełnego wdrożenia GOZ opiera się o tzw. Mapę drogową GOZ. Umieszczone w tym dokumencie propozycje mają na celu koordynację działań w obszarach leżących w kompetencji poszczególnych ministerstw odpowiedzialnych za określone aktywności. Mapa drogowa GOZ zawiera kilka rozdziałów dotyczących: zrównoważonej produkcji przemysłowej, zrównoważonej konsumpcji i gospodarowania surowcami odnawialnymi. Działania mają być wspierane przez nowe modele biznesowe. Jednym z kluczowych elementów poprawnego funkcjonowania obiegu surowców według schematu GOZ jest zbiórka i przetwarzanie odpadów. Powoduje to również konieczność przebudowy floty pojazdów w firmach zajmujących się zbiórką i transportem odpadów. Firmy, aby dostosować się do zmian musiały zakupić nowe pojazdy o różnych gabarytach oraz rodzajach zabudowy.

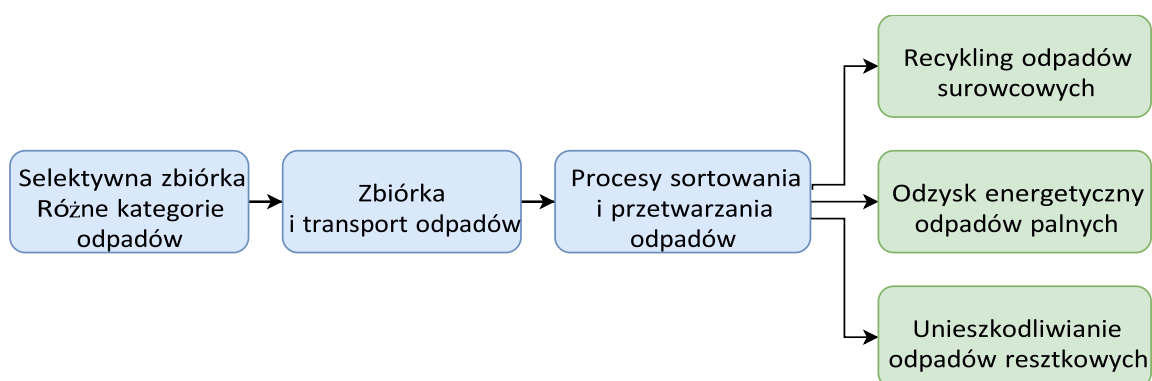
Oparcie gospodarki o model GOZ oraz wprowadzanie nowych kategorii odpadów prowadzą do ciągłych zmian w systemie zbiórki odpadów oraz sposobach postępowania z odpadami. Nie bez znaczenia pozostają również zmiany zachodzące w gospodarce światowej wynikające z przemian społeczno-ekonomicznych, działań wojennych

i terrorystycznych, kurczenia się zasobów naturalnych w wyniku, czego dochodzi do zaburzenia łańcuchów dostaw surowców [7].

2.1. Holistyczne ujęcie wykorzystania zasobów i potencjał ich ponownego wykorzystania

W holistycznym ujęciu systemu gospodarowania odpadami komunalnymi należy wziąć pod uwagę wiele aspektów. Do głównych należy zaliczyć aspekty techniczne, środowiskowe, społeczne, ekonomiczne oraz uwarunkowania polityczne i świadomość różnych uczestników systemu. Znaczącym elementem sprawnie funkcjonującego systemu jest świadomość mieszkańców dotycząca ochrony środowiska. Właściwie działający system pozwala zmniejszyć zapotrzebowanie na surowce naturalne, a tym samym wydłużyć możliwość korzystania z zasobów naturalnych. Brak racjonalnego podejścia do korzystania z zasobów naturalnych oraz nieefektywna gospodarka zasobami doprowadziła do wielu nieodwracalnych zmian środowiska naturalnego. Innymi negatywnymi skutkami jest wzrost zachorowań na choroby nowotworowe i kurczenie się zasobów wody pitnej [10].

Zmiany w rodzaju zbieranych odpadów wymuszają konieczność racjonalizacji w procesach zbiórki, transportu, a także sposobach postępowania z zebranymi odpadami. Osoby, które zarządzają w przedsiębiorstwach organizacją zbiórek odpadów mają do wykonania liczne zadania z związane właściwą organizacją zbiórek. System gospodarowania odpadami składa się z kilku etapów. Poszczególne etapy postępowania z odpadami przedstawiono na rysunku 2.1.



Rys. 2.1. Etapy systemu gospodarowania odpadami (opracowanie własne)

Zwiększająca się ilość odpadów zbieranych selektywnie, nowe kategorie odpadów stwarzają możliwości przekazania większej ilości odpadów do ponownego wykorzystania i recyklingu. Pierwszym etapem łańcucha logistyki zwrotnej jest selektywna zbiórka wytwarzanych odpadów w miejscu ich powstawania, czyli w gospodarstwach domowych, firmach lub instytucjach. Następnym etapem jest zbiórka i transport odpadów. Zebrane odpady przekazywane są do zakładów przetwarzających odpady, gdzie poddawane są procesom sortowania, doczyszczania oraz przygotowania do ponownego użycia.

W zakładach przetwarzania odpadów komunalnych spotyka się najczęściej dwa rozwiązania technologiczne [13]:

1. Linia mechaniczno-ręczna oparta na działaniu zespołu przenośników taśmowych, sit oraz pracy ręcznej sortowaczy w kabinie przebiegowej. Takie rozwiązanie cechuje się stosunkowo niskimi kosztami inwestycyjnymi, jednakże jest rozwiązaniem mało efektywnym oraz w dużej mierze uzależnionym od pracy ludzkiej.
2. Linia automatyczna składająca się z układu przenośników wraz z separatorami optycznymi i końcową kabiną przebiegową służącą jedynie do doczyszczania. Proces jest w pełni automatyczny pozwalający zaprogramować działanie linii dla określonej kategorii odpadów poddawanej procesowi. Instalacje tego typu cechują się bardzo dużą sprawnością.

Wśród metod zagospodarowania odpadów stosowane są [14]:

- odzysk surowców wtórnych – recykling,
- odzysk energetyczny – spalanie,
- procesy unieszkodliwiania poprzez składowanie, spalanie i kompostowanie.

Odzysk polega na prowadzeniu działań umożliwiających odzyskanie z odpadów substancji, materiałów lub energii [9]. W recyklingu odpadów można wyróżnić recykling mechaniczny, materiałowy, chemiczny oraz organiczny. Recykling mechaniczny polega na rozdrobnieniu różnych kategorii odpadów. Jest jednak głównie stosowany do rozdrobnienia odpadowych tworzyw sztucznych do postaci regranulatu (recyklatu), nadającego się do ponownego przetworzenia. Wszystkie tworzywa sztuczne nadają się do recyklingu mechanicznego, w efekcie, którego otrzymuje się materiał o nie pogorszonych właściwościach. Obecnie jest to główna metoda recyklingu, która pozwala na zagospodarowanie ponad 99% tego rodzaju odpadów. Recykling materiałowy jest procesem powtórnego wykorzystania odpadów, w którym zużyte wyroby

są zwracane, jako surowce wtórne do ponownego przetworzenia. Recykling opakowań i materiałów opakowaniowych ma duże znaczenie w odzyskiwaniu metali, szkła, makulatury oraz niektórych tworzyw sztucznych. Recykling surowcowy chemiczny jest to proces rozkładu tworzywa pod wpływem temperatury lub w następstwie reakcji chemicznej na składniki podstawowe, z których powstało tworzywo. Ze zużytych materiałów polimerowych otrzymuje się z powrotem monomery oraz gaz syntetyczny i olej opałowy. Recykling organiczny związany jest z obróbką tlenową lub beztlenową biodegradowalnych części odpadów opakowaniowych. Przeprowadzany jest w kontrolowanych warunkach z wykorzystaniem mikroorganizmów i prowadzi do wytworzenia stabilnych pozostałości organicznych lub metanu [11], [12].

Wśród metod unieszkodliwiania odpadów najbardziej efektywną metodą jest ich termiczne przekształcanie. Dotyczy to zarówno odpady resztkowe oraz tworzywa sztuczne o niskiej jakości ze względu na zanieczyszczenia. W takich przypadkach dużo lepszym zastosowaniem odpadów jest uzyskanie z nich energii w procesie termicznego przekształcania odpadów w wysokich temperaturach (około $\sim 1000^{\circ}\text{C}$). Odzysk energii zachodzi poprzez ukierunkowane spalanie w spalarniach, w celu uzyskania energii, ciepła i gorącej pary. Możliwe jest również przetwarzanie odpadów w paliwo alternatywne i jego spalanie oraz poprzez współspalanie przemysłowe, np. w cementowniach lub elektrociepłowniach [11], [13]. Inną metodą unieszkodliwiania odpadów jest składowanie odpadów na składowiskach, jednakże jest to najmniej zalecana metoda wg polityki UE. Gromadzi się tam odpady o znanych właściwościach, których nie wykorzystano gospodarczo lub nie unieszkodliwiono w inny sposób. Proces składowania odpadów polega na ich deponowaniu w wyznaczonym miejscu odpowiedniej wielkości, o określonych parametrach geologicznych oraz wodno-gruntowych. Na składowiskach można deponować odpady, których rodzaj określa instrukcja prowadzenia danego obiektu [15], [16].

Oddzielną grupę odpadów stanowią odpady niebezpieczne. Odpady niebezpieczne pochodzą głównie z przemysłu. Występują one jednak również w strumieniu odpadów komunalnych. Z definicji, odpady zaliczane są do niebezpiecznych, gdy wykazują określone, niepożądane cechy, jak np. łatwopalność, wybuchowość, toksyczność, korozyjność, wysoką aktywność chemiczną, promieniotwórczość lub wydzielanie toksycznych gazów. W takim przypadku, procedury unieszkodliwiania mają na celu poddanie odpadów procesom przekształceń biologicznych, fizycznych lub

chemicznych, w celu doprowadzenia ich do stanu niestwarzającego zagrożenia dla organizmów żywych i środowiska naturalnego [17]. Do odpadów niebezpiecznych pochodzących ze strumienia odpadów komunalnych można zaliczyć m.in. zużyty sprzęt elektroniczny i elektryczny.

Właściwie zaprojektowany i zorganizowany system gospodarki odpadami umożliwia racjonalną gospodarkę odpadami i ich odzysk. Dzięki odzyskowi surowców z odpadów ogranicza się zużycie surowców naturalnych do produkcji dóbr, zmniejsza zanieczyszczenie środowiska przez składowanie odpadów. W przypadku braku ponownego wykorzystania odpadów, odpady zostają pozbawione swoich właściwości surowcowych oraz dodatkowo stają się zagrożeniem dla środowiska naturalnego.

2.2. Wybrane czynniki oddziaływania na środowisko przy transporcie i zbiórce odpadów z gospodarstw domowych

Transport jest jedną z głównych gałęzi gospodarki oraz procesem niezbędnym w bytowaniu mieszkańców. W procesach transportowych generowane jest wiele różnych zanieczyszczeń oraz wpływa w sposób bezpośredni lub pośredni na środowisko. Jednym z bezpośrednich oddziaływań na środowisko są emisje szkodliwych zanieczyszczeń związanych z procesem spalania paliw takich jak tlenki azotu (NO_x), pył zawieszony (PM) (ang. particulate mater) oraz gazu cieplarnianego - dwutlenku węgla (CO_2). Emisje tych zanieczyszczeń są przyczyną wzrostu zachorowań wielu osób na choroby nowotworowe oraz układu oddechowego. Szkodliwe oddziaływanie transportu na środowisko i zdrowie ludzi to nie tylko emisje szkodliwych zanieczyszczeń. Wraz z rozwojem sieci dróg oraz infrastruktury towarzyszącej następuje postępująca degradacja środowiska naturalnego poprzez [18], [19] :

- przekształcanie coraz większych powierzchni gruntów rolnych lub leśnych,
- zaburzenie funkcjonowania naturalnych ekosystemów,
- zanieczyszczenie wód powierzchniowych i podziemnych oraz gleb,
- zniekształcenie naturalnych form morfologicznych obecnych na powierzchni ziemi.

Zbiórka odpadów wymaga wykorzystania pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi, które są przyczyną emisji różnego rodzaju zanieczyszczeń i uciążliwości zarówno dla środowiska naturalnego oraz społeczeństwa. W zbiórce odpadów

wykorzystywane są zarówno lekkie pojazdy z zabudową skrzyniową oraz samochody ciężarowe specjalistyczne.

Emisje przyczyniają się do pogorszenia jakości powietrza zwłaszcza w miastach, dlatego samorządy lokalne wymagają stosowania pojazdów o ograniczonej emisji, spełniających normy m.in. Euro 5 lub Euro 6 w UE lub inne, w zależności od przepisów poza UE. W prawodawstwie UE wprowadzono normy określające dopuszczalne poziomy emisji spalin dla różnych rodzajów pojazdów. Normy emisji spalin obejmują tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), pył zawieszony (PM), sumę węglowodorów (THC), a także węglowodory nie metanowe (NMHC). W tabelicy 2.1 przedstawiono dopuszczalne wartości emisji dla lekkich samochodów dostawczych dla silników wysokoprężnych.

Tablica 2.1. Europejskie normy emisji (Euro 5 i Euro 6) dla lekkich samochodów dostawczych (opracowane na podstawie [20])

| Poziom/Pierwsza rejestracja | CO [g/km] | NO _x [g/km] | HC+NO _x [g/km] | PM [g/km] |
|-----------------------------|-----------|------------------------|---------------------------|-----------|
| Euro 5a (2012) | 0.74 | 0.28 | 0.35 | 0.005 |
| Euro 5b (2013) | 0.74 | 0.28 | 0.35 | 0.0045 |
| Euro 6d (2022) | 0.74 | 0.125 | 0.215 | 0.0045 |

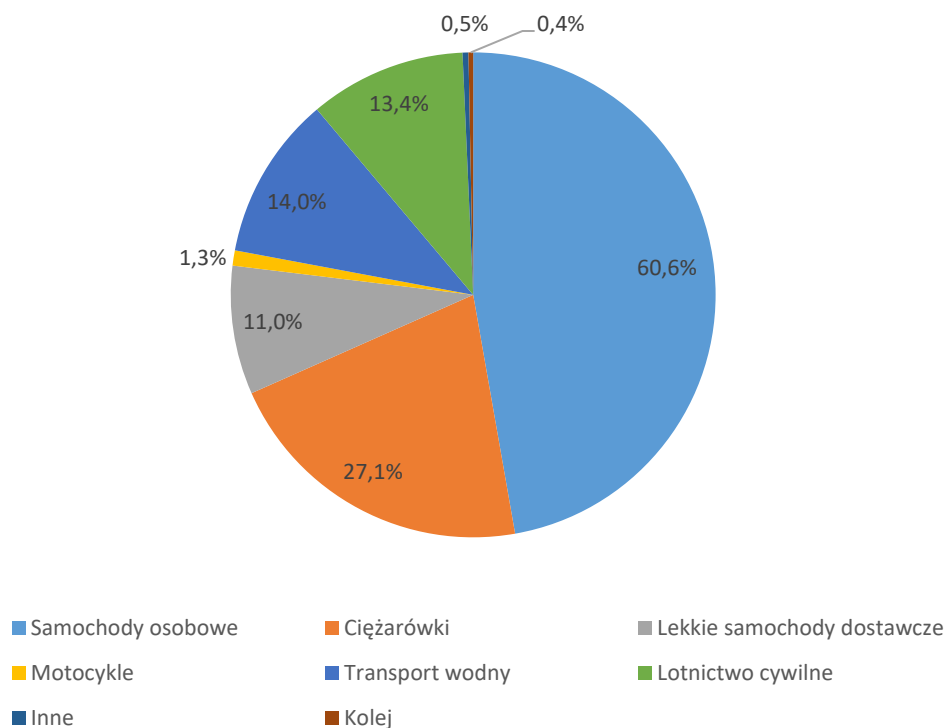
W tabelicy 2.2 przedstawiono wartości dopuszczalne dla pojazdów ciężarowych zgodnie z normą Euro 5 i Euro 6 [20].

Tablica 2.2. Europejskie normy emisji dla silników wysokoprężnych pojazdów o dużej ładowności (opracowano na podstawie [20])

| Poziom emisji | Cykl testowy | CO | HC | NO _x | NH ₃ [ppm] | PM |
|---------------|---|-----|------|-----------------|-----------------------|------|
| EURO 5 | Cykl stacjonarny | 1.5 | 0.46 | 2 | - | 0.02 |
| EURO 6 | Światowy Zharmonizowany Cykl Stacjonarny WHSC | 1.5 | 0.13 | 0.4 | 10 | 0.01 |
| | Cykl testu przejściowego WHTC | 4 | 0.16 | 0.46 | 10 | 0.01 |

Zgodnie z danymi udostępnionymi przez EEA (European Environment Agency) z transportu pochodziło w 2019 roku około ¼ emisji CO₂. Jak przedstawiono

na rysunku 2.2 z emisji powstałych w transporcie drogowym pochodziło aż 71,7% CO₂, z czego ponad 38% emisji przypada na lekkie samochody dostawcze i samochody ciężarowe.



Rys. 2.2. Emisje w transporcie w UE (opracowano na podstawie[10])

Innym niekorzystnym oddziaływaniem transportu na środowisko i zdrowie ludzi jest emisja hałasu. Zgodnie z danymi zawartymi w tabelicy 2.3 poziom dźwięku emitowany przez samochody ciężarowe osiąga wysoki poziom wśród środków transportu [18].

Tablica 2.3. Poziom dźwięku emitowany przez różne środki transportu (opracowano na podstawie [19])

| Lp. | Środek transport | Emitowany poziom dźwięku [dB] |
|-----|--------------------|-------------------------------|
| 1 | Motocykl | 78-87 dB |
| 2 | Samochód osobowy | 74-85 dB |
| 3 | Samochód ciężarowy | 83-93 dB |
| 4 | Autobus | 86-92 dB |
| 5 | Ciągnik rolniczy | 85-92 dB |
| 6 | Tramwaj | 70-95 dB |
| 7 | Samolot | 74-108 dB |
| 8 | Pociąg | 79-85 dB |

W celu uwzględnienia efektów oddziaływania na środowisko, przy użytkowaniu pojazdów do prowadzenia zbiórki w ramach niniejszej dysertacji zostaną wyznaczone

emisje spalin w trakcie prowadzenia zbiórek. W szczególności wyznaczone będą czynniki powstawania efektu smogu PM i NO_x oraz emisje dwutlenku węgla. Cykl roboczy pojazdów zbierających odpady wynika ze specyfiki zbiórki odpadów. Cykl ten jest podobny i powtarzalny dla zbiórki różnych kategorii odpadów. Pojazdy wyjeżdżające z bazy transportowej, dojeżdżają do pierwszych punktów zbiórki w danym rejonie odbioru odpadów. Następnie odbierają odpady z kolejnych punktów podjeżdżając i zatrzymując się przy każdym z punktów. Po zapełnieniu wracają do zakładu przetwarzania odpadów. Po opróżnieniu, pojazdy wracają do punktów, w których zakończyły zbiórkę. Długość tras determinuje poziom emisji związanych ze spalaniem paliwa w silnikach pojazdów. Dlatego ważne jest, żeby wykonywane trasy były jak najkrótsze.

2.3. Interdyscyplinarny zakres wymagań prowadzenia zbiórek i transportu odpadów komunalnych

Zmiany systemu gospodarczego ukierunkowane na poszanowanie zasobów przy jednoczesnej ochronie środowiska naturalnego odbywają się na różnych płaszczyznach. Procesy zbiórki i transportu odpadów będące przedmiotem badań w tej dysertacji dotyczą kilku istotnych elementów GOZ, jako wiodącego modelu gospodarowania w krajach rozwiniętych [21], [22]. Działalność firm zajmujących się zbieraniem, transportem i przetwarzaniem odpadów powinna mieć zrównoważony charakter pod względem ochrony środowiska i efektywności ekonomicznej [23]. Strategie UE w zakresie odpadów komunalnych są oparte na koncepcjach racjonalnego gospodarowania zasobami i maksymalnego wykorzystania surowców wtórnych powstałych z ich recyklingu [24], [25]. Dochody przedsiębiorstw zajmujących się zbiórką i transportem odpadów zależą od różnicy przychodów uzyskanymi ze sprzedaży oczyszczonych surowców i kosztów poniesionych przy pozyskaniu surowców zawartych w odpadach. Zgodnie z takim podejściem strategie przedsiębiorstw powinny uwzględniać najbardziej efektywne metody zbiórek odpadów, które umożliwiają realizację założeń GOZ [26], [27]. W przeciwnym razie korzyści środowiskowe wynikające ze zbiórki odpadów segregowanych nie byłyby zrównoważone ekonomicznie i byłyby trudne do utrzymania przez przedsiębiorstwa zajmujące się zbiórką i transportem odpadów [28].

Większość odpadów komunalnych powstaje w miastach i aglomeracjach [29]. Z tego względu oprócz koncepcji GOZ wprowadzone zostało określenie górnictwa

miejskiego (ang. urban mining) w celu scharakteryzowania wytycznych i zadań dla samorządów oraz firm komunalnych odpowiedzialnych za zbiórkę odpadów. Polega ono na pozyskiwaniu surowców zgromadzonych w formie odpadów w miastach i aglomeracjach [30]. W praktyce górnictwo miejskie łączy planowanie i organizację zbiórki różnych kategorii odpadów wraz z zadaniami do wykonania związanych z ich odbiorem i transportem. Do sprawnego funkcjonowania systemu zbiórki odpadów konieczna jest koordynacja działań ze strony mieszkańców oraz firm transportowych. W pierwszej kolejności, to mieszkańcy powinni być poinformowani o sposobach gromadzenia odpadów i zasadach prowadzenia zbiórek. Dodatkowymi atrybutami wpływającymi na większe zaangażowanie mieszkańców jest zaoferowanie innych form odbioru odpadów, a także terminowość ich wykonywania przez firmy zbierające.

Ważnym czynnikiem mającym wpływ na efektywność zbiórki jest nastawienie mieszkańców do ochrony środowiska naturalnego i właściwego pozbywania się odpadów z gospodarstw domowych. Świadomość ochrony środowiska przez mieszkańców jest czynnikiem korzystnie wpływającym na właściwe sposoby zbiórki i segregacji odpadów [31], [32]. Z tego względu efektywność zbiórki odpadów w dużym stopniu zależy od zaangażowania społecznego mieszkańców. Ważna jest edukacja i kampanie informacyjne dla mieszkańców dotyczące dostępnych metod usuwania odpadów, harmonogramów zbiórek i terminów odbioru odpadów na terenie zamieszkiwanej gminy [33]–[35]. Mieszkańcy oczekują dobrej jakości wykonywania usług odbioru odpadów [36]–[38] i motywuje ich to do właściwego segregowania odpadów i usuwania ich z gospodarstw domowych w sposób legalny. Wyniki badań związanych z percepcją mieszkańców przy usuwaniu odpadów z gospodarstw domowych przedstawiono w artykułach przeglądowych [39], [40], wskazując główne czynniki mające wpływ na skuteczność zbiórki. Jednak największy zakres odpowiedzialności dotyczącej efektywnej zbiórki i racjonalnego ekonomicznie transportu leży po stronie firm odbierających odpady.

Te zagadnienia zostały objęte zakresem niniejszej rozprawy doktorskiej, która podejmuje interdyscyplinarne ujęcie efektywności zbiórki w zakresie:

- ekonomii – poprzez wyznaczenie współczynników związanych z kosztami i przychodami przy zbiórce odpadów,
- ochrony środowiska – poprzez wyznaczenie masy wybranych kategorii odpadów oraz wyznaczenia emisji powstałych w trakcie transportu i zbiórki odpadów,

- zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji w optymalizacji tras odbioru i zbadaniu wpływu ograniczenia czasu realizacji tras oraz zużycia paliwa na wskaźniki i mierniki ekonomiczne i wpływające na środowisko naturalne.

Problematyka związana z racjonalizacją i poprawą efektywności zbiórki odpadów została podjęta w publikacjach naukowych oraz raportach różnych instytucji i organizacji w skali globalnej, ale w Polsce ten temat jest znacznie rzadziej podejmowany. Firmy zbierające odpady ze względu na uzyskanie korzyści ekonomicznych zainteresowane są niskimi kosztami działalności, co prowadzi do zmniejszania liczby pojazdów uczestniczących w zbiórkach oraz liczby zatrudnionych biorących udział w transporcie i zbiórce [41], [42]. Pomimo tej świadomości firmy transportowe stosunkowo rzadko korzystają z wyników badań naukowych oraz zaawansowanych modeli obliczeniowych ukierunkowanych na racjonalizację ilości wykorzystanych zasobów [43]. Potrzeba określenia wskaźników ekonomicznych i związanych z ochroną środowiska jest istotna. Niektórzy autorzy twierdzą, że recykling jest korzystny nie tylko dlatego, że może generować dodatkowe przychody, ale również pozwala uniknąć kosztów utylizacji i negatywnych efektów oddziaływania odpadów na środowisko [44]. W literaturze stosunkowo rzadko opisywane są wskaźniki ekonomiczne do oceny możliwości uzyskania przychodu z recyklingu. Pod tym względem część badań skupia się na analizie kosztów procesów zbiórki odpadów [45]–[47]. Inne opublikowane artykuły dotyczą gospodarki odpadami i ich unieszkodliwiania [48]–[50]. Niektóre badania uwzględniają korzyści wynikające z recyklingu odpadów, ale tylko część z nich koncentruje się na odpadach komunalnych [51]–[53]. Istotną kwestią dla firm transportowych jest uwzględnienie kosztów zbiórki odpadów, a w niektórych wypadkach przychody pochodzące ze sprzedaży zebranych kategorii odpadów i pozyskanych surowców wtórnych mogą być niewystarczające na pokrycie kosztów ich zbiórki [54]. Znacząca część opracowań naukowych dotycząca racjonalizacji zarządzania zbiórką odpadów ukierunkowana jest na ograniczenie kosztów operacyjnych firm zbierających odpady [55]–[57]. Szczegółowa analiza rozwiązań poprawy efektywności na poziomie strategicznym i taktycznym została przedstawiona w przeglądzie modeli badawczych uwzględniających złożone scenariusze zagospodarowania odpadów [58], [59]. Ocena metod zbiórek odpadów z wykorzystaniem analizy wielokryterialnej została przeprowadzona w kilku badaniach [60], [61], w których uwzględniono zarówno czynniki ekonomiczne i oddziaływania na środowisko.

2.4. Wspomaganie zbiórki i transportu odpadów z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji

W literaturze naukowej poddawane są analizie wskaźniki efektywności zbiórki i ponoszonych kosztów, ale wciąż poszukuje się metod i narzędzi, które mogą je usprawnić [62], [63]. Wnioski płynące z analizy efektów ekonomicznych mogą być przydatne do ustalania szerszego zakresu oddziaływania na różne obszary ekosystemu i społeczeństwa [64], [65]. Część autorów proponuje zastosowanie wielokryterialnego wspomaganie decyzji dla firm zajmujących się zbiórką i transportem odpadów, z priorytetem racjonalizacji kosztów i osiągnięcia celów środowiskowych [66], [67]. W artykule [68] autorzy proponują wykorzystanie uproszczonych wskaźników, które uwzględniają czynniki ekonomiczne takie jak, koszty pracownicze, użytkowania pojazdów i kontenerów. Celem propozycji stosowania uproszczonych wskaźników jest ułatwienie wykonania oceny ekonomicznej przez większą liczbę firm transportowych z pominięciem złożonych analiz. Zintegrowany wskaźnik efektywności ekonomicznej do pomiaru i analizy możliwości przychodu przedsiębiorstw zajmujących się zbieraniem, transportem i przetwarzaniem odpadów komunalnych, przy jednoczesnym uwzględnieniu czynników środowiskowych został zaproponowany na przykładzie studium we Włoszech [23]. Uwzględnia on czynniki ekonomiczne i środowiskowe opisujące relacje między ekonomicznymi a środowiskowymi czynnikami zbiórki odpadów segregowanych z uwzględnieniem przychodów pozyskanych z zebranych surowców wtórnych. Natomiast kompleksowa analiza i ocena zbiórki odpadów komunalnych z zastosowaniem analizy cyklu życia produktu została przedstawiona w pracy [69].

Jedną z najważniejszych metod racjonalizacji wykorzystania zasobów firm zbierających i transportujących odpady oraz ograniczania kosztów operacyjnych jest wielokryterialna optymalizacja tras pojazdów wykorzystywanych w zbiórce. Znajdują tu zastosowanie modele wspomagające rozwiązanie problemu marszrutyzacji - TSP (ang. travelling salesman problem) oraz ukierunkowane na minimalizację długości tras. Istnieje wiele sposobów rozwiązania problemu marszrutyzacji i dominująca część z nich wykorzystuje wspomaganie algorytmami sztucznej inteligencji [70] - [73].

Do rozwiązania problemów uwzględniających ładowność pojazdów model obliczeniowy musi zostać uzupełniony o ten parametr tworząc rozwinięcie w problemu

marszrutyzacji - VRP (ang. vehicle routing problem) [74]–[76]. Dla wykonywanych zbiorów odpadów ograniczeniem jest ładowność pojazdów zarówno pod względem masy jak i objętości, który to parametr dominuje dla odpadów nienadających się do kompresji w śmieciarkach. W literaturze stosuje się również rozwinięcie problemu marszrutyzacji - VRP jako WCRP (ang. waste collection routing problem) [77]. Zagadnienia optymalizacji mogą obejmować kompleksowo całą sieć transportową, ale także bardziej ograniczony zakres jak np. rozmieszczenie kontenerów [78].

W części prac naukowych do optymalizacji zadań transportowych został wykorzystany algorytm genetyczny [79]. Funkcja celu ukierunkowana na minimalizację długości tras, zużycia paliwa lub czasu ich wykonywania była podejmowana w kilku badaniach z zastosowaniem algorytmów genetycznych [80]–[82]. Innym przykładem optymalizacji wykorzystującej algorytmy genetyczne dla różnych wariantów problemu marszrutyzacji były badania, w których uzyskano wyraźne skrócenia tras pojazdów [79], [83], [84].

Jednym z algorytmów obliczeniowych opartych o naśladowanie naturalnych procesów w organizmie ludzkim jest sztuczny system immunologiczny [85], [86]. Został on również wykorzystany do planowania tras pojazdów, a także optymalizacji rozmieszczenia kontenerów do zbiórki odpadów [87]. Algorytm immunologiczny może wspomagać optymalizację kosztów w łańcuchu logistyki zwrotnej. W porównaniu z algorytmem genetycznym daje on lepsze rezultaty o około 10% [88].

Innym algorytmem naśladowującym procesy obserwowane w naturze jest algorytm kolonii mrówek – nazywany w uproszczeniu mrówkowym, który znalazł zastosowanie również w optymalizacji zbiórki odpadów komunalnych przedstawionych w artykułach [89], [90]. W innym badaniu wykorzystano algorytm mrówkowy do optymalizacji tras zbiórki odpadów komunalnych w Atenach. Dodatkowo zastosowano współrzędne geograficzne do oznaczania dokładnych miejsc zbiórki i opisywania bardziej zaawansowanych parametrów jak np. natężenie ruchu i zmiany w organizacji ruchu. Wyniki badań modelowych porównano z danymi z rzeczywistych zbiorów w stolicy Grecji uzyskując skrócenie średniej długości tras o 10,5%, a dla jednej z tras w wyniku optymalizacji skrócono jej długość o 26% [91]. Badania modelowe parametrów algorytmu mrówkowego i wpływu ich wartości na efektywność obliczeń zostały przedstawione w pracy [92]. Wyniki zastosowania algorytmu mrówkowego do optymalizacji tras przeprowadzoną dla miasta Gaziantep o liczbie mieszkańców 2,5 mln

mieszkańców w Turcji wskazują na 28% skrócenie długości w stosunku do realnie wykonywanych tras. Zaproponowane rozwiązanie ograniczyło również koszty zbiórki i transportu odpadów o 30%. Wykazano również możliwość znacznego zmniejszenia zanieczyszczenia powietrza przez użytkowane pojazdy [93].

Optymalizacja tras z uwzględnieniem okien czasowych była przedmiotem badań, w których wykorzystano algorytm przeszukiwania tabu [94], [95], a także przeszukiwaniu sąsiedztwa [96]–[98]. Tego typu model zbiórki wykorzystywany jest w odbiorach odpadów na żądanie, gdy mieszkańcy zgłaszają chęć odbioru odpadów, a firmy zbierające umawiają się na przyjazd na konkretną godzinę. Taka metoda zbiórki jest szeroko wykorzystywana w odbiorze odpadów zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego a także odpadów wielkogabarytowych [99], [100].

Zbiórka odpadów w obszarach miejskich, zwłaszcza o gęstej zabudowie wymaga dużych nakładów finansowych. W szerszym ujęciu każda zmiana i poprawa w zakresie czasu prowadzenia zbiórki, wykorzystania pojazdów i skrócenia tras może przynieść zasadnicze korzyści. Porównanie optymalizacji tras dla problemu komiwojażera metodą CPLEX i algorytmu symulowanego wyżarzania zostało przedstawione na przykładzie zbiórki odpadów w Iranie. W tym wypadku metodą CPLEX nie można było przeprowadzić obliczeń dla ponad 40 węzłów w czasie poniżej 3600s. W wyniku optymalizacji osiągnięto redukcję kosztów zbiórki odpadów o 13.3% [101]. Kolejnym przykładem wykorzystania algorytmów heurystycznych – najbliższego sąsiedztwa z przeszukiwaniem lokalnym – jest studium przypadku optymalizacji zbiórki odpadów komunalnych w Barcelonie. W wyniku badań trasy zostały skrócone o około 35% [102]. Dla poprawy zbiórki odpadów z oknami czasowymi z włączeniem obligatoryjnych przerw w pracy wykorzystano adaptacyjny algorytm dużego sąsiedztwa. Dzięki temu uzyskano średnie skrócenie tras od 8-13%, natomiast przy zwiększeniu przedziału okien czasowych można uzyskać poprawę dochodzącą do 45% [97]. Znaczną poprawę efektywności zbiórki uzyskano również wykorzystując programowanie liniowe. Dla studium przypadku w Kalkucie w Indiach ograniczono długość tras o 30% dla zbiórki odpadów komunalnych [72]. W innych badaniach, obejmujących studium przypadku dla obszarów wiejskich o zabudowie rozproszonej w północno-zachodniej Hiszpanii, uwzględniono minimalizację kosztów transportu i poziom jakości obsługi. Do optymalizacji wybrano algorytm przeszukiwania tabu i w efekcie uzyskano poprawę od kilkunastu do 50% w porównaniu z aktualnie wykonywanymi trasami. [103]. W artykule [104]

zaproponowano optymalizację tras pojazdów za pomocą hybrydowego algorytmu wyszukiwania lokalnego. Rozwiązanie bazowe uzyskuje się za pomocą optymalizacji roju cząstek (PSO - ang. particle swarm optimization), a następnie przeprowadza się lokalne przeszukiwanie poddane później optymalizacji za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania. Celem badań było uzyskanie zminimalizowanej długości tras każdego pojazdu zbierającego odpady, całkowitej emisji gazów cieplarnianych oraz całkowitych kosztów użytkowania pojazdów. Wyniki pokazują, że proponowany model zapewnia ograniczenie wymienionych czynników aż o 42%. Złożone modele zbiórki uwzględniające wielokryterialną optymalizację opracowano w oparciu o programowanie liniowe, a także algorytm inwazji chwastów i symulowanego wyżarzania [105]. W funkcji celu uwzględniono koszt całkowity zbiórki odpadów, emisje, a także zadowolenie mieszkańców z poziomu usług firm zbierających odpady. Stosując wymienione algorytmy heurystyczne autorzy zaproponowali funkcję celu dążącą do minimalizacji kosztów, emisji spalin i maksymalizacji zadowolenia mieszkańców.

Wspomaganie systemów zbiórki odpadów w zakresie planowania zbiórek opiera się na systemach informacji geograficznej - GIS (ang. geographic information system) [106], [107], na systemach identyfikacji radiowej [108] i Internecie rzeczy (IoT – ang. Internet of Things) [109]. Z tego względu jest to niezbędny komponent w wykorzystaniu nowoczesnych systemów planowania tras w oparciu o mapy cyfrowe i ułatwienie przygotowania macierzy odległości dla lokalizacji punktów odbioru odpadów w obsługiwanych gminach.

Prowadzenie zbiórek odpadów komunalnych oprócz celów higienicznych usuwania zbędnych substancji z gospodarstw domowych ma na celu pozyskanie surowców do odzysku, a w szczególności do recyklingu. Ze względu na różnorodność stosowanych materiałów w różnych produktach – powstające odpady mają różny zakres oddziaływania na środowisko [110]–[112]. Z tego względu w całości powinny być odbierane przez firmy, które gwarantują właściwe przetwarzanie i ich zagospodarowanie. Istotnym czynnikiem oddziaływania na środowisko w zbiórce i transporcie odpadów są emisje spalin, które powstają przy zbiórce i są zależne od rodzajów pojazdów i warunków eksploatacyjnych przy prowadzeniu ziórek. Przy niewłaściwie dobranej liczbie pojazdów zwiększeniu ulegają emisje, które mogą być dokuczliwe zwłaszcza w obszarach miejskich [113].

Jeśli celem optymalizacji zbiórki odpadów będzie zmniejszenie kosztów, to jednocześnie będzie to miało wpływ to na ograniczenie liczby pojazdów i kontenerów do zbiórki a tym samym zmniejszenie emisji [42], [56], [114]. Uwzględnianie poziomu emisji spalin przy projektowaniu tras zbiórek zostało uwzględnione w badaniach modelowych i różnych studiach przypadku [115], [116]. Doprowadziło to też do postawienia nowego problemu badawczego jako rozwinięcie klasycznego problemu marszrutyzacji VRP do problemu marszrutyzacji uwzględniającego emisje spalin - PRP (ang. pollution routing problem) [117], [118]. Z wielu badań w zakresie ograniczenia spalin wybrano kilka artykułów podejmujących tematykę odbioru i transportu odpadów. Dla odpadów budowlano-remontowych wykorzystując algorytm Google OR i optymalizację kombinatoryczną uzyskano skrócenie tras o 20%, a także zmniejszenie emisji CO₂ o 15% dla studium przypadku w Hong Kongu w warunkach rzeczywistych [119]. W innej pracy [120] przeprowadzono analizę oddziaływania emisji w transporcie odpadów w szczególności NO_x i CO₂. Z badań wykonanych na rzeczywistych pojazdach wynika, że poziom emisji jest wyższy niż wynikałoby to z danych podawanych przez producentów pojazdów. Znaczną poprawę efektywności zbiórki odpadów dochodzącą do 26% i obniżenie emisji CO₂ o 17% uzyskano z wykorzystaniem modelu programowania mieszanego liniowego [121]. Podobny cel postawiony został w innej pracy naukowej, w której zastosowano algorytm genetyczny oraz algorytm znajdowania najkrótszej ścieżki w celu znalezienia trasy z minimalną masą emisji produktów spalania [122]. Zmniejszenie emisji zanieczyszczeń w problemie VRP dla zbiórki odpadów za pomocą algorytmu wyszukiwania zmiennych tabu w sąsiedztwie uzyskano dla studium przypadku we wschodniej Finlandii. Skrócenie tras dla jednej z lokalizacji wyniosło 4% natomiast dla drugiej lokalizacji doszło aż do 44% [123].

W tablicy 2.4 zawarte zostały artykuły, w których wykorzystano algorytmy heurystyczne i dokładne w optymalizacji i racjonalizacji zbiórki i transportu odpadów. W szczególności zwrócono uwagę na rodzaj zastosowanego algorytmu. Obszar, w którym prowadzono badania oraz zakres uzyskanej poprawy założonych parametrów zbiórki odpadów. Uwzględnione zostały długości tras, koszty prowadzenia zbiórek, emisje spalin pojazdów, a także liczbę wykorzystywanych pojazdów w ziórkach.

Tablica 2.4. Zestawienie artykułów, w których zastosowano algorytmy heurystyczne
[opracowanie własne]

| Artykuł | Wykorzystany algorytm | Studium przypadku | Poprawa efektywności lub parametrów będących przedmiotem badań |
|---------|--|--|---|
| [102] | Algorytm najbliższego sąsiedztwa z przeszukiwaniem lokalnym | Obszar miejski Barcelona, Hiszpania | Trasy pojazdów zostały skrócone o około 35%. |
| [119] | Algorytm Google OR i optymalizacja kombinatoryczna | Hong Kong | Skrócenie tras pojazdów o 20% i redukcja emisji CO ₂ o 15% |
| [97] | Adaptacyjny algorytm dużego sąsiedztwa | Obszar aglomeracji Kopenhagi, Dania | Uzyskano średnie skrócenie tras od 8-13%, natomiast przy zwiększeniu przedziału okien czasowych można uzyskać poprawę dochodzącą do 45%. |
| [72] | Programowanie liniowe | Kalkuta, Indie | Ograniczono długość tras o 30% dla zbiórki odpadów komunalnych |
| [103] | Algorytm przeszukiwania tabu | Północno-zachodnia Hiszpania, zabudowa rozproszona | Zminimalizowano koszty transportu i poziom jakości obsługi. Po optymalizacji uzyskano skrócenie tras od kilkunastu do 50%. |
| [91] | Algorytm mrówkowy | Zbiórka odpadów komunalnych w Atenach | Przy optymalizacji zbiórki odpadów komunalnych uzyskano skrócenie średniej długości tras o 10,5%, a dla jednej z tras skrócono długość o 26%. |
| [123] | Algorytmu przeszukiwania zmiennych tabu w sąsiedztwie | Wschodnia Finlandia | Skrócenie tras dla jednej z lokalizacji wyniosły 4% natomiast dla drugiej lokalizacji 44%. |
| [93] | Algorytm mrówkowy | Gaziantep (o liczbie mieszkańców 2,5 mln), Turcja | Uzyskano 28% skrócenie długości tras w stosunku do realnie wykonywanych. Zaproponowane rozwiązanie ograniczyło koszty zbiórki i transportu odpadów o 30%. Wykazano, znaczne zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza |
| [104] | Hybrydowy algorytm wyszukiwania lokalnego, w którym rozwiązanie bazowe uzyskuje się za pomocą optymalizacji roju cząstek (PSO), a następnie algorytm symulowanego wyżarzania | Badania modelowe | Zminimalizowano długości tras, całkowitą emisję gazów cieplarnianych, całkowite koszty użytkownika każdego pojazdu zbierającego odpady. Proponowany model zapewnia ograniczenie wymienionych czynników aż o 42% |
| [90] | Algorytm mrówkowy | Kaohsiung, Taiwan | Całkowita długość tras nie uległa zmianie, ale zwiększono liczbę odwiedzonych punktów w sąsiedztwie średnio o 69%. |

Tablica 2.4. cd.

| Artykuł | Wykorzystany algorytm | Studium przypadku | Poprawa efektywności lub parametrów będących przedmiotem badań |
|---------|--|--|--|
| [124] | Algorytm genetyczny | Północny Zachodni Brzeg, Palestyna | Skrócono długość tras o 66%, a całkowity czas zbiórki został zmniejszony z 7 godzin na pojazd do 2,3 godzin dla wykonywanej trasy |
| [125] | Algorytm hybrydowy dużego sąsiedztwa ALNS z algorytmem polowania waleni WOA | Teheran, Iran | Redukcja kosztów dla pojazdów z pojedynczą komorą dla odpadów wyniosła 3,2%, a dla pojazdów z kilkoma komorami dla odpadów o 20% |
| [126] | Algorytm genetyczny | Jihlava, Czechy | Skrócono długość tras o 7%. |
| [101] | Algorytm symulowanego wyżarzania | Sanandaj, Iran | Koszt całkowity zbiórki został zmniejszony o 13,3%. |
| [127] | Algorytm genetyczny | Polska | Uzyskano 25% poprawę w skumulowanej wartości parametrów takich jak długość tras pojazdów, czasu wykonywania zbiórki i liczby wykorzystywanych pojazdów w zbiorce |
| [128] | Rozwiązanie problemu komiwojażera – brak określenia algorytmu | Dęblin | Skrócony został czas obsługi zbiórki odpadów oraz długości trasy o około 15%. |
| [99] | Algorytm genetyczny i logika rozmyta | Tychy | Średnie skrócenie tras pojazdów wyniosło 28%. |
| [129] | Porównanie algorytmów przeszukiwania tabu, symulowanego wyżarzania i poszukiwania harmonii | Łódź | W optymalizacji uwzględniono dopuszczalną ładowność pojazdu i uzyskano poprawę efektywności zbiórki od 5-13%, w zależności od algorytmu obliczeniowego. |
| [130] | Symulowane wyżarzanie, przeszukiwanie tabu, algorytm zachłanny oraz kolonii pszczół | Tokio, Japonia, Filadelfia, USA i Warszawa | Skrócenie tras pojazdów zawierało się w przedziale 16-22%, w zależności od zastosowanego algorytmu. |
| [100] | Algorytm genetyczny i metoda Taguchi | Opole | Uzyskano skrócenie trasy od 18-25%. Zmniejszona została liczba pojazdów uczestniczących w zbiorce i koszty ograniczono średnio o 8% |

W przeglądzie literatury polskiej oraz autorów posiadających afiliację uczelni polskich tematyka związana z optymalizacją tras pojazdów przy zbiorce odpadów komunalnych oraz optymalizacją zbiórki jest podejmowana bardzo rzadko. Przy wyszukiwaniu w bazie Scopus terminu „optymalizacja zbiórki odpadów” lub „optymalizacja tras przy zbiorce odpadów” zapytanie w języku polskim nie zwracało żadnych wyników. Wyszukiwanie terminów anglojęzycznych, zawierających słowa kluczowe – „optimisation waste collection” oraz „optimisation waste transportation”

obejmujących badania opublikowane od 2012 r zwróciło zaledwie 22 pozycje dla pierwszego wyszukiwania i 10 pozycji dla drugiego terminu, w których autorzy wywodzili się z polskich uczelni. Po zweryfikowaniu treści artykułów, w których termin „optimisation” nie dotyczył bezpośrednio znaczenia z wykorzystaniem funkcji celu w ujęciu matematycznym, liczba artykułów została ograniczona do 14 i zostały one zebrane w tablicy 2.5.

Tablica 2.5. Zestawienie artykułów z literatury polskiej związanych z optymalizacją tras pojazdów przy zbiorce odpadów komunalnych (opracowanie własne)

| Lp. | Artykuł | Zakres badawczy |
|-----|---------|---|
| 1 | [127] | Do optymalizacji tras pojazdów wykorzystano algorytm genetyczny. Ponad 25% poprawę w skumulowanej wartości parametrów takich jak długości tras pojazdów, czasu wykonywania zbiórki i liczby wykorzystywanych pojazdów w zbiorce. |
| 2 | [131] | Algorytm programowania nieliniowego oparty o wyznaczanie kosztów krańcowych dla odpadów medycznych w Polsce z wykorzystaniem systemu Matlab. |
| 3 | [132] | W artykule przeprowadzono optymalizację zbiórki odpadów z wykorzystaniem system immunologicznego oraz algorytmu Hierholzera dla stadium przypadku w małej miejscowości z gospodarstw domowych. |
| 4 | [133] | Porównanie algorytmów immunologicznego i genetycznego dla stadium przypadku wywozu odpadów z selektywnej zbiórki w województwie śląskim. Wyniki badania wskazują na większą efektywność algorytmu immunologicznego w rozwiązaniu stadium przypadku. |
| 5 | [134] | Badania zbiórki odpadów w Krakowie, w których wykorzystano model programowania mieszanego liniowego do optymalizacji tras z wykorzystaniem wielu pojazdów i z oknami czasowymi. Wyniki potwierdzają zasadność zastosowania proponowanego modelu do wyznaczania tras dla śmieciarek oraz doboru liczby pojazdów. Dla małego systemu zbiórki odpadów optymalne rozwiązanie uzyskuje się w ciągu kilku sekund. |
| 6 | [135] | Inna praca dla studium przypadku w Krakowie dotyczyła uproszczonej analiza wykorzystującej problem marszrutyacji. Uzyskano skrócenie tras pojazdów od 30% do ponad 50%, ale brano pod uwagę tylko cztery trasy. |
| 7 | [136] | W artykule wykorzystano programowanie liniowe i zbadano możliwość częściowego wprowadzania floty pojazdów zeroemisyjnych przy równoważeniu długości tras pojazdów. Po przeprowadzeniu badań modelowych wskazano na trudności do implementacji zaproponowanych metod dla bardzo dużych systemów ze względu na dużą liczbę zmiennych. |
| 8 | [128] | Model obliczeniowy z wykorzystaniem algorytmu komiwożera. Badania dotyczyły studium przypadku w Dęblinie i uzyskano skrócenie czasu obsługi zbiórki odpadów oraz długości trasy o około 15%. |

Tablica 2.5. cd.

| Lp. | Artykuł | Zakres badawczy |
|-----|---------|--|
| 9 | [137] | W pracy wybrano model matematyczny problemu do optymalizacji zbiórki odpadów komunalnych. Funkcja celu obejmowała minimalizację czasu realizacji tras oraz kosztów zużycia paliwa. Wykorzystano algorytm mrówkowy do rozwiązania wielokryterialnego problemu decyzyjnego. W celu sprawdzenia poprawności algorytmu mrówkowego jego wyniki porównano z wartościami losowymi. Algorytm mrówkowy w każdym przypadku generował lepsze rozwiązanie niż losowy algorytm. |
| 10 | [99] | W badaniu wykorzystano logikę rozmytą i algorytm genetyczny do optymalizacji tras i doboru liczby pojazdów przy zbiorce odpadów zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego na żądanie. |
| 11 | [138] | Zastosowanie wielokryterialnego wspomaganie decyzji w postaci systemu AHP i Promethee dla różnych wariantów zbiórki odpadów opon ukierunkowanych na efektywność ekonomiczną i ograniczenie emisji spalin. |
| 12 | [100] | Celem pracy była optymalizacja tras pojazdów zbierających odpady z wykorzystaniem algorytmów genetycznych i rozwiązaniem problemu efektywnego załadunku odpadów w przestrzeni ładunkowej pojazdów. |
| 13 | [139] | Porównanie algorytmów przeszukiwania tabu, symulowanego wyżarzania i poszukiwania harmonii w optymalizacji tras pojazdów zbierających odpady zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Uwzględniono dopuszczalną ładowność pojazdu w optymalizacji i uzyskano poprawę efektywności zbiórki od 5-13% w zależności od algorytmu. |
| 14 | [140] | Porównanie kilku metod zbiórki odpadów zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego z wykorzystaniem algorytmu immunologicznego z uwzględnieniem emisji spalin. |

2.5. Badania własne przygotowawcze do realizacji pracy doktorskiej

Wyniki badań przygotowawczych do realizacji rozprawy doktorskiej zostały zawarte w dziesięciu publikacjach naukowych. Zbiorczy wykaz publikacji zebrano w tablicy 2.6. W badaniach podjęto kilka istotnych dla transportu i zbiórki odpadów zagadnień. W jednym z pierwszych artykułów [141] scharakteryzowano zamiany w systemie zbiórki odpadów po wejściu w życie nowej ustawy o odpadach. Wprowadzona w 2013 roku nowelizacja ustawy wprowadziła wiele zmian, które objęły zarówno mieszkańców jak i firmy zajmujące się transportem i zbiórką odpadów. W wielu gminach wprowadzono zbiórkę kilku grup odpadów selektywnie zbieranych, dodano nowe kategorie odpadów np. popiół z palenisk domowych. Zmianie uległy również częstotliwości zbiórki odpadów należących do poszczególnych kategorii. Na przykładzie gminy wiejskiej wyznaczono efektywność prowadzenia zbiórki różnych kategorii odpadów, która

w ujęciu ekonomicznym jest różnicą pomiędzy przychodami a kosztami. Odnosząc się do uzyskanych wyników efektywności prowadzenia zbiórek można było wysunąć następujące propozycje usprawnienia zbiórek: zastosowanie optymalizacji tras z wykorzystaniem dostępnych narzędzi informatycznych wykorzystujących algorytmy heurystyczne oraz zakup pojazdów o większej pojemności przestrzeni ładunkowej.

W kolejnym artykule [142] przedstawiono wyniki prowadzenia zbiórek zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEE) w gminie miejskiej. Przeanalizowano dwa rodzaje zbiórek: stacjonarną (mieszkańcy przywożą odpady ZSEE do gminnego punktu) oraz zbiórkę mobilną (odbiór odpadów wzdłuż ulic wystawionych przed posesją lub rozmieszczenie pojazdów w lokalizacjach rozproszonych na terenie danej gminy). Zaproponowano sposób wyznaczenia kosztów prowadzenia zbiórek różnego typu oraz zmiany sposobu prowadzenia zbiórek celem poprawy ich efektywności.

Mając na uwadze, że jednym z głównych składników wpływających na koszt zbiórki odpadów jest czas oraz długość trasy w artykule [143] zaproponowano na przykładzie studium przypadku (Gliwice) wykorzystanie aplikacji do mapowania tras przejazdu pojazdów. Pozyskiwanie danych o przebiegu realizacji tras może posłużyć do lepszego planowania tras zbiórki odpadów. W artykule [144] przedstawiono model zbiórki odpadów wielkogabarytowych w oparciu o algorytm symulowanego wyżarzania. Odpady wielkogabarytowe stanowią jedną z grup odpadów, które zbierane są w sposób selektywny. W rozpatrywanym studium przypadku zbiórka odpadów odbywa się na zasadzie żądania odbioru przez mieszkańców w gminie Jastrzębie-Zdrój z wykorzystaniem danych z 2017 r. W przypadku dużej liczby zgłoszeń (punktów odbioru) rozmieszczonych na obszarze całego miasta konieczne jest właściwe zaplanowanie tras zbiórki oraz dobór odpowiedniego pojazdów. W wyniku przeprowadzonej optymalizacji tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych z zastosowaniem algorytmu sztucznej inteligencji uzyskano wymierne efekty. Skróceniu uległy parametry realizacji trasy tj. czas realizacji trasy oraz długość trasy. Na przykładzie analizowanych zbiórek oszczędności zawierały się w przedziale od 2% – 6,5%. Należy jednak podkreślić, że jednym z najistotniejszych czynników wpływających na utrudnienie znalezienia rozwiązania zbliżonego do optymalnego był brak dokładnych wymiarów odpadów wielkogabarytowych, które są trudne do uzyskania od osób zgłaszających odbiór.

W artykule [145] przedstawiono rezultaty analizy prowadzonych zbiórek odpadów różnych kategorii w gminach miejskich i gminie wiejskiej w województwie śląskim w latach 2014 - 2018. Wyniki określają wpływ istotnych czynników wpływających na całkowity koszt zbiórki, do których można zaliczyć koszty transportu, osobowe, a także administracyjne – w tym opłaty za korzystanie ze środowiska i opłata za zagospodarowanie odpadów na składowisku. Uwzględniono pojazdy, które mogą być wykorzystane do zbiórki z mając na uwadze ich ładowność oraz pojemności ładunkowej. W publikacji z 2020 r. [146] scharakteryzowano system transportu i zbiórki odpadów jako element systemu gospodarki. Rosnąca konsumpcja, a co za tym idzie wzrastająca ilość wytwarzanych odpadów stanowią duże wyzwanie organizacyjne i logistyczne w skali globalnej. Na właściwe funkcjonowanie systemu ma wpływ wiele czynników takich jak: właściwa edukacja społeczeństwa – prowadzenie skutecznych kampanii edukacyjno- informacyjnych, selektywna zbiórka różnych kategorii odpadów, dobór odpowiednich pojazdów do realizacji zbiórki odpadów różnych kategorii oraz wybór odpowiednich pojemników.

Zmiana sposobu prowadzenia zbiórek oraz rosnąca ilość odpadów powoduje, iż firmy odbierające odpady zmuszone są do nowego podejścia do zbiórki odpadów oraz doboru odpowiednich pojazdów. Było to celem kolejnych badań w których przeanalizowane zostały efekty wprowadzenia zmian w sposobach zagospodarowania i zbiórki odpadów ulegających biodegradacji [147]. W szczególności zestawiono efekty ekonomiczne oraz emisje związane z eksploatacją pojazdów wykorzystywanych w zbiórce. Wyznaczone zostały emisje spalin pojazdów, w szczególności PM i NO_x oraz CO₂. Przeprowadzona analiza pozwoliła na ocenę doboru rodzaju pojazdu do realizacji zbiórek. Przy zastosowaniu śmieciarek kompaktujących ograniczono negatywne oddziaływanie czynników na środowisko głównie tlenków azotu – NO_x. Dla zmniejszenia emisji PM i CO₂ korzystniejsze było wykorzystywanie pojazdów z zabudową skrzyniową przy zbiórce odpadów biodegradowalnych. Natomiast zastosowanie optymalizacji pozwoliło skrócić trasy pojazdów zbierających do 45% na przykładzie analizowanego studium.

Transport i zbiórka odpadów przez firmy odbierające odpady powinny zapewniać sprawną i niezawodną obsługę mieszkańców i przedsiębiorców. Zbieraniu odpadów towarzyszy wiele czynników związanych z czynnikami środowiskowymi i ekonomicznymi [148]. Oddziaływanie na środowisko naturalne zależne są od rodzaju

użytkowanego pojazdu, emisji spalin, masy i kategorii odpadów. Emisja spalin przyczynia się do powstawania niekorzystnych zjawisk smogowych, zwłaszcza w centrach miast, gdzie zbiórka musi być prowadzona z większą częstością. Firmy realizujące na zlecenie gmin zbiórkę odpadów powinny być wyposażone w systemy informatyczne umożliwiające efektywne planowanie wykorzystania pojazdów, w tym optymalizację tras, minimalizację liczby pojazdów do odbioru oraz zwiększenie masy odbieranych odpadów. W rezultacie tego można osiągnąć pewne korzyści dla środowiska osiągnięcia oraz w znacznym stopniu ograniczyć koszty prowadzenia zbiórek.

W artykule [149] zbadano energochłonność zbierania, transportu i przetwarzania odpadów komunalnych w celu wytworzenia paliwa pochodzącego z odpadów. Badanie przeprowadzono dla różnych kategorii odpadów. Wstępna obróbka odpadów wymaga kilku etapów przetwarzania, tak aby osiągnąć wymaganą jakość paliwa alternatywnego z odpadów - RDF (ang. - refuse derived fuel). Zaproponowana metoda badawcza obejmowała przepływ energii i materiałów odpadów dla różnych scenariuszy. Oceniono wartość opałową stałych odpadów komunalnych oraz przetworzonego paliwa z odpadów wielkogabarytowych. Obliczono również zużycie energii na każdym z etapów tj. zbierania, transportu, przeładunku i wstępnej obróbki odpadów komunalnych. Wyniki pokazują, że energochłonność transportu i przetwarzania jest zależna od kategorii odpadów. Dla odpadów wielkogabarytowych wynosi około 5% energii zawartej w masie jednostki transportowej - samochodu ciężarowego do cementowni, natomiast dla odpadów pochodzących ze stałych odpadów komunalnych wynosi 11%. Uzyskane wyniki pozwalają wskazać, która część łańcucha logistyki zwrotnej zużywa największą wartość energii.

Wraz z postępującym zanieczyszczeniem środowiska naturalnego oraz koniecznością ograniczania emisji szkodliwych gazów jedynym rozwiązaniem są pojazdy elektryczne [150]. W ostatnich latach producenci pojazdów oferują w pełni elektryczne pojazdy do zbiórki wybranych kategorii stałych odpadów komunalnych. W badaniu przeanalizowano wykorzystanie elektrycznych pojazdów do zbiórki odpadów zmieszanych i selektywnie zbieranych dla studium przypadku w Polsce. Wyniki pokazały, że w większości badanych z ziórek odpadów możliwa była zbiórka dla jednego ładowaniu akumulatora. Inne wnioski z badań wskazały na istotność zasięgu pojazdu oraz stan naładowania akumulatora przy planowaniu tras zbiórki odpadów dla pojazdu elektrycznego. W badaniu tym podkreślono korzyści płynące z bez emisyjnej zbiórki

odpadów na obszarach miejskich. Jednakże analiza kosztów wskazała na wysokie koszty zakupu pojazdu elektrycznego oraz problemy techniczne związane z infrastrukturą i serwisowaniem pojazdów.

Tablica 2.6. Wykaz zrealizowanych badań własnych i publikacji (opracowanie własne)

| Lp. | Artykuł | Zakres badawczy |
|-----|---------|---|
| 1 | [141] | W artykule przedstawiono problemy transportu odpadów w gminie wiejskiej. Scharakteryzowano koszty transportu odpadów różnych kategorii. |
| 2 | [142] | W artykule przedstawiono wyniki prowadzenia zbiórek zużytego sprzętu elektronicznego i elektrycznego (ZSEE). Prowadzone zbiórki mobilne okazały się efektywne umożliwiając mieszkańcom oddanie dużych ilości niebezpiecznych odpadów w postaci ZSEE. |
| 3 | [143] | W badaniach zaproponowano metodę zbierania danych o ruchu drogowym oraz aplikację do rejestracji danych, zmiennych czynników wpływających na prędkość pojazdów w miastach i aglomeracjach. Wykazano zastosowanie urządzeń opartych na GPS, wyposażonych w cyfrowe aplikacje mapujące do planowanie tras oraz kontroli. |
| 4 | [144] | W artykule zaprezentowano system wspomagający zbiórkę odpadów wielkogabarytowych w oparciu o algorytm symulowanego wyżarzania. Pozwala on na dobór pojazdów i optymalizację tras przejazdów z uwzględnieniem okien czasowych. |
| 5 | [145] | W studium przedstawiono rezultaty analizy prowadzonych zbiórek odpadów w gminach: wiejskiej i miejskich w województwie śląskim w latach 2014-2018. Wyniki zawierają wpływ istotnych czynników wpływających na całkowity koszt zbiórki, do których zaliczają się koszty transportu, osobowe, a także administracyjne w tym opłaty za korzystanie ze środowiska i opłata za zagospodarowanie odpadów na składowisku. |
| 6 | [146] | W rozdziale skupiono się na głównych metodach zbierania i transportu odpadów. Przedstawiono nowe rozwiązania w zakresie redukcji kosztów i automatyzacji zbiórki odpadów. |
| 7 | [147] | W artykule przedstawiono problemy transportu odpadów ulegających biodegradacji z gospodarstw domowych dla dwóch gmin wiejskich. Scharakteryzowano koszty zbiórki w zależności od sposobu gromadzenia oraz dobranego pojazdu. Wyznaczono emisje spalin przy prowadzeniu zbiórki według danych producentów pojazdów. |
| 8 | [148] | W opublikowanym rozdziale przedstawiono wgląd w wytwarzanie odpadów w Unii Europejskiej oraz szczegółowo opisano metody, cechy i wyniki zbiórki odpadów w gminach miejskich i wiejskich w Polsce. Negatywnymi czynnikami towarzyszącymi zbieraniu i transportowi odpadów są emisje spalin z pojazdów odbierających oraz hałas generowany podczas zbierania i załadunku niektórych kategorii odpadów. |
| 9 | [149] | W artykule zbadano energetyczny i materiałowy przepływ odpadów w różnych scenariuszach produkcji RDF z odpadów wielkogabarytowych, odpadów zbieranych selektywnie i mieszanych stałych odpadów komunalnych. Porównano udział zużycia energii w transporcie, postępowaniu z odpadami i przetwarzaniu na podstawie danych firmy odbierającej odpady. W modelu przepływu materiałów i energii uwzględniono odbiór i transport odpadów dwoma kategoriami pojazdów do zbiórki odpadów: samochodami dostawczymi i śmieciarkami. |

Tablica 2.6. cd.

| Lp. | Artykuł | Zakres badawczy |
|-----|---------|--|
| 10 | [150] | W badaniu scharakteryzowano wykorzystanie elektrycznych pojazdów do zbiórki odpadów zmieszanych i selektywnie zbieranych w studium przypadku w Polsce na obszarach miejskich i wiejskich. Poddano analizie koszty prowadzenia zbiórek pojazdem elektrycznym, oraz podkreślono korzyści płynące z bez emisyjnej zbiórki odpadów na obszarach miejskich. |

Planowanie tras to podstawowy element systemu zbiórki odpadów. W firmach zbierających odpady trasy zbiórki odpadów planowane są przez osoby zarządzające transportem. Przegląd literatury, a także wyniki badań przygotowawczych jednoznacznie wskazują na konieczność zastosowania systemów informatycznych do wspomaganie planowania tras. W celu rozpoznania w jakim stopniu zastosowanie systemów do planowania lub optymalizacji tras jest upowszechnione w przedsiębiorstwach zajmujących się zbiórką odpadów w ramach niniejszej dysertacji została przygotowana ankieta dla kadry zarządzającej firmami zbierającymi odpady. Ankieta objęła dziesięć przedsiębiorstw i uwzględniono w niej firmy o różnej wielkości. Wyniki badań ankietowych przedstawiono w tablicy 2.7. We wszystkich ankietowanych firmach osoby planujące trasy zbiórek odpadów bazują jedynie na swoim doświadczeniu. Wyniki ankiet wskazują jednocześnie, że w przedsiębiorstwach zbierających odpady nie są wykorzystywane żadne systemy optymalizacji tras oraz wspomaganie decyzji. Dotyczy to zarówno firm małych o lokalnym zasięgu, jak również dużych korporacjach. W wielu firmach jedynym narzędziem do śledzenia pojazdów oraz weryfikacji przejazdów tras jest system oparty na pozycjonowaniu satelitarnym GPS (ang. Global Positioning System).

Tablica 2.7. Zestawienie wyników badań ankietowych systemów zarządzania w firmach odbierających odpady (opracowanie własne)

| Lp. | Wielkość firmy | Zakres obsługi: ilość gmin wiejskich i miejskich, liczba obsługiwanych gospodarstw domowych | Liczba pojazdów do obsługi zadań | Czy wykorzystuje się systemy optymalizacji tras? | Czy wykorzystuje się systemy wspomaganie decyzji? |
|-----|----------------|---|----------------------------------|--|---|
| 1 | Mała | 1 gmina wiejska; 1 miejska; liczba gospodarstw – 12500 | 12 | Nie | Nie |
| 2 | Mała | 1 miejska; liczba gospodarstw – 11100 | 9 | Nie | Nie |
| 3 | Średnia | 3 gminy wiejskie; 2 miejskie; liczba gospodarstw – 18400 | 28 | Nie | Nie |

Tablica 2.7. cd.

| Lp. | Wielkość firmy | Zakres obsługi: ilość gmin wiejskich i miejskich, liczba obsługiwanych gospodarstw domowych | Liczba pojazdów do obsługi zadań | Czy wykorzystuje się systemy optymalizacji tras? | Czy wykorzystuje się systemy wspomaganie decyzji? |
|-----|----------------|---|----------------------------------|--|---|
| 4 | Średnia | 5 gmin wiejskich; 1 miejska; liczba gospodarstw – 15850 | 26 | Nie | Nie |
| 5 | Średnia | 6 gmin wiejskich; 1 miejska; liczba gospodarstw – 20000 | 27 | Nie | Nie |
| 6 | Średnia | 11 gmin wiejskich; 2 miejskie; liczba gospodarstw – 27200 | 35 | Nie | Nie |
| 7 | Średnia | 4 gminy wiejskie; 1 miejska; liczba gospodarstw – 27500 miejska; 4 wiejski; liczba gospodarstw 27500 | 35 | Nie | Nie |
| 8 | Duża | 3 gminy wiejskie; 3 miejskie; liczba gospodarstw – 77000 | 48 | Nie | Nie |
| 9 | Duża | 6 gmin wiejskich; 5 miejskich; liczba gospodarstw – 140000 | 72 | Nie | Nie |
| 10 | Duża | 5 gmin wiejskich; 4 miejskie; liczba gospodarstw – 97500 | 59 | Nie | Nie |

3. Cel badawczy, cel użyteczny, teza i zakres pracy

Przegląd literatury światowej, polskiej, prowadzone badania własne oraz wyniki badań w przedsiębiorstwach zajmujących się zbiórką odpadów na terenie Polski jednoznacznie wskazują na konieczność racjonalizacji i usprawnienia metod zbierania odpadów. Należy przy tym uwzględnić interdyscyplinarny charakter zbiórki odpadów, który obejmuje społeczeństwo – mieszkańców pozbywających się odpadów, firmy zbierające odpady wraz z wykorzystywanymi metodami składowania i transportu odpadów oraz uwarunkowania prawne i organizacyjne. Jednym ze sposobów wspomagania systemów zbiórki odpadów są systemy informatyczne służące do planowania i optymalizacji tras pojazdów uczestniczących w zbiórkach. Zastosowanie takich systemów w bezpośredni sposób wpływa na efektywność ekonomiczną zbiórki i transportu odpadów, umożliwienie zbiórki większej ilości odpadów i zmniejszenie negatywnych oddziaływań na środowisko naturalne poprzez ograniczenie emisji przez pojazdy uczestniczące w zbiórkach.

Cel badawczy pracy ukierunkowany jest na opracowanie modelu zbiórki i transportu odpadów z gospodarstw domowych z wykorzystaniem kilku wskaźników i mierników uwzględniających czynniki związane z ekonomią i ochroną środowiska. Wspomaganie głównego celu pracy jakim jest zwiększenie efektywności ekonomicznej zbiórki i transportu odpadów będzie oparte o wykorzystanie algorytmów sztucznej inteligencji. Po przeprowadzeniu optymalizacji tras będzie przeprowadzone porównanie mierników masy zebranych odpadów oraz emisji w trakcie transportu z wartościami uzyskanymi w trakcie realizacji zadań transportowych przed optymalizacją. Pozwoli to na ocenę zastosowanych metod do poprawy efektywności zbiórki i transportu odpadów.

Cel użyteczny pracy dotyczy zbadania efektów przeprowadzonych optymalizacji w warunkach rzeczywistych. Po opracowaniu nowych planów tras z wykorzystaniem modelu matematycznego zbiórki i wykorzystaniu wyników optymalizacji tras z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji zostaną przeprowadzone zbiórki odpadów według planów – po optymalizacji. Pozwoli to na weryfikację zastosowanego modelu i ocenę przydatności metody do dalszych zastosowań w firmach transportowych zajmujących się zbiórką odpadów.

Jednym z elementów gospodarki opartej na obiegu cyrkularnym jest zbiórka i transport odpadów. Celem jest udoskonalenie procesu przygotowania tras. Realizacja

tras łączy się z czynnikami ekonomicznymi oraz oddziaływaniem na środowisko. W związku z tym usprawnienie procesów zbiórki i transportu odpadów w znaczący sposób umożliwi zwiększenie efektywności zbiórki i transportu odpadów jak również przyczyni się do zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne.

Mając na uwadze wnioski wynikające z przeglądu literatury oraz prac i badań przygotowanych do realizacji niniejszej dysertacji sformułowano następującą tezę:

Zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji wpływa w sposób wymierny na poprawę efektywności procesów transportu i zbiórki odpadów komunalnych.

Zakres pracy obejmuje:

- charakterystykę zbiórek odpadów z uwypukleniem elementów związanych ze składowaniem i transportem odpadów,
- opracowanie modelu zbiórki i transportu odpadów pod kątem,
- zdefiniowanie modelu zbiórki odpadów za pomocą wskaźników efektywności zbiórki odpadów oraz mierników oddziaływania na środowisko naturalne,
- opracowanie modelu sieci transportowej i wykorzystanie algorytmu sztucznej inteligencji – przeszukiwania tabu i mrówkowego do optymalizacji tras,
- badania umożliwiające wyznaczenie wskaźników efektywności zbiórki oraz mierników oddziaływania na środowisko dla studium przypadku w województwie śląskim, obejmującym gminy o zabudowie zwartej i rozproszonej,
- badania będą obejmowały dwie kategorie odpadów selektywnie zbieranych z wykorzystaniem dwóch metod zbiórki według harmonogramu i na żądanie,
- badania i ocenę zastosowanych modeli matematycznych w warunkach rzeczywistych zbiórek odpadów,
- opracowanie wyników i ocenę zastosowanych metod i modelu.

4. Charakterystyka zbiórek odpadów w oparciu o prawodawstwo Unii Europejskiej oraz Ustawy o odpadach

Z uwagi na konieczność dostosowania prawa polskiego do standardów UE wynikających z wprowadzanych Dyrektyw Parlamentu Europejskiego Gospodarowanie odpadami reguluje Ustawa i rozporządzenia wykonawcze. Zmiany prawne spowodowały, że system prowadzenia zbiórek począwszy od 2012 do 2022 roku ulegał ciągłym zmianom. Gminy zostały zobowiązane do osiągania coraz wyższych poziomów przygotowania do ponownego użycia i recyklingu odpadów komunalnych począwszy od 20% masy zebranych odpadów w 2021 roku aż do 55% w 2025 roku.

Do głównych aktów prawnych – ustaw ustalających ramy dla całego systemu zbiórki i gospodarowania odpadami należy zaliczyć:

- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. z 2013 r. Nr 0, poz.21 ze zmianami),
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2008 r. Nr 25, poz.150 ze zmianami),
- Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz. U. Nr 199, poz. 1227, z późn. zm.),
- Ustawa z dnia 29 lipca 2005 r. o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym (Dz. U. z 2008 r. Nr 223 ze zmianami),
- Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. o opakowaniach i odpadach opakowaniowych (Dz. U. Nr 63, poz. 638 ze zmianami),
- Ustawa z dnia 24 kwietnia 2009 r. o bateriach i akumulatorach (Dz. U. Nr 79, poz. 666 ze zmianami),
- Ustawa z dnia 1 lipca 2011 r. o zmianie ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. 2011 nr 152 poz. 897 ze zmianami)

System gospodarowania odpadów wprowadzony w 2012 roku miał duże znaczenie dla firm zbierających odpady i mieszkańców. Zmiany można było zaobserwować na każdym z etapów funkcjonowania systemu – począwszy od etapu gromadzenia, przez zbiórkę, transport, aż do etapu przetwarzania i unieszkodliwiania odpadów. Wprowadzono system gromadzenia odpadów surowcowych w selektywnej

zbiórce – tj. tworzywa sztuczne, szkło, metale oraz papier i makulaturę w różnych metodach zbiórki (workowy oraz w kubłach o różnej pojemności). Dodano nowe kategorie odpadów np. bioodpady oraz popiół z palenisk domowych. Zmianie uległa również częstość prowadzenia zbiórek dla poszczególnych kategorii odpadów – z ogólnie przyjętej raz w miesiącu, na częstość uzależnioną pory roku (okres letni i zimowy). Wprowadzono wymóg – że zebrane odpady muszą być poddane recyklingowi w procesach przetwarzania, sortowania, a jedynie odpady resztkowe powinny zostać poddane procesom unieszkodliwiania.

Z kolei główne akty prawne Parlamentu Europejskiego i Rady określające zasady prowadzenia zbiórek oraz funkcjonowania systemu zawarto w następujących dyrektywach:

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/851 z 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2008/98/WE w sprawie odpadów (Dz.Urz. UE L z 2018 r. Nr 150, str. 109),
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/850 z 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 1999/31/WE w sprawie składowania odpadów (Dz.Urz. UE L z 2018 r. Nr 150, str. 100),
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/852 z 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 94/62/WE w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych (Dz.Urz. UE L z 2018 r. Nr 150, str. 141).

Dyrektywa (UE) 2018/851 wprowadza bardziej restrykcyjne zasady gospodarowania odpadami. Restrykcje dotyczą wszystkich uczestników system poczynawszy od firm transportowych, zakładów przetwarzających odpady jak i mieszkańców. Wskazuje ona również kierunki zmian systemu gospodarowania odpadami w kolejnych latach. W ramach dyrektywy zaostrza się przepisy dotyczące zapobiegania powstawaniu odpadów. Państwa członkowskie po wytworzeniu odpadów w pierwszej kolejności powinny podjąć środki mające na celu m.in. wspieranie zrównoważonych modeli produkcji i konsumpcji, zachęcać do projektowania, wytwarzania i korzystania z produktów, które są zasobooszczędne, trwałe, nadające się do naprawy, ponownego użycia i modernizacji. W Dyrektywie określono również nowe poziomy recyklingu odpadów komunalnych – do 2025 r. recykling odpadów komunalnych zostanie zwiększony wagowo do minimum 55%. Do 2030 r. poziom ten zostanie zwiększony do 60%, a do 2035 r. – do 65%. Ponadto państwa członkowskie

zostały zobligowane do wprowadzenia selektywnej zbiórki tekstyliów i odpadów niebezpiecznych z gospodarstwach domowych począwszy od 1 stycznia 2025 r. Dodatkowo, najpóźniej od 31 grudnia 2023 r. bioodpady mają być selektywnie zbierane lub poddawane recyklingowi u źródła np. poprzez kompostowanie [151].

4.1. Podział i kategorie odpadów komunalnych oraz metody ich zbierania

Głównym źródłem powstawania odpadów komunalnych są gospodarstwa domowe. Zgodnie z ustawą z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach odpady komunalne definiuje się jako: "Odpady powstające w gospodarstwach domowych, z wyłączeniem pojazdów wycofanych z eksploatacji, a także odpady niezawierające odpadów niebezpiecznych pochodzące od innych wytwórców odpadów, które ze względu na swój charakter lub skład są podobne do odpadów powstających w gospodarstwach domowych". Odpady komunalne są zróżnicowaną kategorią odpadów. Ich ilość oraz skład zależy w dużym stopniu od miejsca powstawania tj. rodzaju gminy – miejska, wiejska oraz rodzaju zabudowy – zabudowa jednorodzinna lub zwarta wielorodzinna. Odpady komunalne można podzielić na kilka najważniejszych kategorii [7]:

- zmieszane odpady komunalne,
- popioły z palenisk przydomowych,
- odpady biodegradowalne,
- odpady surowcowe: selektywnie zbierane opakowania z plastiku, metali, papieru, szkła.
- odpady w postaci wielomateriałowych opakowań,
- odpady niebezpieczne,
- zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny,
- odpady wielkogabarytowe,
- odpady remontowe.

Na terenie zabudowy zwartej wielorodzinnej wprowadzono niewymienny system zbiórki odpadów. W wspólnych punktach gromadzenia odpadów ustawiono specjalnie oznakowane pojemniki o odpowiedniej kolorystyce. Odpady zmieszane gromadzone są w pojemnikach np. o pojemności 1100 l, natomiast odpady segregowane w pojemnikach typu dzwon o pojemności 1500 l. Zasada funkcjonowania niewymiennego systemu zbiórki polega na opróżnianiu odpadów zgromadzonych w pojemnikach bezpośrednio

do przestrzeni ładunkowej pojazdów. Następnie pojemniki zostają ustawione na pierwotnym miejscu. Z kolei na terenie zabudowy jednorodzinnej występuje zarówno niewymienny jak i wymienny system zbiórki odpadów. Odpady zmieszane gromadzone są w pojemnikach o pojemności od 110 do 240 l., a odpady segregowane w workach o pojemności od 80 do 120 l. W zabudowie jednorodzinnej dla zbiórki odpadów zmieszanych podobnie jak w przypadku zabudowy zwartej wielorodzinnej wprowadzono niewymienny system zbiórki. Wymienny system zbiórki odpadów natomiast, wprowadzono dla zbiórki odpadów segregowanych. W systemie tym następuje odbiór pełnych worków z odpadami segregowanymi i pozostawienie w ich miejsce pustych worków na wymianę.

Omówione systemy zbiórki odpadów wymagają doboru odpowiednich pojazdów. W systemie niewymiennym wykorzystuje się w zależności od kategorii odbieranych odpadów różne pojazdy. Do zbiórki odpadów zmieszanych stosowane są pojazdy specjalistyczne typu śmieciarka o różnej dopuszczalnej masie całkowitej (DMC). Pojazdy wyposażone są w urządzenie kompaktujące, które zagęszczają zebrane odpady umożliwiając załadunek większej ilości odpadów. Odpady segregowane odbierane są pojazdami ciężarowymi z HDS. Opróżnienie odpadów z pojemnika następuje przez otwarcie dolnej kłapy i wysypanie odpadów do przestrzeni ładunkowej. Do realizacji wymiennego systemu zbiórki stosuje się pojazdy z zabudową skrzyniową. Odpady w workach układane na przestrzeni ładunkowej aż do momentu zapełnienia pojazdu [152].

Na rysunku 4.1. przedstawiono sposoby gromadzenia odpadów w zależności od rodzaju zabudowy i systemu zbiórki. Odpady zmieszane gromadzone są we wspólnych punktach gromadzenia w pojemnikach o pojemności 1100 l. . Odpady segregowane w pojemnikach typu dzwon o pojemności 1500 l. Na terenie zabudowy jednorodzinnej odpady segregowane gromadzone są w workach o różnej kolorystyce tj. worki żółte – tworzywa sztuczne, niebieskie – papier i makulatura, zielone - szkło. Odpady o małych gabarytach odbierane są w systemie wymiennym lub niewymiennym. Natomiast odpady wielkogabarytowe lub zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny odbierany jest na żądanie – na zasadzie wystawienia odpadów przed posesję, potocznie nazywany jako „wystawka”. Mieszkańcy dokonują zgłoszenia odbioru np. w urzędzie miasta lub bezpośrednio w firmie zbierającej odpady. W firmie wywozowej dyspozytorzy dokonują podziału zgłoszeń na poszczególne samochody przydzielając na każdy samochód określoną ilość punktów odbioru. Następnie przygotowuje się plan przejazdu

dla danego obszaru. Po przydzieleniu punktów odbioru dla poszczególnych pojazdów następuje zbiórka odpadów. Do zbiórki odpadów wystawianych na zasadzie wystawki stosuje się pojazdy z zabudową skrzyniową o DMC do 3,5 tony.

a)



b)

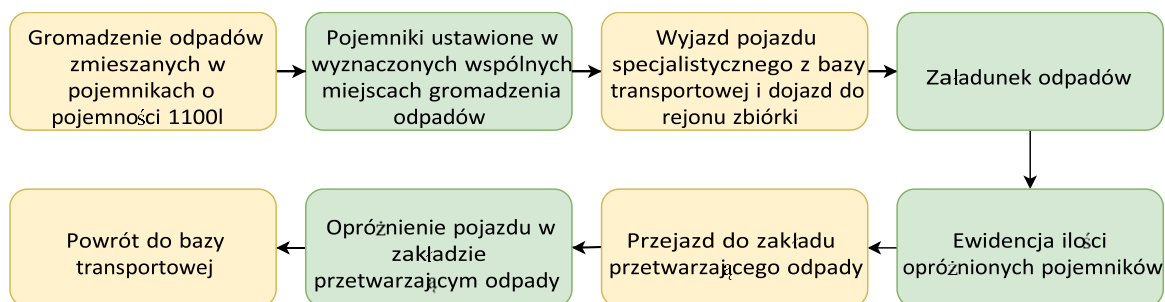


Rys. 4.1. Systemy gromadzenia odpadów w zależności od typu zabudowy: a) system niewymienny w zabudowie zwartej wielorodzinnej, b) system wymienny w zabudowie jednorodzinnej (opracowanie własne)

4.2. Zbiórka, transport i zagospodarowanie odpadów z gospodarstw domowych – kluczowe ogniwa łańcucha logistyki zwrotnej

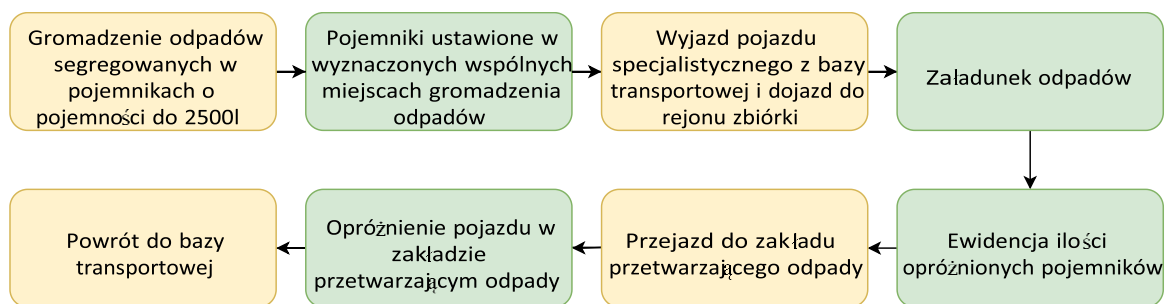
Zgodnie z założeniami zawartymi w ustawie o odpadach, system gospodarowania odpadami należy prowadzić w sposób zapewniający ochronę życia i zdrowia ludzi oraz środowiska. Uwzględniając wytyczne zawarte w Dyrektywie o odpadach, system gospodarki odpadami powinien być zorganizowany, zapewniać zapobieganie, ograniczenie i minimalizację wytwarzania odpadów [153].

Ogólne zasady systemów wymiennego i niewymiennego zostały przedstawione w rozdziale 4.1, natomiast w tym rozdziale zawarto szczegółową charakterystykę poszczególnych etapów. System zbiórki odpadów różni się w zależności od rodzaju zabudowy oraz kategorii zbieranych odpadów. Składa się on z kilku etapów. Etapy zbiórki odpadów zmieszanych na terenie zabudowy zwartej wielorodzinnej przedstawiono na rysunku 4.2. W zabudowie zwartej wielorodzinnej stosowany jest niewymienny system zbiórki odpadów.



Rys. 4.2. Etapy zbiórki odpadów zmieszanych na terenie zabudowy wielorodzinnej zwartej w gminie miejskiej (opracowanie własne)

Odpady segregowane odbierane są w systemie niewymiennym. Etapy zbiórki przedstawiono na rysunku 4.3. Odpady segregowane zbierane są pojazdami ciężarowymi z HDS.

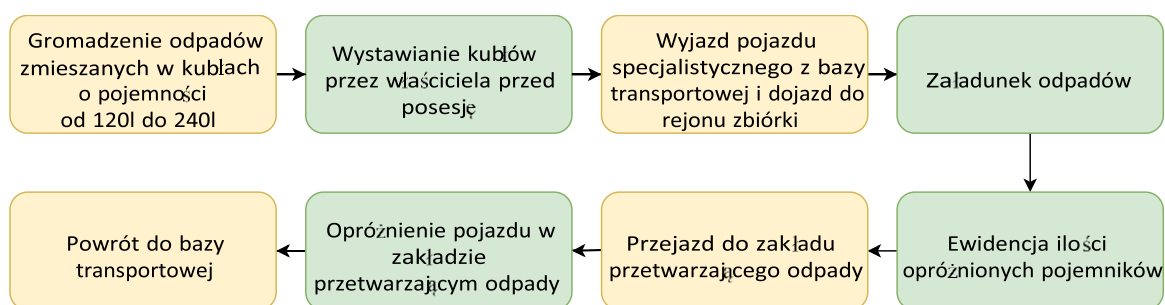


Rys. 4.3. Etapy zbiórki odpadów segregowanych na terenie zabudowy wielorodzinnej zwartej w gminie miejskiej (opracowanie własne)

Zarówno dla odpadów zmieszanych jak i segregowanych (rys. 4.2 i rys. 4.3) poszczególne etapy łańcucha logistyki zwrotnej dla zabudowy wielorodzinnej zwartej w gminie miejskiej są takie same. Odpady zmieszane i segregowane gromadzone są w pojemnikach o różnej pojemności we wspólnych punktach gromadzenia, a następnie opróżniane do przestrzeni ładunkowej pojazdów. Po napełnieniu pojazdu odpady są

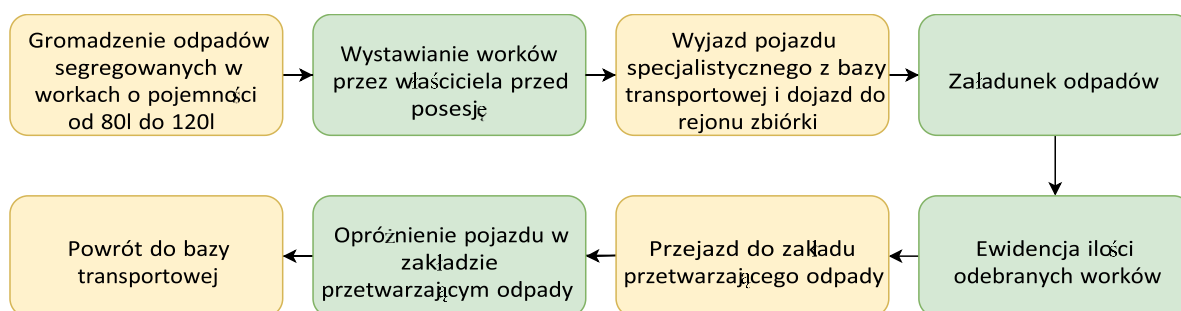
wywożone do zakładu przetwarzania. Każdy pojazd po opróżnieniu wraca do punktu, w którym zakończył obsługę, żeby kontynuować zbiórkę.

W zabudowie jednorodzinnej zbiórka odpadów realizowana jest zarówno w systemie wymiennym jak i niewymiennym. Na rysunku 4.4 przedstawiono etapy zbiórki odpadów zmieszanych w systemie wymiennym. Gromadzenie odpadów odbywa się na posesji właściciela w pojemnikach o pojemności od 120 l do 240 l dostosowanej do liczby zamieszkujących osób.



Rys. 4.4. Etapy zbiórki odpadów zmieszanych na terenie zabudowy jednorodzinnej w gminie wiejskiej (opracowanie własne)

Dla zbiórki odpadów segregowanych realizowany jest wymienny system zbiórki odpadów. Etapy zbiórki odpadów segregowanych przedstawiono na rysunku 4.5. Podczas odbioru odpadów segregowanych zgromadzonych w workach pracownik pozostawia na wymienną w miejsce pełnych taką samą ilość worków pustych.



Rys. 4.5. Etapy zbiórki odpadów segregowanych na terenie zabudowy jednorodzinnej w gminie wiejskiej (opracowanie własne)

Dla każdej ze zbiórek należy dobrać pojazdy oraz uwzględnić specyfikę gromadzenia odpadów. Na terenie zabudowy jednorodzinnej zbiórkę prowadzi się wzdłuż ulic. Obszar gminy dzieli się na rejonów wywozowe. W skład tych rejonów wchodzi określona liczba ulic przylegających do siebie z określoną ilością punktów – posesji.

Pojazdy dokonują przejazdu przez wszystkie wyznaczone ulice odbierając odpady z kolejnych ulic. Po wypełnieniu przejeżdżają do zakładu przetwarzającego odpady. Natomiast w zabudowie wielorodzinnej dominuje odbiór odpadów wg punktów, w których gromadzone są odpady (rys. 4.5). Obszar zabudowy zwartej wielorodzinnej zwartej dzieli się obszarowo również na rejony wywozowe z tym, że w skład rejonu wchodzi określona ilość punktów odbioru. Pojazdy dokonują odbioru odpadów przejeżdżając z punktu do punktu, aż do wypełnienia. Po wypełnieniu przejeżdżają do zakładu przetwarzającego odpady. Po opróżnieniu wracają do obsługi kolejnych punktów.

4.3. Wspomaganie wymiarowania i parametryzacji systemów zbiórki odpadów komunalnych

Projektowanie systemów zbiórki odpadów opiera się na określeniu kilku podstawowych parametrów dotyczących obszaru, mieszkańców oraz prognozowanej masy odpadów. Parametry można podzielić na kilka grup, a szczegółowy opis składowych systemu zawarto w tabelicy 4.1.

Tablica 4.1. Parametry systemu gospodarki odpadami (opracowanie własne)

| Grupa parametrów | Parametry należące do danej grupy |
|---|--|
| Parametry dotyczące obszaru | Powierzchnia obszaru zbiórki [km ²] np. powierzchnia gminy |
| Parametry dotyczące długości dróg | Długość dróg [km] z uwzględnieniem rodzaju dróg: gminnych, wojewódzkich, powiatowych, prywatnych |
| | Długość dróg [km] o ograniczonej nośności np. do 3,5 tony |
| Parametry dotyczące mieszkańców i miejsc zamieszkania | Ogólna liczba osób objętych systemem np. liczba mieszkańców |
| | Liczba osób ze zadeklarowanym uczestnictwem w selektywnej zbiórce |
| | Liczba osób z zadeklarowanym brakiem uczestnictwa w selektywnej zbiórce |
| | Liczba nieruchomości, na których powstają odpady komunalne |
| | Liczba nieruchomości z niezadeklarowaną selektywną zbiórką odpadów |
| | Liczba nieruchomości z zadeklarowanym kompostowaniem bioodpadów |
| | Liczba nieruchomości o utrudnionym dojeździe |
| | Sumaryczna masa zbieranych odpadów w [kg] |
| | Masa poszczególnych kategorii odpadów w [kg] |

Kolejnymi składowymi projektowanego systemu zbiórki odpadów jest określenie, kategorii odpadów, pojemników do gromadzenia oraz określenie częstości zbiórek

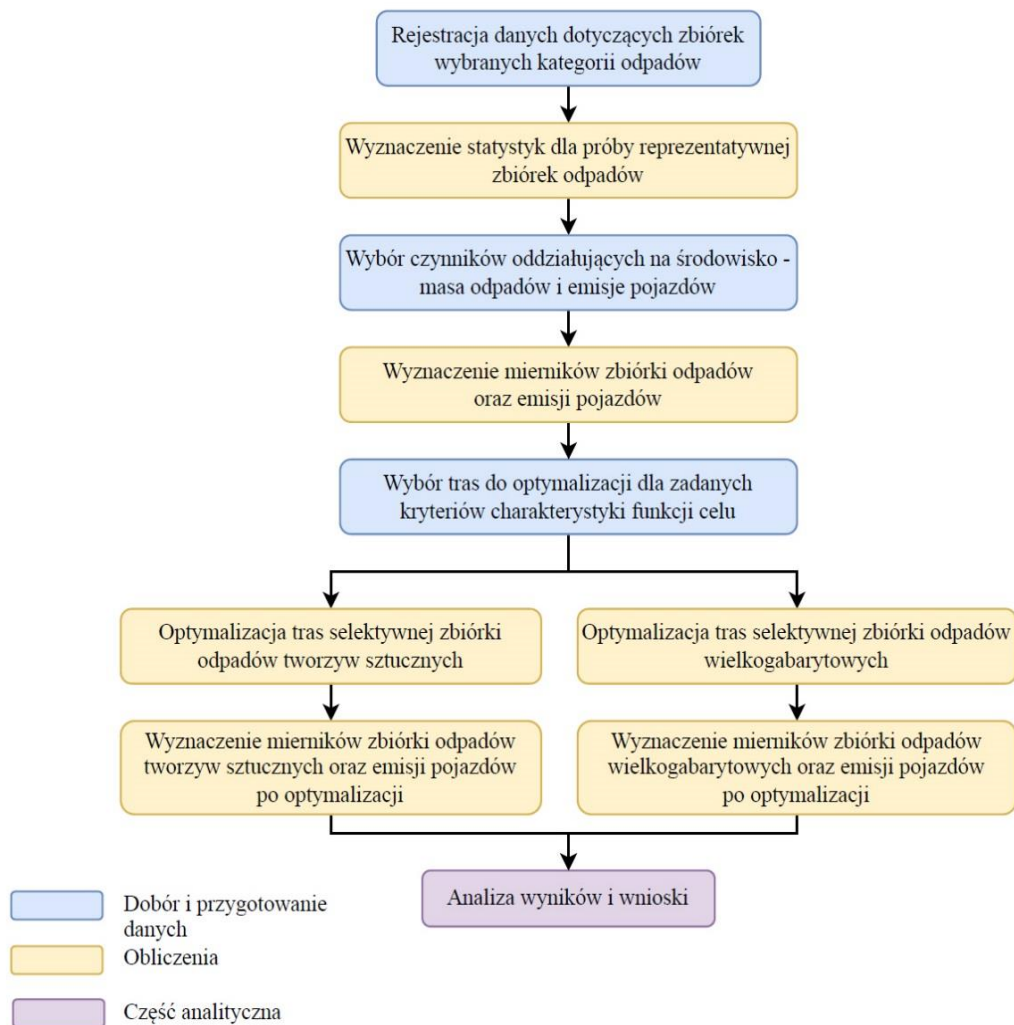
poszczególnych kategorii odpadów. Ważne jest wyznaczenie wszystkich parametrów obszarowych z uwzględnieniem, podziału zabudowy na zabudowę zwartą wielorodzinną oraz zabudowę jednorodziną, ponieważ w poszczególnych typach zabudowy stosuje się odmienny sposób prowadzenia zbiórek. Odpady w zabudowie wielorodzinnej są gromadzone w wspólnych punktach gromadzenia, w pojemnikach o większej pojemności oraz odbierane są z większą częstością. Natomiast w zabudowie jednorodzinnej odpady gromadzone są na posesji, w pojemnikach o mniejszej pojemności lub workach. Odbierane są one z mniejszą częstością. System zbiórki odpadów musi obejmować kilka podstawowych kategorii odpadów odbieranych bezpośrednio z miejsc gromadzenia. Zaliczają się do nich: zmieszane odpady komunalne, popioły z palenisk domowych, odpady segregowane (tworzywa sztuczne, papier, makulatura, szkło, odpady wielkogabarytowe) oraz odpady niebezpieczne (zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny). W każdym systemie zbiórki w zależności od rodzaju zabudowy, sposobu gromadzenia odpadów jak i kategorii odpadu dobiera się odpowiednie pojazdy. Do zbiórek wykorzystuje się różne pojazdy samochodowe: pojazdy specjalistyczne dwu- i trzyosiowe, typu śmieciarka, pojazdy z zabudową skrzyniową oraz pojazdy ciężarowe z HDS.

Do kosztów obsługi systemów zbiórki odpadów można zaliczyć koszty bezpośrednio związane ze zbiórką odpadów oraz koszty pozostałe. Do kosztów bezpośrednich należy zaliczyć koszty zbiórki (transportu, osobowe: kierowców i pracowników fizycznych oraz utrzymania pojazdów). W kosztach transportu bardzo istotną rolę odrywa jednostkowa cena paliwa zł/litr. Do kosztów pozostałych zaliczane są koszty przetwarzania i zagospodarowania odpadów, administracyjne obsługi systemu oraz inne ogólne.

5. Założenia modelowe optymalizacji zbiórki i transportu odpadów z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji

Zakres badań realizowanych w niniejszej dysertacji obejmuje analizę zbiórki odpadów selektywnych w wybranych gminach województwa śląskiego. Ze względu na specyfikę zbiórek, która jest realizowana dla różnych kategorii odpadów, różnymi pojazdami, w kilku typach zabudowy i sieci drogowej niezbędne jest przeprowadzenie analizy głównych czynników charakteryzujących zbiórki. Dla zbiórek odpadów istnieje wiele wskaźników i mierników, które pozwalają na ocenę wykonywanych odbiorów odpadów pod kątem ekonomicznym, technicznym, eksploatacyjnym, a nawet społecznym [23], [60], [67], [68]. Zakres badań z uwzględnieniem wszystkich wspomnianych wyżej czynników przekracza ramy tej dysertacji i z tego względu dokonano wyboru metody badawczej w celu uzyskania wyników niezbędnych do analizy i oceny zbiórek odpadów.

Zadania badawcze będą realizowane według schematu zawartego na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Schemat realizacji części badawczej w dysertacji (opracowanie własne)

Zaproponowany schemat uwzględnia założenia prac badawczych realizowanych od 2016 r, a w niniejszej dysertacji zakres badań został usystematyzowany i rozszerzony w celu umożliwienia kompleksowej oceny efektywności zbiórki odpadów komunalnych ze wspomaganie algorytmów sztucznej inteligencji.

Pierwszym etapem zrealizowanym w pracy było opracowanie podstawowych parametrów charakteryzujących zbiórki odpadów dostępnych z ewidencji i zapisów prowadzonych przez przedsiębiorstwo transportowe, z którego pozyskano dane. Ze zbioru wszystkich wykonywanych tras prowadzonych na obszarze gmin miejskich i wiejskich dobrano próbę reprezentatywną charakteryzującą populację wszystkich zbiórek w obsługiwanym obszarze. Na tej podstawie wyznaczane zostały podstawowe statystyki, pod kątem oceny wybranych czynników. Ze względu na konieczność ograniczania negatywnego wpływu na środowisko naturalnego oraz ograniczenia kosztów, do szczegółowych analiz przyjęto wskaźnik efektywności ekonomicznej zbiórki i transportu odpadów oraz miernik masy zbieranych na jednostkę długości trasy, który jest wyrażony w [kg/km] oraz miernik masy zebranych odpadów na jednostkę czasu wyrażony w [kg/godz.] . Mierniki oddziaływania na środowisko wyznaczone są na podstawie analizy emisji powstających przy spalaniu paliw przez pojazdy uczestniczące w zbiórce. Wybrane zostały trzy czynniki związane z emisjami: dwutlenek węgla - CO₂, tlenki azotu - NO_x oraz pył zawieszony – PM. Są to czynniki powodujące wzrost stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze (pierwszy czynnik) oraz pogorszenie jakości powietrza zwłaszcza w obszarach miejskich i będących szkodliwymi dla zdrowia (dwa pozostałe) [154], [155].

Po wyznaczeniu statystyk dla reprezentatywnej próby zbiórek odpadów selektywnych, wybrany zostanie zbiór tras dla dokładniejszej analizy. Dane dla wybranych tras będą zbierane dla powtórzeń ich realizacji w celu uśrednienia wyników z różnych przejazdów. Ze względu na różne kategorie odpadów odbierane z gospodarstw domowych, do badań wybrane zostały trasy zbiórek odpadów tworzyw sztucznych oraz odpadów wielkogabarytowych. Następnie przeprowadzono optymalizację tras pojazdów uczestniczących w zbiórkach. Celem optymalizacji jest minimalizacja czasu i długości trasy, a po ich przeprowadzeniu następuje wyznaczenie zmodyfikowanej sekwencji odbioru odpadów z punktów gromadzenia (gospodarstw domowych). Skrócenie długości trasy przejazdu wpływa na zmniejszenie zużycia paliwa, a z tym się wiąże zmniejszenie emisji CO₂, PM i NO_x. Jednocześnie skrócenie czasu wykonywania zbiórki umożliwia

planistom zwiększenie liczby punktów odbioru odpadów. W konsekwencji uzyskuje się odciążenie środowiska naturalnego poprzez zwiększenie masy odpadów nadających się do odzysku, a w szczególności do recyklingu. Odpady odbierane przez firmy zbierające są efektywnie przetwarzane w procesie recyklingu lub odzysku energetycznego.

Przy zbiórce odpadów tworzyw sztucznych optymalizacja tras opierać się będzie o problem komiwożera i jego rozwinięcie jako problem marszrutyzacji. Zbiórka odpadów wielkogabarytowych przy opisie modelu i obliczeniach będzie poszerzona o okna czasowe jako dodatkowe ograniczenie. Do optymalizacji tras zostaną wykorzystane algorytmy sztucznej inteligencji. W tej dysertacji wybrane zostały algorytmy przeszukiwania tabu i mrówkowy, które jak wykazał przegląd literatury dały wymierną poprawę efektywności transportu. Do obliczeń wykorzystany zostanie system informatyczny opracowany na Politechnice Śląskiej, który został pozytywnie zweryfikowany w kilku publikacjach i w warunkach testowych planowania tras rzeczywistych. Po optymalizacji tras wyznaczone zostaną mierniki estymowane dla skróconych tras pojazdów, które wskazują na potencjał zmniejszenia negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Uzyskane wyniki zostaną poddane sprawdzeniu w warunkach rzeczywistych przy realizacji tras przez kierowców dla wybranych tras i posłużą do oceny zastosowanej metody badawczej.

5.1. Wyznaczanie wskaźników efektywności zbiórki odpadów oraz mierników oddziaływania na środowisko naturalne

Dla oceny procesów zbiórki i transportu odpadów wprowadzony został wskaźnik efektywności ekonomicznej (1). Ze względu na specyfikę prowadzenia zbiórki odpadów należy uwzględnić składowe wpływające na przychody i koszty dla każdej z wykonywanych tras przez pojazdy zbierające odpady [145]. Należy zwrócić uwagę, że przedsiębiorstwa transportowe nie mają wpływu na rynkową cenę surowców wtórnych. Z tego względu składowa znajdująca się w liczniku jest zdeterminowana przez aktualną cenę skupu surowców. Czynnikiem, który może być modyfikowany bezpośrednio przez firmy transportowe zajmujące się zbiórką odpadów jest liczba obsłużonych punktów odbioru, a co się z tym wiąże masa zebranych odpadów. Zwiększenie liczby odwiedzonych punktów odbioru będzie konsekwencją optymalizacji tras pojazdów zbierających, która zostanie scharakteryzowana w dalszej części tego

rozdziła. Funkcja celu będzie minimalizowała długości trasy, a co za tym idzie minimalizowała zużycia paliwa. W ten sposób wartość mianownika będzie mniejsza. Wskaźnik efektywności ekonomicznej jest wyrażony za pomocą wzoru (1), w którym głównymi składowymi są przychody i koszty.

$$W_e^{s,r,z} = \frac{\sum_i^m \sum_j^k p_i f_j}{\sum_{n(s)=1}^{\bar{N}(s)} k_{n(s)} + \sum_{n(r)=1}^{\bar{N}(r)} k_{n(r)} + \sum_{z=1}^g k_z} \quad (1)$$

gdzie:

$W_e^{s,r,z}$ – wskaźnik efektywności ekonomicznej transportu odpadów pojazdem s ,
 składowania w kontenerze/pojemniku r i wykorzystania zasobów ludzkich z ,
 p_i – przychód z zebranej masy w i -tej lokalizacji [PLN],
 f_j – procentowa zawartość surowca j w masie zebranych odpadów,
 m – liczba obsłużonych punktów zbiórki,
 s – numer typu pojazdu,
 $n(s)$ – numer składowej kosztu zbiórki dla typu pojazdu s ,
 $N(s) = \{n(s) : 1, \dots, \bar{N}(s)\}$ – zbiór numerów składowych kosztów dla s -tego typu pojazdu,
 $\bar{N}(s)$ – liczba składowych kosztów dla s -tego typu pojazdu,
 $k_{n(s)}$ – wartość składowej kosztu o numerze $n(s)$ wyznaczone dla pojazdu s do zbiórki
 wyrażona w [PLN],
 r – numer typu kontenera/pojemnika,
 $n(r)$ – numer składowej kosztów zbiórki dla kontenera/pojemnika r ,
 $N(r) = \{n(r) : 1, \dots, \bar{N}(r)\}$ – zbiór numerów składowych kosztów dla r -tego
 kontenera/pojemnika,
 $\bar{N}(r)$ – liczba składowych kosztów dla r -tego kontenera/pojemnika,
 $k_{n(r)}$ – wartość składowej kosztu o numerze $n(r)$ wyznaczone dla kontenera/pojemnika r
 wyrażona w [PLN],
 g – liczba osób wyznaczonych do zbiórki,
 k_z – wartość kosztu płacy pracowników [PLN].

Do wyznaczenia głównych czynników oddziaływania na środowisko przy zbiórce i transporcie odpadów przyjęto dwie kategorie mierników. W pierwszej kategorii znajdują się mierniki masy zebranych kategorii odpadów. W drugiej kategorii znajdują się mierniki emisji produktów spalania paliw. Wybrany został miernik emisji CO₂ oraz dwóch szkodliwych dla zdrowia ludzi i środowiska substancji – PM oraz mieszaniny tlenków azotu NO_x [145].

Mierniki masy zebranych odpadów opisują ilość masy odpadów zebranych na jednostkowym odcinku drogi oraz na jednostkę czasu. Masa zebranych odpadów,

zwłaszcza z podziałem na odpowiednie kategorie, wpływa bezpośrednio na środowisko naturalne. Przy wysokim stopniu czystości odpadów, po wstępnej segregacji u źródła, otrzymuje się frakcję o dobrej jakości nadającej się do recyklingu. Przy niewłaściwie prowadzonej zbiórce frakcje mogą być zmieszane, co wpływa bezpośrednio na jakość surowców sprzedawanych do zakładów recyklingowych. W takim wypadku firmy odbierające odpady do dalszego przetwarzania oferują niższą cenę skupu. Niewłaściwie prowadzona zbiórka może też zachęcać mieszkańców do niewłaściwego pozbywania się odpadów i porzucania ich na terenach zielonych, w lasach, na łąkach itp. [146]. Z tego względu zwiększenie wartości tego miernika jest pożądane. Dotyczy to zwłaszcza kategorii odpadów zawierających substancje niebezpieczne np. zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego [156].

Pojazdy realizują zaprojektowaną trasę zatrzymując się w zadanych miejscach i opróżniają kontenery lub odbierają worki z odpadami. Miernik masy zebranych odpadów zbieranych na jednostkę odległości jest wyznaczony z zależności (2) i jest wyrażony w [kg/km]:

$$M_{mo}^s = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{n(s)=1}^{\bar{N}(s)} m_{i,n(s)}}{\sum_{n(s)=1}^{\bar{N}(s)} l_{n(s)}} \quad [\text{kg/km}] \quad (2)$$

gdzie:

M_{mo}^s – miernik zbiórki kategorii odpadów pojazdem s ,

k – liczba worków/kontenerów w punkcie odbioru odpadów,

$m_{i,n(s)}$ – masa zebranych odpadów dla i -tej liczby odbieranych worków/kontenerów w kolejnym punkcie odbioru należącym do zbioru $N(s)$,

s – numer typu pojazdu,

$n(s)$ – numer odcinka trasy zbiórki dla typu pojazdu s ,

$N(s) = \{n(s) : 1, \dots, \bar{N}(s)\}$ – zbiór numerów punktów odbioru odpadów dla s -tego typu pojazdu,

$\bar{N}(s)$ liczba punktów odbioru dla s -tego typu pojazdu,

$l_{n(s)}$ – odległości pomiędzy poszczególnymi punktami odbioru odpadów wyznaczone dla s -tego typu pojazdu do zbiórki [km].

Miernik masy odpadów zebranych w czasie prowadzenia zbiórki jest wyrażony wzorem (3). Umożliwia on wyznaczenie masy zbieranych odpadów w jednostce czasu transportu i zbiórki odpadów. Jest to drugi miernik umożliwiający ocenę efektywności zbiórki. Przy skróceniu czasu wykonywanych zbiórek możliwe jest uwzględnienie dodatkowych punktów odbioru odpadów dla zmiany pracowniczej.

$$M_{mt}^s = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{n(s)=1}^{\bar{N}(s)} m_{i,n(s)}}{\sum_{n(s)=1}^{\bar{N}(s)} t_{n(s)}} \quad [\text{kg/godz.}] \quad (3)$$

gdzie:

M_{mo}^s – miernik zbiórki kategorii odpadów pojazdem s ,

k – liczba worków/kontenerów w punkcie odbioru odpadów,

$m_{i,n(s)}$ – masa zebranych odpadów dla i -tej liczby odbieranych worków/kontenerów w kolejnym punkcie odbioru należącym do zbioru $N(s)$,

s – numer typu pojazdu,

$n(s)$ – numer odcinka trasy zbiórki dla typu pojazdu s ,

$N(s) = \{n(s) : 1, \dots, \bar{N}(s)\}$ – zbiór numerów punktów odbioru odpadów dla s -tego typu pojazdu,

$\bar{N}(s)$ – liczba punktów odbioru dla s -tego typu pojazdu,

$t_{n(s)}$ – czasy przejazdu pomiędzy poszczególnymi punktami odbioru odpadów wyznaczone dla s -tego typu pojazdu do zbiórki [km].

Mierniki emisji będą w bezpośredni sposób zależały od zużytego paliwa w trakcie prowadzenia zbiórki i transportu odpadów. Z tego względu optymalizacja długości trasy będzie bezpośrednio wpływała na ograniczenie emisji poprzez skrócenie trasy. Dwutlenek węgla powstający w procesie spalania paliw samochodowych zaliczany jest do gazów cieplarnianych. Podawany w literaturze wpływ na środowisko naturalne ma charakter długofalowy [157], [158]. Dodatkowo wiąże się to z kosztami, które w postaci opłat nakładane są na firmy, których urządzenia i maszyny emitują dwutlenek węgla. Wprowadzony w niniejszej pracy doktorskiej miernik emisji CO₂ będzie wyrażony za pomocą wzoru (4). Przyjęta jednostka wyrażona w [g] i jest uzależniona od długości trasy pokonanej przez pojazd typu (s) zbierający odpady.

$$M_{CO_2}^s = \frac{\sum_{i=1}^k E_{CO_2 i}}{\sum_{n(s)=1}^{\bar{N}(s)} l_{i(s)}} \quad [\text{g}] \quad (4)$$

gdzie:

$M_{CO_2}^s$ – miernik emisji CO₂ przy wykonywaniu zbiórki odpadów pojazdem s ,

E_{CO_2} – masa emisji jednostkowej CO₂ przy przejeździe do i -tego punktu odbioru odpadów [g/km],

s – numer typu pojazdu

$n(s)$ – numer odcinka trasy zbiórki dla pojazdu s ,

$N(s) = \{n(s) : 1, \dots, \bar{N}(s)\}$ – zbiór numerów punktów odbioru odpadów dla s -tego typu pojazdu,

$\bar{N}(s)$ – liczba punktów odbioru odpadów dla s -tego typu pojazdu,

$l_{i(s)}$ – odległości pomiędzy poszczególnymi punktami odbioru odpadów wyznaczone dla pojazdu s do zbiórki [km].

Kolejne produkty spalania paliw w silnikach spalinowych pojazdów, wybrane do analizy w ramach tej dysertacji, mają negatywny wpływ oddziaływania na środowisko naturalne o charakterze krótkoterminowym [159]–[161]. Zaliczają się do nich pyły zawieszane o różnej wielkości cząstek w szczególności 2,5 i 10 nm oraz tlenki azotu NO_x . Biorąc pod uwagę wysoki udział tych produktów spalania w obniżeniu poziomu jakości powietrza, w szczególności w miastach, w pracy zostały wyznaczone mierniki emisji dla tlenków azotu i pyłu zawieszonego według zależności (5) i (6).

$$M_{NO_x}^s = \frac{\sum_{i=1}^k E_{NO_x i}}{\sum_{n(s)=1}^{\bar{N}(s)} l_{i(s)}} \quad [g] \quad (5)$$

gdzie:

$M_{NO_x}^s$ – miernik zbiórki kategorii odpadów pojazdem s ,

E_{NO_x} – masa emisji jednostkowej NO_x przy przejeździe do i -tego punktu odbioru odpadów [g/km],

s – numer typu pojazdu,

$n(s)$ – numer odcinka trasy zbiórki dla pojazdu s ,

$N(s) = \{n(s) : 1, \dots, \bar{N}(s)\}$ – zbiór numerów punktów odbioru odpadów dla s -tego typu pojazdu,

$\bar{N}(s)$ – liczba punktów odbioru odpadów dla s -tego typu pojazdu,

$l_{i(s)}$ – odległości pomiędzy poszczególnymi punktami odbioru odpadów wyznaczone dla pojazdu s do zbiórki [km].

Miernik emisji PM zostanie wyznaczony z zależności (6):

$$M_{PM}^s = \frac{\sum_{i=1}^k E_{PM i}}{\sum_{n(s)=1}^{\bar{N}(s)} l_{i(s)}} \quad [g] \quad (6)$$

gdzie:

M_{PM}^s – miernik emisji CO_2 przy wykonywaniu zbiórki odpadów pojazdem s ,

E_{PM} – masa emisji jednostkowej PM przy przejeździe do i -tego punktu odbioru odpadów [g/km],

s – numer typu pojazdu,

$n(s)$ – numer odcinka trasy zbiórki dla pojazdu s ,

$N(s) = \{n(s) : 1, \dots, \bar{N}(s)\}$ – zbiór numerów punktów odbioru odpadów dla s -tego typu pojazdu,

$\bar{N}(s)$ – liczba punktów odbioru odpadów dla s -tego typu pojazdu,

$l_{i(s)}$ – odległości pomiędzy poszczególnymi punktami odbioru odpadów wyznaczone dla pojazdu s do zbiórki [km].

Do określenia emisji jednostkowej zostaną wykorzystane wartości poziomu emisji CO_2 , NO_x oraz PM z bazy emisyjności pojazdów spalinowych HBEFA (ang. Handbook

Emission Factors for Road Transport]). Uwzględnione zostaną rodzaje pojazdów do zbiórki oraz zróżnicowanie prędkości pojazdów w obsługiwanych obszarach zbiórki w celu odwzorowania rzeczywistego cyklu pracy w badanych obszarach [162].

5.2. Model sieci transportowej i algorytmy sztucznej inteligencji wykorzystane w rozwiązaniu zadania optymalizacji zbiórki odpadów

Problem trasowania pojazdów zbierających odpady uwzględniający okna czasowe polega na zaplanowaniu zbioru tras o minimalnym koszcie transportu. W szczególnych wypadkach możliwe jest zwiększenie liczby kryteriów. Trasy rozpoczynają się i kończą w bazie firmy zbierającej odpady. W zbiorce uczestniczą pojazdy z floty, która obsługuje obszary z gospodarstwami domowymi oddającymi odpady. Zakłada się, że suma masy odpadów w danym cyklu zbiórki na zaprojektowanej trasie przejazdu nie przekroczy ładowności pojazdu oraz każde gospodarstwo domowe będzie obsługiwane przez jeden pojazd. Odbiór odpadów będzie się odbywał z oknami czasowymi równymi godzinom pracy firmy zbierającej odpady. Wynika to z obowiązku nałożonego przez ustawę o odpadach konieczności wystawienia pojemników przed posesję – czyli ich pełnej dostępności w czasie trwania zbiórki. Model obliczeniowy będzie opracowany dla zbiórki odpadów segregowanych (tworzyw sztucznych) z zabudowy miejskiej z szerokimi oknami czasowymi oraz z wąskimi oknami czasowymi do odbioru odpadów wielkogabarytowych na żądanie w zabudowie wiejskiej rozproszonej. Zbiórka odpadów na żądanie wymaga zgłoszenia chęci oddania odpadów i podania szacunkowego okna czasowego. Firma zbierająca odpady przygotowuje plan zbiórki dla danego dnia i informuje mieszkańców o dokładnej godzinie odbioru, przedstawionej jako wąskie okno czasowe wynoszące 30 minut. Czas oczekiwania pojazdu na załadunek implikuje dodatkowe koszty ponoszone przez przedsiębiorstwo transportowe odbierające odpady.

Sieć transportowa będzie odwzorowana za pomocą węzłów: bazy transportowej, miejsc odbioru odpadów oraz skrzyżowań, natomiast połączenia drogowe będą krawędziami w grafie [163]. Jest to konieczny krok do rozwiązania problemu komiwojażera i zadania marszrutyzacji [164]. Na potrzeby sformułowana zadania optymalizacyjnego dla problemów trasowania pojazdów odbierających odpady z gospodarstw domowych i wyruszających z bazy transportowej firmy,

sieć transportowa została zamodelowana w postaci grafu skierowanego G (7):

$$G = \langle W, L \rangle \quad (7)$$

gdzie:

W – zbiór węzłów sieci transportowej, L – zbiór połączeń (krawędzi) pomiędzy wyróżnionymi węzłami sieci, jako drogi dojazdowe, przy $L \subset W \times W$;

$$L = \{(i, j) : (i, j) \in W \times W\}$$

Węzły, w których znajduje się miejsce odbioru odpadów, tożsame są z lokalizacją gospodarstw domowych. Zbiór numerów gospodarstw domowych lub innych miejsc odbioru odpadów oznaczony jest, jako (8) przy czym i – oznacza numer i -tej lokalizacji odbioru odpadów, a j oznacza numer j -tego miejsca.

$$G = \{1, 2, \dots, i, j, \dots, \bar{G}\} \quad (8)$$

gdzie:

\bar{G} – liczba całkowita gospodarstw domowych będących w harmonogramie zbiórki.

Zbiór numerów baz transportowych firm zbierających odpady jest oznaczony jako:

$$B^v = \{b_p^v, b_k^v\} \quad (9)$$

gdzie:

b_p^v – oznacza bazę z której v -ty pojazd rozpoczyna zbiórkę odpadów,

b_k^v – oznacza bazę do której v -ty pojazd wraca po zakończeniu zbiórki odpadów.

W szczególnym przypadku, są to miejsca, w których następuje wstępne przetwarzanie odpadów lub usuwanie z nich zanieczyszczeń i kompaktowanie surowców w celu wysyłki do dalszych miejsc przetwarzania lub recyklingu. Zależność (10) jest zbiorem numerów pojazdów do zbiórki odpadów, przy czym v oznacza v -ty pojazd

$$V = \{1, 2, \dots, v, \dots, V\} \quad (10)$$

Dla rozwiązania zadania optymalizacyjnego dla problemu zbiórki odpadów w zadanej sieci transportowej zostały wprowadzone charakterystyki kosztów (K) i czasów przejazdów (T) pojazdów zbierających odpady:

$$K = [k_{i,j}^v], T = [t_{i,j}^v] \quad (11)$$

gdzie:

$k_{i,j}^v$ - jest kosztem przejazdu dla v -tego pojazdu pomiędzy węzłami sieci transportowej,

a t_i^v jest czasem odbioru odpadów z i -tego gospodarstwa domowego, $[a_i, b_i]$ jest oknem czasowym obsługi i -tego gospodarstwa domowego.

Przejazd pojazdów zbierających odpady można ogólnie zapisać jako zmienne decyzyjne określającą przebywanie danego pojazdu na danej krawędzi pomiędzy dwoma węzłami sieci transportowej:

$$x_{i,j}^v = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli łuk } (i,j) \text{ wchodzi do trasy wykonywanej przez } v - \text{ty pojazd;} \\ 0, & \text{w przeciwnym wypadku} \end{cases}$$

Zmienna decyzyjna o interpretacji momentu przyjazdu do i -tego gospodarstwa domowego jest oznaczona jako:

$$m_{i,j}^v, i \in G, v \in V,$$

Założenia modelowe dla sformułowania zadania optymalizacyjnego będą uwzględniały macierz kosztów, macierz czasów przejazdu oraz okna czasowe [165], [166]. W klasycznym rozwiązaniu funkcja celu, która przyjmuje postać (12):

$$F(X) = \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in L} k_{i,j}^v x_{i,j}^v \rightarrow \min \quad (12)$$

oraz zmienna decyzyjna m_i^v :

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in S} m_i^v \rightarrow \min, \quad (13)$$

będą przyjmować wartości minimalne przy następujących ograniczeniach:

Każdy punkt odbioru odpadów może być obsługiwany tylko przez jeden pojazd:

$$\forall i \in G = \sum_{i \in G \cup \{b_k^v\}} \sum_{v \in V} x_{ij}^v = 1 \quad (14)$$

Liczba pojazdów obsługujących miejsca odbioru odpadów nie może przekroczyć liczby gospodarstw domowych oddających odpady:

$$\sum_{i \in G} \sum_{v \in V} x_{b_k^v, j}^v \leq \bar{G} \quad (15)$$

Kurs v -tego pojazdu do zbiórki zaczyna się i kończy w bazie firmy zbierającej odpady:

$$\forall i \in G = \sum_{i \in G \cup \{b_p^v\}} x_{ij}^v - \sum_{i \in G \cup \{b_k^v\}} x_{ji}^v = 0 \quad (16)$$

Warunek określający nieprzekroczenie ładowności v -tego pojazdu określony jest zależnością:

$$\forall v \in V \sum_{i \in G} q_i \cdot \sum_{j \in G} x_{i,j}^v \leq Q^v \quad (17)$$

Ograniczenie na moment przybycia do miejsca odbioru odpadów jest opisane jako:

$$\forall v \in V, \forall (i, j) \in L \quad x_{i,j}^v (m_i^v + t_{i,j} - m_j^v) \leq 0 \quad (18)$$

Wymaganie dotyczące przyjazdu v -tego pojazdu do i -tego gospodarstwa domowego lub miejsca lokalizacji kontenera opisane jest zależnością:

$$\forall v \in V, \forall (i) \in G \quad a_i \leq m_i^v \leq b_i \quad (19)$$

W problemach marszrutyzacji związanych z odbiorem odpadów funkcja celu powinna uwzględniać kilka kryteriów. Związane są one z czasem przejazdu pomiędzy węzłami sieci, masą odpadów i potencjalnym przychodem ze zbiórki określonej masy i kategorii odpadów oraz kosztami obsługi uzależnionymi od kosztów pracowniczych oraz zużycia paliwa na zadanej trasie zbiórki. W rozwiązaniach klasycznych można zastosować wagi, natomiast funkcja celu przedstawiona w równaniu będzie przekształcona do zależności uwzględniającej kryterium minimalizacji czasu, odległości i kosztów [164]. Dla uwzględnienia kilku kryteriów optymalizacji funkcja celu przyjmuje wartość zależną od wprowadzonych wag i jest wyrażona za pomocą wzoru (20).

$$F(X) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (20)$$

gdzie:

k – ilość funkcji celu, x – wektor rozwiązań, w_i – wagi spełniające zależność (21)

$$w_i \in [0,1] \text{ oraz } \sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (21)$$

W szczególnym przypadku należy przekształcić wzór (20) tak, aby uwzględnić kilka kryteriów i wtedy można wprowadzić kryterium zastępcze, które jest sumą ważoną kryteriów. W niniejszej dysertacji wykorzystana zostanie rozwinięta funkcja celu uwzględniająca współczynniki kosztów - c_f , czasu realizacji trasy zbiórki - t_f , oraz liczby obsłużonych punktów - p_f [130], [148].

Wybierając odpowiednie parametry istotności, zależne od celów, które stawia dla swojej działalności przedsiębiorstwo zbierające odpady można sformułować parametry istotności i dostosować je w zdefiniowanej funkcji celu, która przyjmuje postać opisaną wzorem (22). Współczynniki są wyznaczone na podstawie odchyleń pomiędzy rozwiązaniem bazowym dla zbiórki odpadów, a aktualnie rozpatrywanym.

Dla przypadków zbiórki odpadów analizowanych w dysertacji funkcja celu jest opisana jako:

$$(c_f + t_f + p_f) \rightarrow \min \quad (22)$$

Współczynnik kosztów c_f jest opisany zależnością (23):

$$c_f = p_p \frac{\sum_{i=1}^v un_i \cdot (c_i + \sum_{j=2}^{rn_i} (d_{i(j-1),ij} \cdot ct_i))}{\sum_{i=1}^v ub_i \cdot (c_i + \sum_{j=2}^{rb_i} (d_{i(j-1),ij} \cdot ct_i))} \quad (23)$$

gdzie:

p_p – jest parametrem istotności zysku ($p_p \leq 1$), v -liczba pojazdów biorących udział w zbiórce. Zmienne binarne un_i oraz nb_i określają wykorzystanie i -tego pojazdu w nowym i bazowym rozwiązaniu. Liczba wierzchołków zawartych w projektowanej trasie przejazdu określona jest przez rn_i oraz rb_i – odpowiednio dla nowego i bazowego rozwiązania, dla i -tego pojazdu. Koszt początkowy wykorzystania i -tego pojazdu wyrażony jest jako c_i , natomiast c_t jest kosztem jednostkowym przejazdu 1 km odcinka trasy dla i -tego pojazdu. Odległości przejazdu $d_{i(j-1),ij}$ są odległościami pomiędzy $(j-1)$ – tym a j -tym węzłem trasy dla i -tego pojazdu i wyrażone są w km.

W aplikacji, w której są wykonane obliczenia z wykorzystaniem opisanych tu modeli macierz odległości jest generowana na podstawie odległości z wykorzystaniem systemu openstreetmap.org.

Współczynnik czasu jest opisany zależnością (24).

$$t_f = p_t \frac{\sum_{i=1}^v un_i \cdot \sum_{j=2}^{rn_i} t_{i(j-1),ij}}{\sum_{i=1}^v ub_i \cdot \sum_{j=2}^{rb_i} t_{i(j-1),ij}} \quad (24)$$

gdzie:

współczynnik p_t jest parametrem istotności czasu ($p_t \leq 1$).

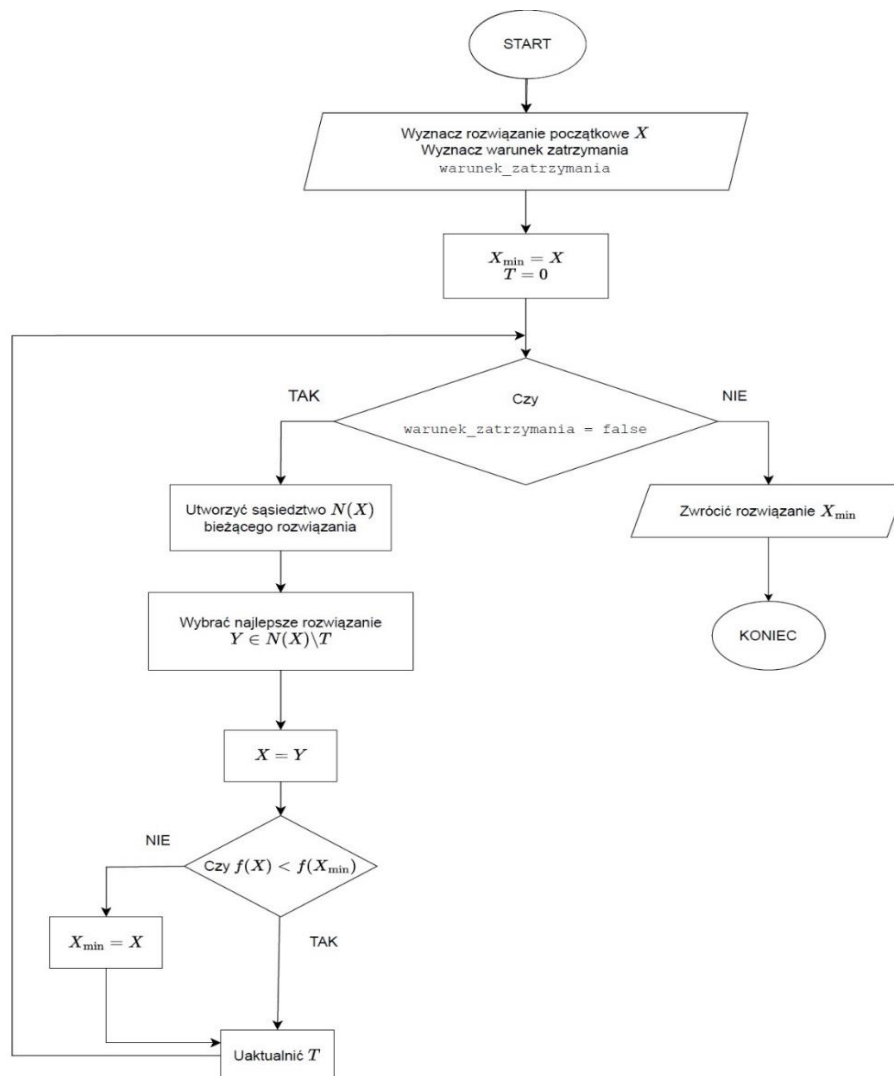
Oznaczenia un_i , ub_i , rn_i , rb_i są takie jak opisane dla współczynnika ze wzoru (23). Dodatkowo wprowadzone zostały parametr liczby obsłużonych punktów dla i -tego pojazdu, dla nowego i początkowego rozwiązania $t_{i(j-1),ij}$ pomiędzy $(j-1)$ -tym a j -tym wierzchołkiem trasy.

$$p_f = p_g \frac{\sum_{i=1}^v pb_i}{\sum_{i=1}^v pn_i} \quad (25)$$

Dodatkowym warunkiem ograniczającym jest zapewnienie wystąpienie sumarycznej wartości wag równej 1.

$$p_p + p_t + p_g = 1 \wedge p_p, p_t, p_g \in \mathbb{R} \wedge p_p, p_t, p_g \geq 0 \quad (26)$$

Do optymalizacji tras przejazdu pojazdów zbierających odpady zostały wybrane dwa algorytmy sztucznej inteligencji – przeszukiwania tabu oraz mrówkowy. Algorytm przeszukiwania tabu został opracowany w 1986 r. i jego głównym celem było utworzenie możliwości wychodzenia z minimów lokalnych wyznaczonych na podstawie algorytmu przeszukiwania lokalnego [167]. W algorytmie (rys. 5.2) tworzona jest lista zakazów – Tabu, na której znajdują się ostatnio dokonane przejścia między rozwiązaniami z sąsiedztwa.



Rys. 5.2. Schemat algorytmu przeszukiwania tabu (opracowanie własne na podstawie [167])

Przejścia te zostają zapamiętane przez określony czas. Jest to czas, przez który uniemożliwione jest wykonanie ruchu. W ten sposób możliwe jest wyjście z minimum lokalnego i znalezienie rozwiązania w innych obszarach przestrzeni rozwiązań. Dla przypadków, w których nowe rozwiązanie cechuje się korzystniejszą wartością funkcji celu stosuje się kryterium aspiracji [168]. Pozwala ono na wykonanie zabronionego ruchu w przypadku znalezienia lepszego rozwiązania.

Drugim wykorzystanym algorytmem do optymalizacji tras pojazdów zbierających odpady jest algorytm mrówkowy, który jest oparty na odwzorowaniu zachowania mrówek poszukujących pokarmu [169], [170]. Wykorzystanie tego algorytmu do problemu komiwojażera wymaga zadeklarowania sumarycznej liczby mrówek, które znajdują się w mieście i . Pomiedzy n miejscowościami z wagami dla krawędzi między wierzchołkami i oraz j reprezentowanymi jako d_{ij} występuje $b_i(t)$ ($1=1\dots n$) mrówek.

Każda mrówka traktowana jest jako agent, który charakteryzuje się pewnymi właściwościami:

- przechodząc z miasta i do j pozostawia na krawędzi,
- wybór kolejnej lokalizacji na drodze agenta-mrówki jest determinowany prawdopodobieństwem, które jest zależne od odległości pomiędzy aktualnym i rozpatrywanym węzłem oraz ilości feromonu (substancji wydzielanej przez mrówki, w celu oznaczenia trasy) na krawędzi łączącej obie lokalizacje,
- każda miejscowość (lokalizacja) może zostać odwiedzona wyłącznie raz przy tworzonej trasie.

Przy założeniu współczynnika intensywności stężenia feromonu na krawędzi (i,j) w czasie t - $\tau_{ij}(t)$ każda iteracja algorytmu powinna modyfikować jego wartość zgodnie z zależnością (27):

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t, t+1)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t, t+1) \quad (27)$$

gdzie:

ρ - współczynnik odparowania feromonu (dla ograniczenia nielimitowanego wzrostu ilości feromonu na krawędzi musi być spełniony warunek $\rho < 1$, $1-\rho$ - poziom odparowania feromonu, $\Delta\tau_{ij}^k(t, t+1)$ wielkość śladu feromonowego pozostawionego przez k -tą mrówkę na krawędzi (i,j)).

Dla uniemożliwienia odwiedzin przez mrówkę danej lokalizacji po raz drugi utworzona zostaje lista tabu – zawierająca przebytą trasę. Po przygotowaniu całej ścieżki następuje jej wyczyszczenie. W algorytmie wprowadzono również parametr widoczności, który reprezentuje odwrotność odległości między wierzchołkami i oraz j oznaczony jako η_{ij} . Wprowadzony jest on w celu zwiększenia atrakcyjności lokalizacji znajdujących się bliżej aktualnego położenia i jest wyrażony jako $n_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$. Prawdopodobieństwo wyboru kolejnej lokalizacji przez mrówkę jest wyznaczone z zależności (28):

$$p_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in \text{dostępne}} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta} & \text{gdy } j \in \text{dostępne} \\ 0 & \text{w przeciwnym razie} \end{cases} \quad (28)$$

Do zbioru „dostępne” zaliczają się nieodwiedzone lokalizacje przez daną mrówkę. Parametry α i β są wykorzystywane do sterowania stężeniem feromonu na krawędziach oraz odległości między odwiedzanymi punktami. W zależności od sposobu sterowania stężeniem feromonu można stosować różne schematy jego aktualizacji [169]. W algorytmie, który został opracowany dla aplikacji obliczeniowej wykorzystano tzw. ant-cycle. Zakłada on pozostawienie feromonu po przygotowanej całej trasie przez mrówki i uzależnienia jego wielkość od długości zaprojektowanej ścieżki. Długość ścieżki jest opisana zależnością (29):

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q_3}{L^k} & \text{gdy } k - \text{ta mrówka przeszła z } i \text{ do } j \text{ pomiędzy } t, \text{ a } t + 1 \\ 0 & \text{w przeciwnym razie} \end{cases} \quad (29)$$

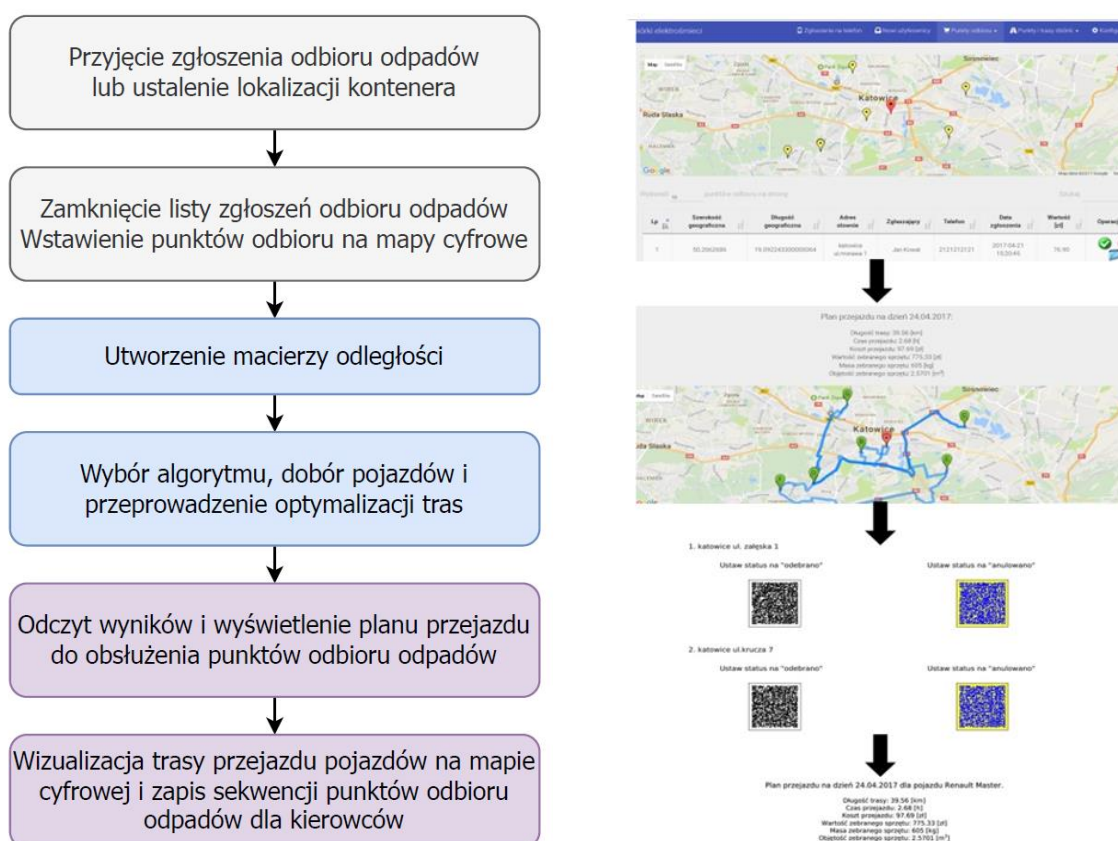
Model, po modyfikacji zależności (27), zakładający pozostawienie feromonu po przygotowaniu całej trasy zbiórki odpadów wyrażony jest wzorem (30),

$$\begin{aligned} \tau_{ij}(t+n) &= \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t, t+n) \\ \Delta\tau_{ij}(t, t+n) &= \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t, t+n) \end{aligned} \quad (30)$$

Scharakteryzowane powyżej algorytmy sztucznej inteligencji zostały wybrane do optymalizacji tras pojazdów zbierających odpady w kilku gminach województwa śląskiego. Algorytmy te zostały zaimplementowane w systemie informatycznym – System Zbiórki Odpadów (SZO). System opracowany na Politechnice Śląskiej posłużył do realizacji badań w ramach tej pracy doktorskiej, a jego funkcjonalność i przydatność

do optymalizacji zagadnień transportowych została pozytywnie zweryfikowana w kilku publikacjach naukowych [130], [139], [171].

System SZO jest w pełni funkcjonalną aplikacją zawierającą kilka modułów. Aplikacja zbudowana jest z interfejsu, modułu obliczeniowego, bazy danych, bibliotek systemów obsługujących mapy cyfrowe oraz systemu zarządzającego użytkownikami i obsługującego parametry operacyjne. Obsługa systemu wraz z funkcjonalnością modułów została przedstawiona na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Schemat funkcjonalny obsługi systemu informatycznego SZO (opracowanie własne)

W modelu zbiórki i transportu odpadów zostały wybrane dwie kategorie odpadów – odpady wielkogabarytowe i tworzywa sztuczne. W pierwszym wypadku w modelu uwzględnia się wąskie okna czasowe ze względu na wymaganą godzinę wystawienia odpadów przed gospodarstwo domowe i jest to uwzględnione w obliczeniach. Przy odbiorze odpadów tworzyw sztucznych uwzględnia się szerokie okna czasowe i mogą one zawierać się w czasie trwania zbiórki dla jednej zmiany.

6. Planowanie zbiórki i transportu odpadów – studium przypadku dla gmin województwa śląskiego

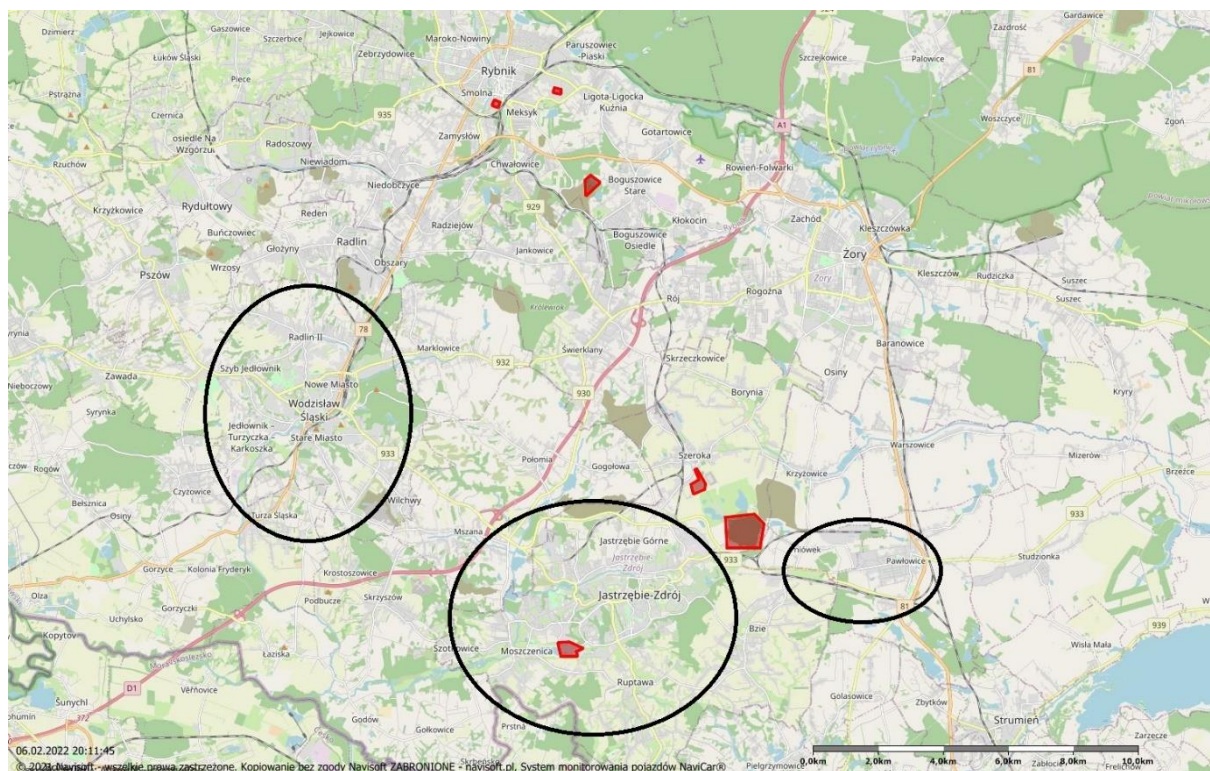
Wykorzystując opisane wcześniej w dysertacji założenia modelowe zbiórki wybranych kategorii odpadów komunalnych a także uwzględniając specyfikę prowadzenia zbiórek część praktyczna dysertacji uwzględnia następujące założenia:

- badania obejmują obszary o zabudowie zwartej miejskiej wielorodzinnej i rozproszonej jednorodzinnej,
- obszary prowadzenia badań mają zróżnicowaną sieć transportową,
- zostały wybrane dwie kategorie odpadów zbierane selektywnie tworzywa sztuczne oraz odpady wielkogabarytowe,
- w zbiórce odpadów tworzyw sztucznych wykorzystany jest model zbiórki z szerokimi oknami czasowymi w systemie zbiórki niewymiennej,
- w zbiórce odpadów wielkogabarytowych wykorzystany jest model zbiórki z wąskimi oknami czasowymi w systemie zbiórki na żądanie,
- wybrane zostały dwa algorytmy sztucznej inteligencji: przeszukiwania tabu i mrówkowy do optymalizacji tras,
- wyznaczone zostaną wskaźniki efektywności ekonomicznej, miernik masy zebranych odpadów, mierniki emisji CO₂, NO_x i PM przed optymalizacją tras,
- przeprowadzona zostanie optymalizacja wybranych tras dla zbiórki odpadów tworzyw sztucznych oraz wielkogabarytowych,
- wyznaczone zostaną wskaźniki efektywności ekonomicznej, miernik masy zebranych odpadów, mierniki emisji CO₂, NO_x i PM po optymalizacji tras,
- wybrane trasy po optymalizacji zostaną przekazane do badań empirycznych - do rzeczywistych przejazdów pojazdów zbierających odpady według zmodyfikowanego po optymalizacji planu.

6.1. Obszar prowadzonych badań zbiórek odpadów

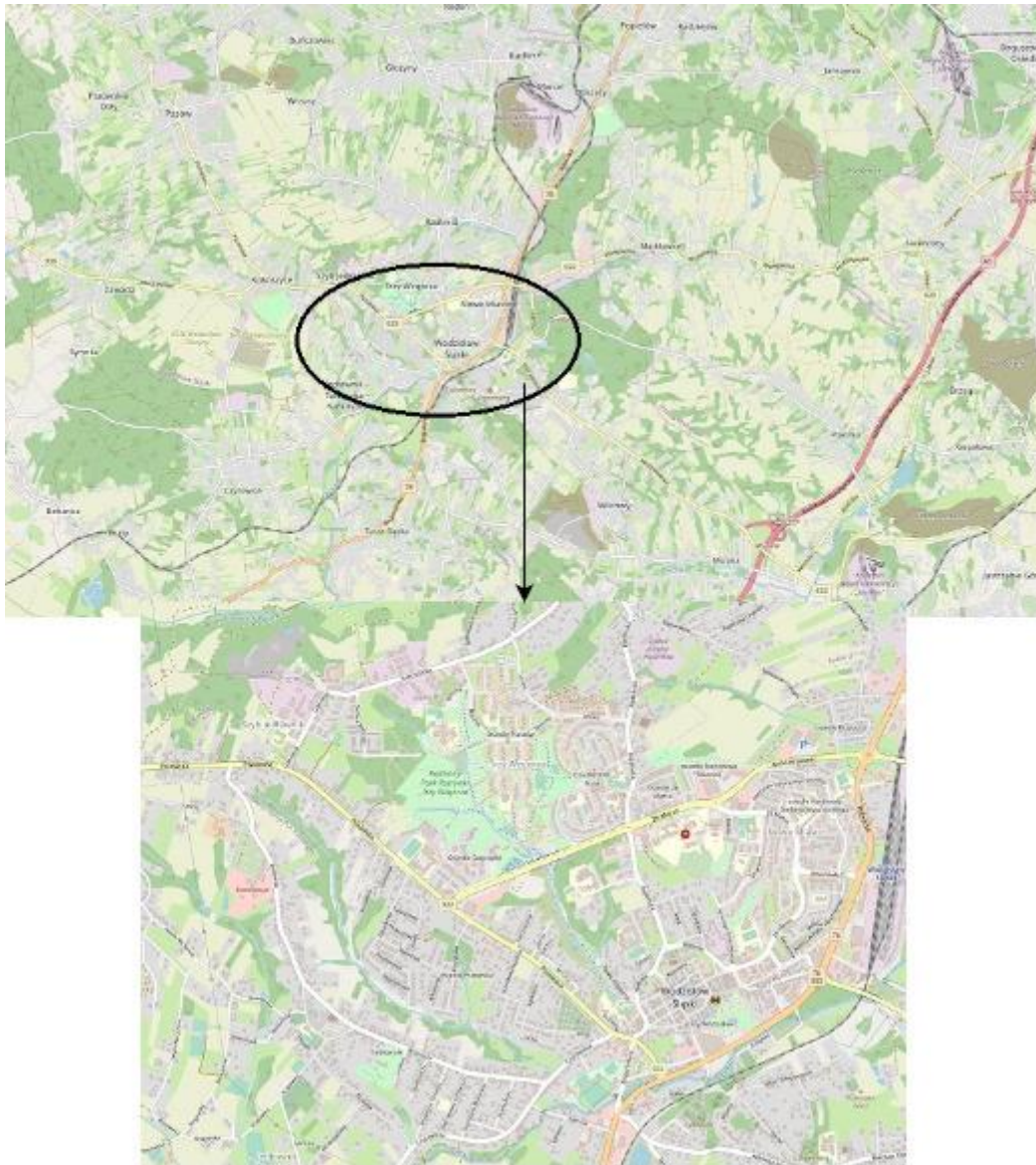
Trasy zostały realizowane w trzech gminach wchodzących w skład województwa śląskiego. Obszar obejmuje zarówno gminę wiejską (Gmina Pawłowice) jak i gminy miejskie (Jastrzębie-Zdrój oraz Wodzisław Śląski). Gminy położone są w południowej

części województwa śląskiego. Na rysunku 6.1 oznaczono na mapie zasięg realizowanych tras.



Rys. 6.1. Obszar realizacji tras na terenie gmin województwa śląskiego (opracowanie własne na podstawie openstreetmap.org)

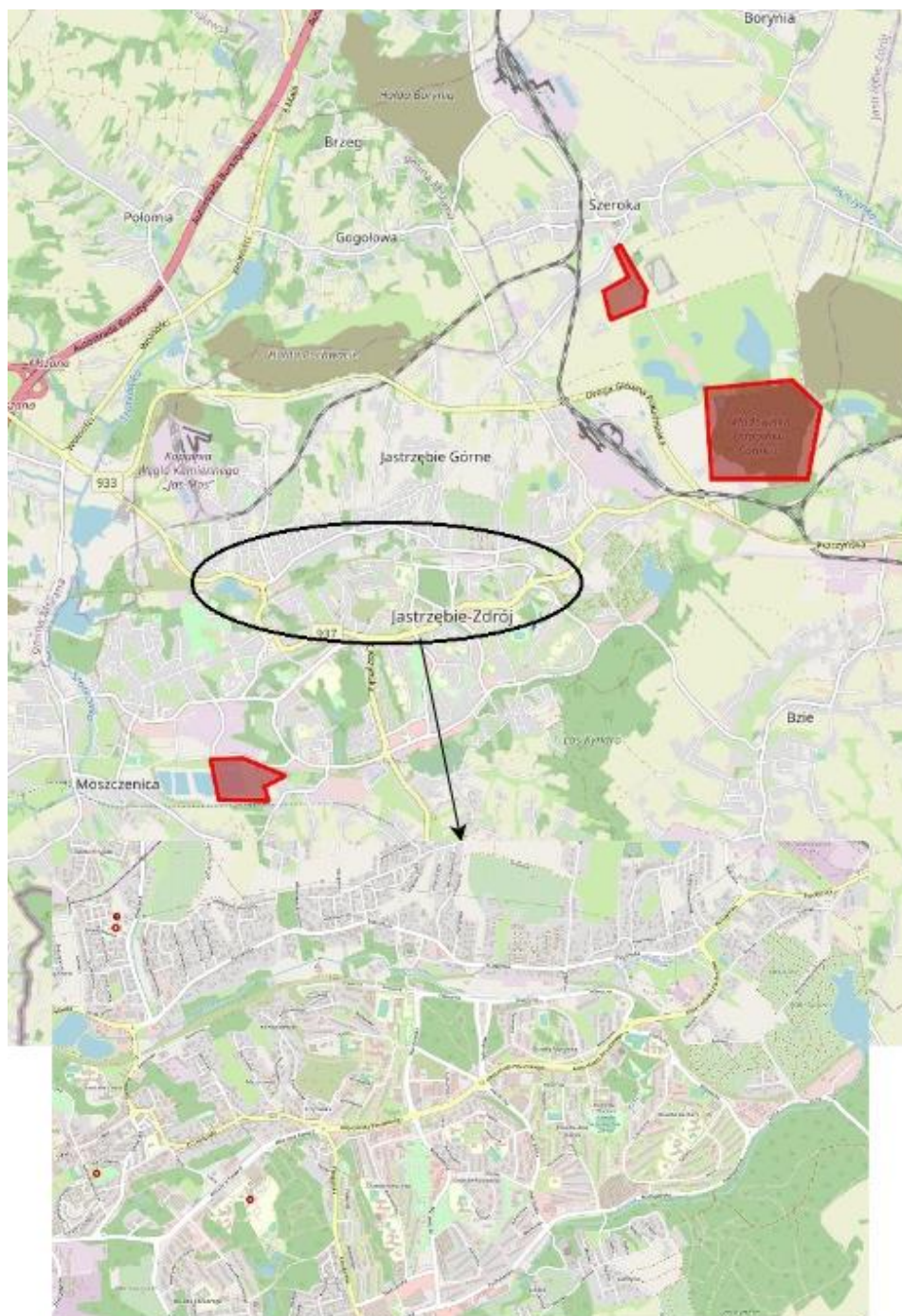
Miasto Wodzisław Śląski zajmuje powierzchnię około 50 km². Terytorialnie jest podzielone na 9 dzielnic. Liczba ludności wg danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) z 2019 roku wynosiła około 47 tys. mieszkańców. Miasto jest zróżnicowane pod względem zabudowy. W strefie centrum dominuje zabudowa wielorodzinna zwarta z wysokimi blokami, w której zamieszkuje blisko połowa liczby mieszkańców. Poza strefą centrum występuje jedynie zabudowa jednorodzinna. Na terenie miasta występują drogi gminne, powiatowe oraz wojewódzkie. Sieć drogowa jest bardzo dobrze rozwinięta, przeważają drogi gminne. W gminie miejskiej Wodzisław Śląski w latach 2019-2021 zebrano następujące ilości odpadów: w 2019 r. zebrano 16 277 ton, w 2020 r. - 16 905 ton odpadów, a w 2021 r. zebrano 17 332 ton [172].



Rys. 6.2. Mapa Wodzisław Śląskiego z zaznaczoną strefą centrum oraz siecią dróg (opracowanie własne na podstawie openstreetmap.org)

Kolejnym z miast na obszarze, którego były realizowane trasy jest miasto Jastrzębie-Zdrój. Jego powierzchnia wynosi ok 85 km². Miasto wg danych GUS w 2019 roku zamieszkiwane było przez około 82 tys. mieszkańców. Miasto jest podzielone na strefę centrum, którą tworzy 19 osiedli mieszkaniowych oraz strefę zabudowy jednorodzinnej, którą tworzy 6 sołectw. Strefę centrum zamieszkuje około 70% liczby mieszkańców miasta i jest zabudowana wieżowcami. Osiedla są skomunikowane między sobą drogami gminnymi. Wewnątrz osiedli sieć drogowa składa się z licznych dróg wewnętrznych o ograniczonej szerokości. W Jastrzębiu-Zdroju w latach 2019 – 2021

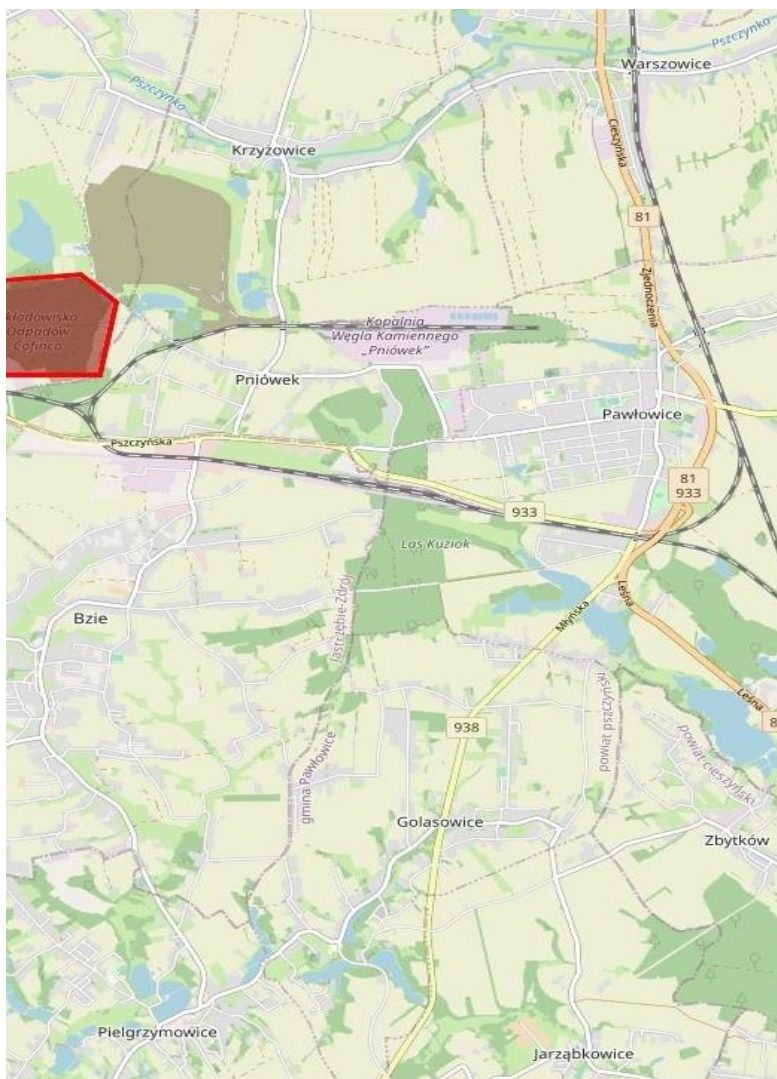
zebrano następujące ilości odpadów: w 2019 r. – 33 659 ton, w 2020 r. – 34 268 ton, w 2021 r. – 29 862 ton. [173].



Rys. 6.3. Mapka Jastrzębia-Zdroju z zaznaczoną strefą centrum oraz siecią dróg (opracowanie własne na podstawie openstreetmap.org)

Gminą wiejską na obszarze, której były realizowane badania jest gmina Pawłowice Śląskie należąca do powiatu pszczyńskiego. Zajmuje powierzchnię około 18 km². Liczba ludności wg danych GUS w 2019 roku wynosiła około 17 tys. mieszkańców. Gmina składa się z 7 sołectw. W jednym sołectwie zlokalizowane jest osiedle mieszkaniowe, które

zamieszkuje 30% mieszkańców gminy. Poszczególne sołectwa połączone są ze sobą dobrze skomunikowane. Na terenie sołectw występują drogi o ograniczonej nośności i szerokości. W latach 2019 – 2021 zebrano w skali roku zróżnicowane ilości odpadów. W 2019 r. zebrano 5361 ton odpadów, w 2020 r. nastąpił wzrost ilości zebranych odpadów do 5735 ton. W 2021 r. zebrano podobną ilość odpadów tj. 5752 ton [174].



Rys. 6.4. Mapka Gminy Pawłowice z siecią dróg (opracowanie własne na podstawie openstreetmap.org)

Zgodnie z obowiązującym prawem definiującym zasady systemu gospodarowania odpadami w Polsce odpady mogą być gromadzone w systemie workowym, w systemie pojemnikowym oraz na zasadzie wystawki w formie luźnej przed posesją. Szczegółowy opis sposobu gromadzenia zawarto w tabelicy 6.1 oraz rysunku 6.5.

Tablica 6.1. Sposób gromadzenia odpadów w gospodarstwach domowych
(opracowanie własne)

| Rodzaj odpadu | Sposób gromadzenia |
|---|---|
| Niesegregowane odpady komunalne | Pojemniki o pojemności od 110-1100litrów |
| Popiół i żużel | Pojemniki o pojemności od 110-1100litrów |
| Odpady segregowane(plastik, szkło, makulatura) | Worki 80-120litrów |
| Odpady ulegające biodegradacji – odpady zielone | Worki 80-120litrów |
| Odpady ulegające biodegradacji - bioodpady | Pojemniki o pojemności 120-240l ze specjalnym rusztem oraz systemem wentylacji. |
| Odpady wielkogabarytowe | Wystawienie przed posesję |
| Zużyty sprzęt elektroniczny i elektryczny | Wystawienie przed posesję |
| Odpady budowlane i rozbiórkowe | Kontenery o pojemności 5-7m3 |

Na rysunku 6.5 przedstawiono sposoby gromadzenia różnych kategorii odpadów. Odpady mogą być gromadzone w specjalnych kontenerach, workach lub wystawiane przed posesję. Możliwość oddania przez mieszkańców nielimitowanej ilości odpadów powoduje, przy niektórych posesjach gromadzone są bardzo duże ilości odpadów.



Rys. 6.5. Sposoby gromadzenia różnych kategorii odpadów w badanych gminach
(opracowanie własne)

W zależności od rodzaju zabudowy występują różne częstotliwości zbiórki odpadów zgodnie z danymi zawartymi w tabelicy 6.2. Częstotliwość zbiórek jest różna w zależności od kategorii odpadów, rodzaju zabudowy oraz miesiąca w roku.

Tablica 6.2. Częstotliwość zbiórek odpadów w badanych gminach (opracowanie własne)

| Rodzaj odpadu | Częstotliwość zbiórki | |
|---|---|--|
| | Gminy wiejskie | Gminy miejskie |
| Niesegregowane zmieszane odpady komunalne | raz w miesiącu raz w miesiącu w miesiącach od X-IV , dwa razy w miesiącach od V-XI | zabudowa jednorodzinna: raz w miesiącu w miesiącach od X-IV , dwa razy w miesiącach od V-XI co najmniej dwa razy w miesiącu; zabudowa wielorodzinna: 3 razy w tygodniu; 4 razy w miesiącu, dwa razy w miesiącach od V-XI co 2 tygodnie (IV-X), co 3 tygodnie (XI-III) |
| Popiół i żużel | raz/miesiącu lub co drugi miesiąc od V - X, dwa razy w miesiącu w miesiącach od X-IV, | zabudowa jednorodzinna: w miesiącach X-IV oraz w miesiącach VI i VIII 1 raz w miesiącu I; zabudowa wielorodzinna: w miesiącach od X - III 1 raz na 2 tygodnie, w miesiącach IV - IX 1 raz w miesiącu; co 4 tygodnie w okresie X-IV |
| Segregowane odpady (makulatura, szkło, tworzywa sztuczne) | raz w miesiącu; | co najmniej 1 w miesiącu; co 2 tygodnie, 1 lub 2 razy w tygodniu; 2 razy w miesiącu, co 3 tygodnie |
| Odpady wielkogabarytowe | raz w roku dwa razy w roku | raz w roku lub dwa razy w roku jako wystawka na żądanie raz w roku, na zabudowie wielorodzinnej raz w tygodniu; co 2 tygodnie |
| Zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny | raz w roku dwa razy w roku | raz w roku dwa razy w roku jako wystawka |
| Odpady ulegające biodegradacji | w miesiącach I-V oraz X-XII – raz w miesiącu; w miesiącach VI-IX co dwa tygodnie | co najmniej 1 raz na 2 tygodnie w okresie kwietnia do listopada, w pozostałym okresie 1 raz w miesiącu; co 2 tygodnie (IV-X) oraz co 3 tygodnie (XI-III) |
| Odpady budowlane i rozbiórkowe | wystawka jako żądanie podstawienia kontenera | oddanie do PSZOK |

6.2. Parametry eksploatacyjne pojazdów wykorzystanych w zbiórkach odpadów

Różne sposoby gromadzenia odpadów jak również różna częstotliwość zbiórki, która jest w dodatku zmienna w poszczególnych miesiącach roku w znaczący sposób wpływa na procesy planowania tras, harmonogramów zbiórek oraz doboru odpowiednich pojazdów. Firmy odbierające odpady muszą posiadać w swojej flocie pojazdy o różnych

gabarytach, ładowności oraz pojemności przestrzeni ładunkowej. Szczegółową specyfikację pojazdów wykorzystanych do odbioru odpadów dla studium przypadku zawarto w tabelicy 6.3.

Tablica 6.3. Specyfikacja pojazdów przeznaczonych do zbiórki odpadów (opracowanie własne)

| Lp. | Rodzaj pojazdu | Dopuszczalna masa całkowita DMC [kg] | Ładowność [kg] | Pojemność zabudowy [m ³] | Pojemność silnika [cm ³] | Moc silnika [kW] | Średnie zużycie paliwa [l/100km] |
|-----|---|--------------------------------------|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------|----------------------------------|
| 1 | Specjalistyczny - śmieciarka 3-osiowa | 26000 | 10200 | 22 | 11964 | 235 | 60 |
| 2 | Specjalistyczny - śmieciarka 2-osiowa | 19000 | 8140 | 18 | 6692 | 175 | 45 |
| 3 | Specjalistyczny - śmieciarka 2-osiowa do 3,5 tony | 3500 | 360 | 5,5 | 2998 | 107 | 17 |
| 4 | Skrzyniowy do 3,5 tony | 3500 | 1120 | 22 | 3000 | 115 | 15 |
| 5 | Ciężarowy z HDS | 17500 | 6500 | 24 | 10518 | 170 | 30 |
| 6 | Ciężarowy z zabudową hakową | 24300 | 14100 | 30 | 6374 | 180 | 42 |

W firmie PST Transgór S.A., z której pozyskano dane wykorzystuje się pojazdy zaprezentowane na rysunku 6.6. Pojazdy specjalistyczne typu śmieciarka o DMC – 26 ton są stosowane jako podstawowe pojazdy do zbiórki odpadów zmieszanych. Duża pojemność zabudowy wraz z funkcją kompaktująca pozwala na zbiórkę dużej masy odpadów podczas jednego kursu. Pojazdy specjalistyczne o mniejszej DMC przeznaczone są do obsługi rejonów zbiórki odpadów w których dominuje zwarta zabudowa jednorodzinna z uwagi na ulice o ograniczonej nośności oraz szerokości jezdni. Samochody specjalistyczne typu śmieciarka są pojazdami uniwersalnymi mogą być stosowane zarówno do odbioru odpadów gromadzonych w pojemnikach, jak również odpadów wielkogabarytowych. Odpady segregowane w workach są zbierane pojazdami z zabudową skrzyniową. Taki typ pojazdu umożliwia zbieranie kilku frakcji jednocześnie nie powodując ich mieszania. Najczęściej wykorzystuje się pojazdy o DMC do 3,5 tony. Na terenie zabudowy zwartej wielorodzinnej do opróżniania pojemników typu dzwon stosowane, są pojazdy ciężarowe z HDS.

a)



b)



c)



Rys. 6.6. Pojazdy wykorzystywane do zbiórki odpadów:
a) pojazd specjalistyczny typu smięciarka; b) pojazd za zabudową skrzyniową;
c) pojazd ciężarowy z HDS (opracowanie własne)

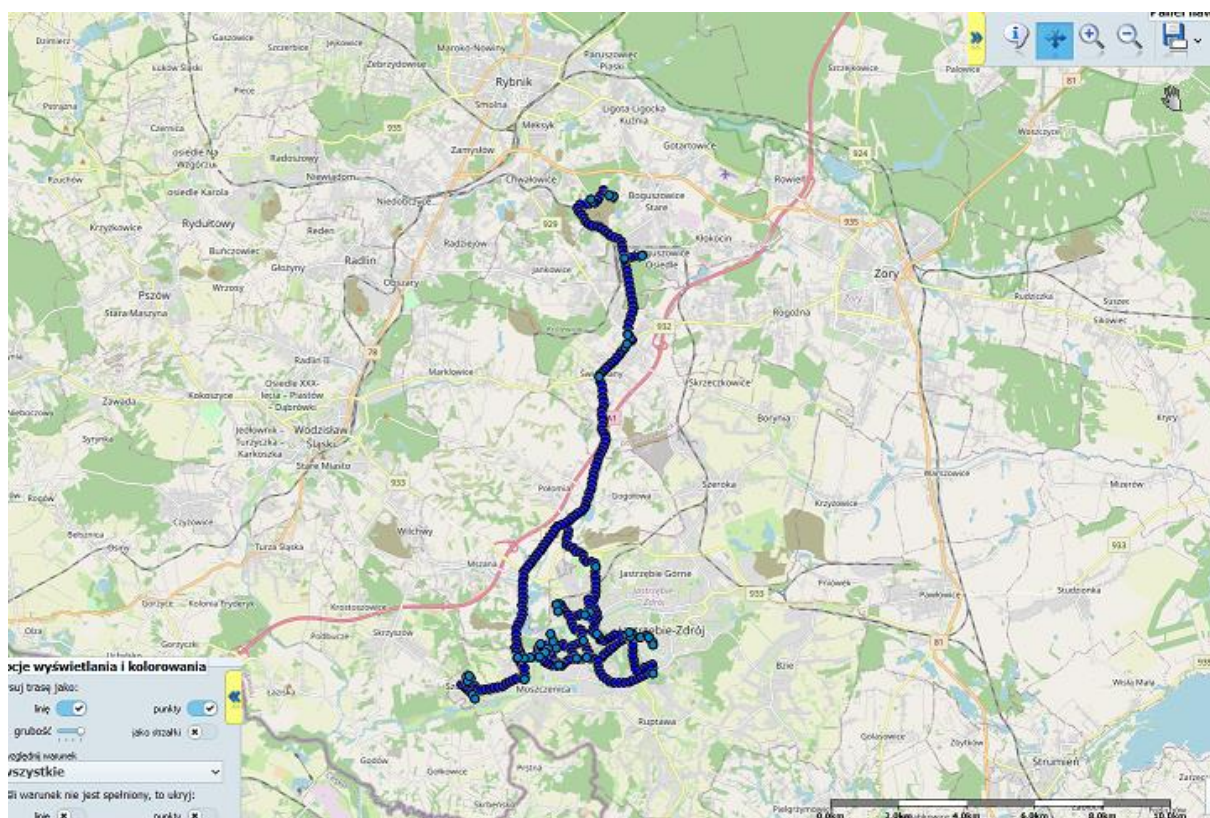
Pojazd z zabudową skrzyniową przeznaczony do zbiórki odpadów selektywnie gromadzonych posiada siatkę umożliwiającą bezpieczny transport zebranych odpadów.

6.3. Wybór próby reprezentatywnej tras zbiórek w badanym obszarze

Badaniami objęto zbiórkę odpadów wielkogabarytowych oraz odpadów selektywnie zbieranych – tworzyw sztucznych. Do optymalizacji wybrano 18 tras w tym 7 tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych oraz 11 tras zbiórki tworzyw sztucznych. Trasy zostały zrealizowane zarówno na terenie zabudowy wiejskiej jednorodzinnej jak również miejskiej zwartej zabudowy wielorodzinnej. Odbierane odpady segregowane były gromadzone w pojemnikach typu dzwon o pojemności 1,5 m³, a odpady

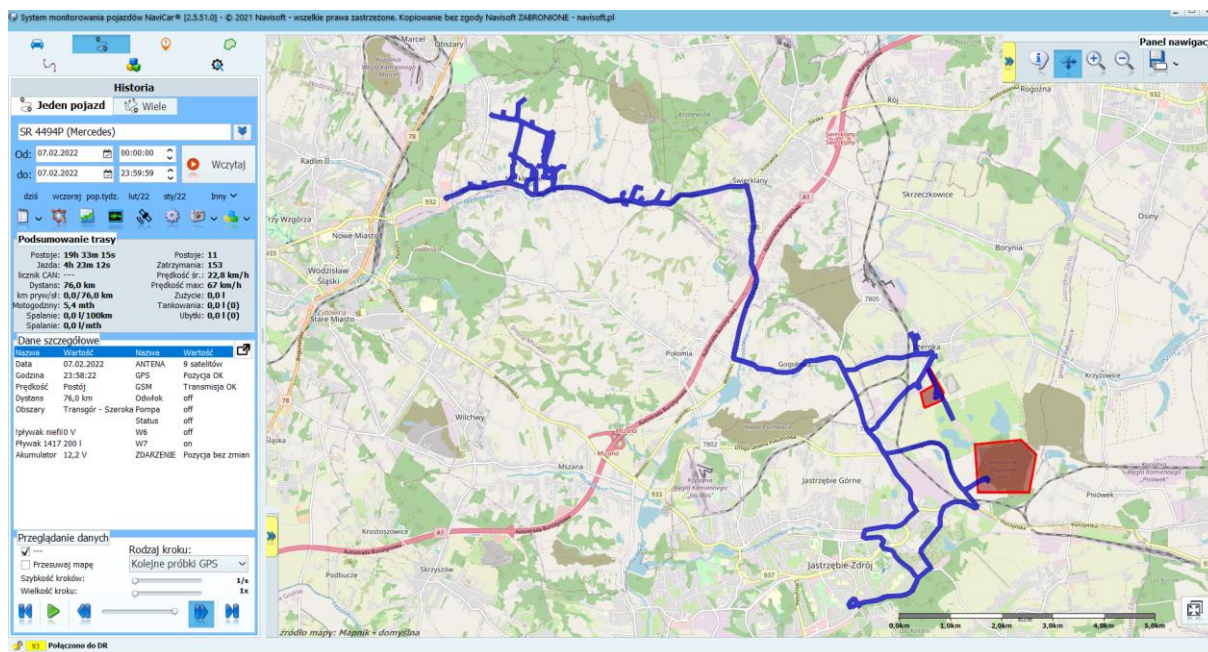
wielkogabarytowe przed posesją na zasadzie wystawki. Trasy były realizowane na terenie gmin wchodzących w skład województwa śląskiego scharakteryzowanych w rozdziale 6.1.

Zbiórka odpadów segregowanych realizowana była samochodami ciężarowymi z HDS o DMC 18 ton oraz pojemności przestrzeni ładunkowej 22m³, natomiast odbiór odpadów wielkogabarytowych odbywał się pojazdami skrzyniowymi o pojemności przestrzeni ładunkowej 22 m³ i DMC 3,5 tony. Na rysunku 6.7 oraz rysunku 6.8 przedstawiono przykładową wizualizację przejazdu trasy.



Rys. 6.7. Wizualizacja trasy przejazdu pojazdu zbierającego odpady na terenie zabudowy jednorodzinnej wiejskiej (opracowanie własne)

Na rysunku 6.8 przedstawiono zrzut ekranu z systemu zarządzania flotą z wizualizacją trasy wykonanej w trakcie jednej ze zbiórek. Osoba zarządzająca flotą pojazdów może dokonać po odczycie sygnału GPS wizualizacji trasy, ale również ma wgląd do parametrów trasy m.in. czas, długość trasy, itp.



Rys. 6.8. Zrzut ekranu z systemu zarządzania flotą przy zbiórce odpadów (opracowanie własne)

Charakterystykę tras oraz ich opis przedstawiono w tablicy 6.4.

Tablica 6.4. Charakterystyka tras wybranych do optymalizacji (opracowanie własne)

| Lp. | Numer trasy | Liczba punktów odbioru odpadów | Rodzaj zabudowy | Rodzaj odbieranych odpadów | Sposób gromadzenia odpadów |
|-----|-------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|--|
| 1 | Trasa nr 1 | 44 | Miejska wielorodzinna | Odpady segregowane | Pojemniki typu dzwon 1,5m ³ |
| 2 | Trasa nr 2 | 56 | Miejska wielorodzinna | Odpady segregowane | Pojemniki typu dzwon 1,5m ³ |
| 3 | Trasa nr 3 | 82 | Miejska wielorodzinna | Odpady segregowane | Pojemniki typu dzwon 1,5m ³ |
| 4 | Trasa nr 4 | 105 | Miejska wielorodzinna | Odpady segregowane | Pojemniki typu dzwon 1,5m ³ |
| 5 | Trasa nr 5 | 71 | Miejska wielorodzinna | Odpady segregowane | Pojemniki typu dzwon 1,5m ³ |
| 6 | Trasa nr 6 | 43 | Miejska wielorodzinna | Odpady segregowane | Pojemniki typu dzwon 1,5m ³ |
| 7 | Trasa nr 7 | 40 | Miejska wielorodzinna | Odpady segregowane | Pojemniki typu dzwon 1,5m ³ |
| 8 | Trasa nr 8 | 17 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |
| 9 | Trasa nr 9 | 17 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |
| 10 | Trasa nr 10 | 16 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |
| 11 | Trasa nr 11 | 20 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |
| 12 | Trasa nr 12 | 14 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |

Tablica 6.4. cd.

| Lp. | Nazwa trasy | Liczba punktów odbioru odpadów | Rodzaj zabudowy | Rodzaj odbieranego odpadu | Sposób gromadzenia odpadów |
|-----|-------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|
| 13 | Trasa nr 13 | 16 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |
| 14 | Trasa nr 14 | 19 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |
| 15 | Trasa nr 15 | 19 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |
| 16 | Trasa nr 16 | 18 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |
| 17 | Trasa nr 17 | 19 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |
| 18 | Trasa nr 18 | 16 | Wiejska jednorodzinna | Odpady wielkogabarytowe | Wystawka przed posesją |

Opisane w tablicy 6.4 trasy zostały poddane optymalizacji z wykorzystaniem systemu SZO. Optymalizację przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch algorytmów: przeszukiwania tabu oraz algorytmu mrówkowego, a funkcja celu (opisana zależnością (22)) ukierunkowana była na minimalizację czasu realizacji trasy i długości wykonywanych przejazdów.

6.4. Opracowanie statystyczne wyników dla próby reprezentatywnej tras zbiórek odpadów

Z populacji tras zbiórki odpadów tworzyw sztucznych realizowanych została wybrana próba reprezentatywna. Trasy były realizowane z określoną częstością w ciągu roku i wybrano próbę reprezentatywną 74 tras zbiórki odpadów z tworzyw sztucznych. Dla zebranych danych wyznaczono podstawowe statystyki, które zostały zawarte w tablicy 6.5.

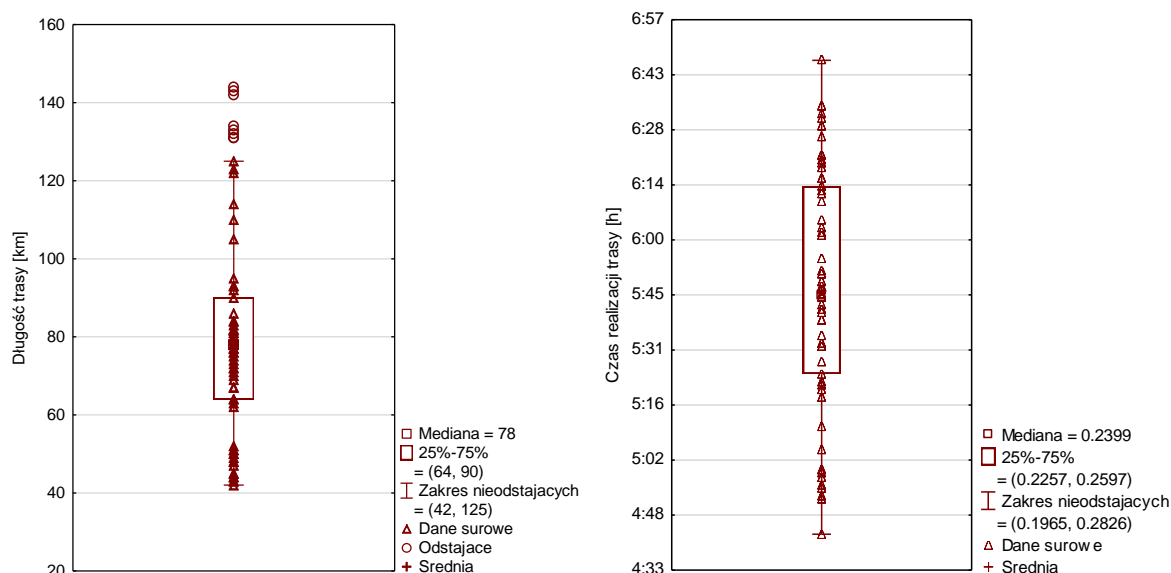
Tablica 6.5. Zestawienie wyznaczonych statystyk dla tras zbiórki odpadów tworzyw sztucznych (opracowanie własne)

| | N | Średnia \bar{x} | Mediana M_e | Wartość min | Wartość max | Odchylenie std. σ | Błąd std. |
|----------------------------|----|-------------------|---------------|-------------|-------------|--------------------------|-----------|
| Zużycie paliwa | 74 | 26.09 | 23.4 | 12.6 | 43.20 | 9.48 | 1.10 |
| Długość trasy [km] | 74 | 80.5 | 78.0 | 42.0 | 144 | 27.3 | 3.17 |
| Czas przejazdu trasy [min] | 74 | 346.59 | 345.5 | 283.0 | 407 | 30.62 | 3.56 |

Tablica 6.5. cd.

| | N | Średnia \bar{x} | Mediana M_e | Wartość min | Wartość max | Odchylenie std. σ | Błąd std. |
|---|----|-------------------|---------------|-------------|-------------|--------------------------|-----------|
| Miernik masy zebranych odpadów [kg/km] | 74 | 25.4 | 26.2 | 11.73 | 41.4 | 7.09 | 0.82 |
| Miernik masy zebranych odpadów [kg/godz.] | 74 | 324.3 | 328.8 | 213.61 | 394.0 | 37.17 | 4.32 |
| Koszty osobowe [PLN] | 74 | 368.3 | 363.54 | 286.31 | 431.0 | 35.6 | 4.14 |

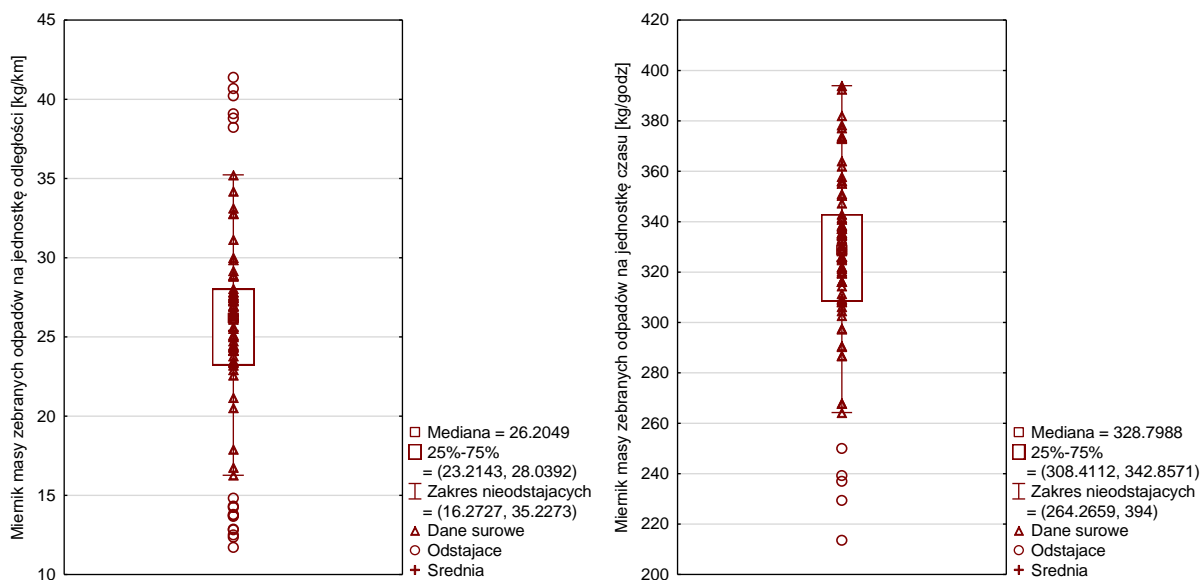
Na rysunku 6.9 przedstawiono wykres ramka-wąsy dla próby reprezentatywnej (N=74) długości zrealizowanych tras oraz czasu przejazdu.



Rys. 6.9. Długości wykonywanych tras (a) i czas realizacji (b) dla próby reprezentatywnej zbiorów odpadów (opracowanie własne)

Długość realizowanych tras zbiórki dla wybranej próby reprezentatywnej zawiera się w przedziale od 40 do 140 km. Z powodu znacznej odległości punktów odbioru przypisanych do niektórych tras wynikających z topografii gmin realizowane są trasy dłuższe i w niektórych przypadkach długość tras dochodzi do 140 km. Czas realizacji tras, które zawierają punkty odbioru zlokalizowane w małym rozproszeniu jest bardzo zbliżony i wynosi około 6 godz, natomiast dla tras, w których występują punkty znacznie oddalone, łączny czas realizacji trasy rośnie z uwagi na konieczność dojazdu do punktu.

Na rysunku 6.10 przedstawiono wartości mierników masy zebranych odpadów na jednostkę odległości i czasu dla próby reprezentatywnej wybranych zbiórek odpadów z tworzyw sztucznych.



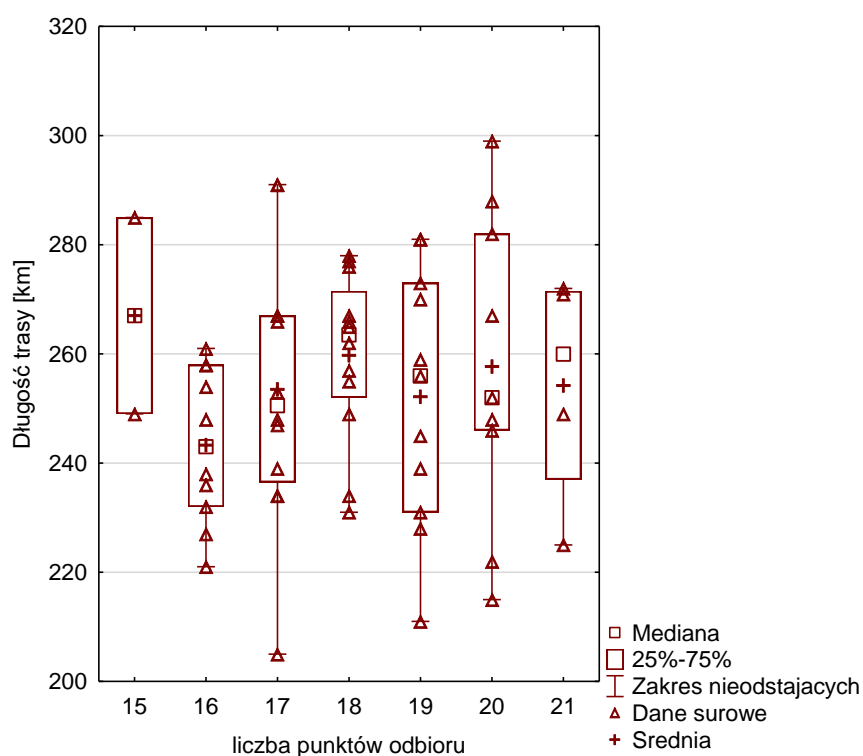
Rys. 6.10. Mierniki masy zebranych odpadów na jednostkę odległości (a) i czasu (b) dla próby reprezentatywnej zbiórek odpadów (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika masy zebranych odpadów na jednostkę odległości wynosi ok. 25 [kg/km], natomiast średnia wartość miernika masy zebranych odpadów na jednostkę czasu wynosi ok. 324 [kg/godz.].

Trasy zbiórki odpadów wielkogabarytowych są realizowane na żądanie. Z całej populacji tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych wybrano próbę reprezentatywną z uwzględnieniem liczby punktów odbioru odpadów powyżej 15. Trasy zbiórki odpadów wielkogabarytowych można klasyfikować jako trasy krótkie i trasy długie. Trasy zbiórki odpadów wielkogabarytowych zawierały od 15 do 21 punktów odbioru. Zestawienie zależności długości tras zbiórki dla liczby punktów odbioru dla próby reprezentatywnej zostało przedstawione na rysunku 6.11, natomiast zależności czasu przejazdu na rysunku 6.12. Dla zebranych danych wyznaczono podstawowe statystyki, które zostały zawarte w tabelicy 6.6.

Tablica 6.6. Zestawienie wyznaczonych statystyk dla tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych (opracowanie własne)

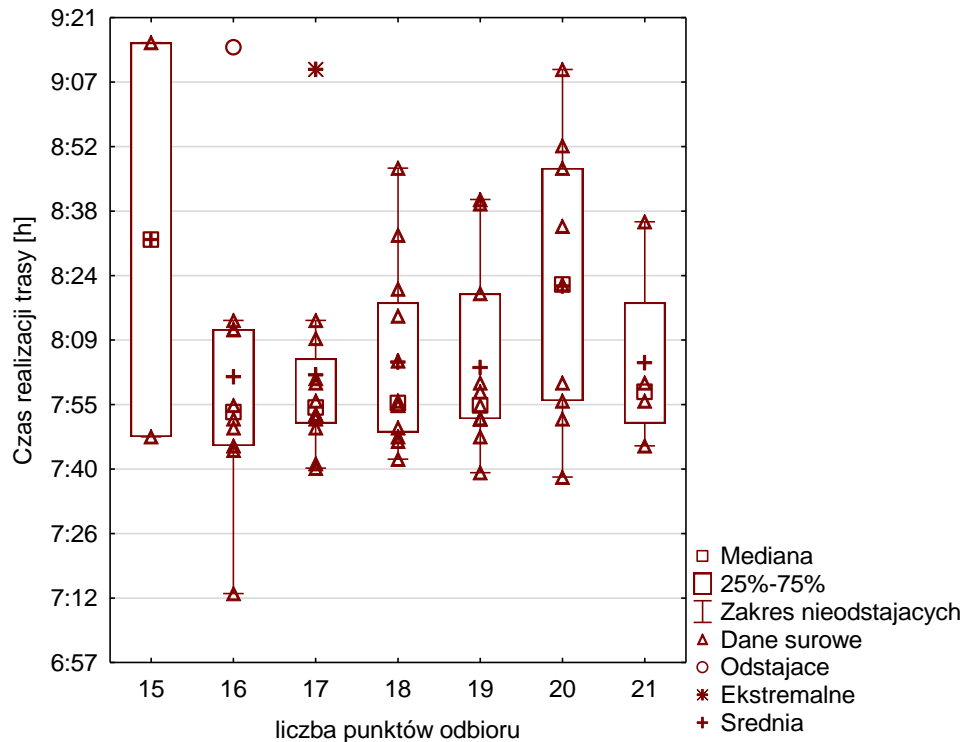
| | N | Średnia \bar{x} | Mediana M_e | Wartość min | Wartość max | Odchylenie std. s | Błąd std. |
|---|----|-------------------|---------------|-------------|-------------|---------------------|-----------|
| Zużycie paliwa | 60 | 38.2 | 38.3 | 30.8 | 44.0 | 3.3 | 0.4 |
| Długość trasy [km] | 60 | 253.9 | 254.5 | 205.0 | 299.0 | 21.6 | 2.8 |
| Miernik masy zebranych odpadów [kg/km] | 60 | 7.1 | 7.1 | 5.4 | 10.1 | 1.1 | 0.1 |
| Miernik masy zebranych odpadów [kg/godz.] | 60 | 220.6 | 220.5 | 142.7 | 292.9 | 31.8 | 4.1 |
| Koszty osobowe [PLN] | 60 | 702.8 | 699.9 | 586.5 | 879.2 | 81.2 | 10.5 |



Rys. 6.11. Zależność długości tras zbiórki dla liczby punktów odbioru dla próby reprezentatywnej zbiórki odpadów wielkogabarytowych na żądanie (opracowanie własne)

Długość trasy zbiórki odpadów wielkogabarytowych jest zależna od liczby punktów odbioru i ilości odbieranych odpadów. Odpady wielkogabarytowe są odpadami o dużych rozmiarach – są to meble, dywany, rowery, itp. W przypadku konieczności

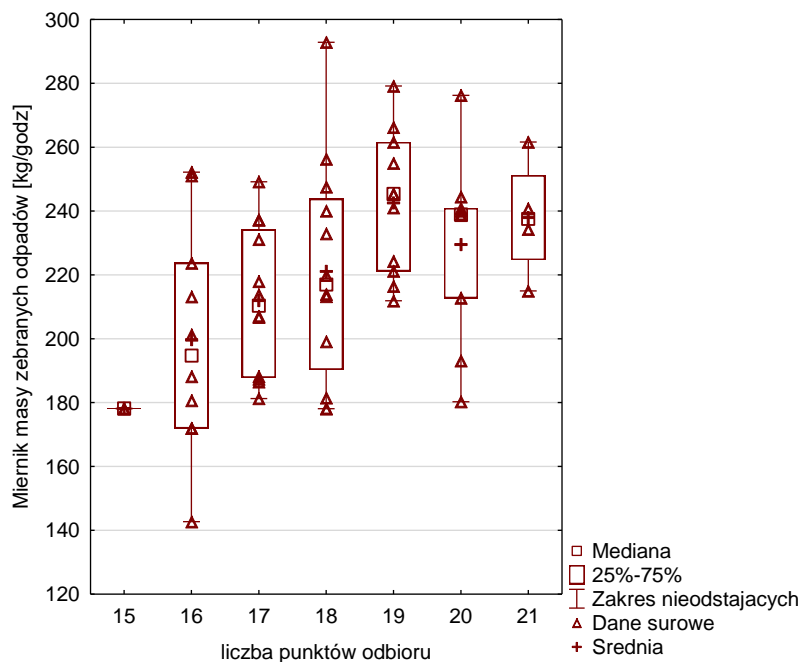
odbioru dużych ilości w poszczególnych punktach szybko ulega zapełnieniu przestrzeń ładunkowa pojazdu, co powoduje konieczność przejazdu do miejsca rozładunku. Istotny jest dobór odpowiedniego pojazdu o dużej pojemności zabudowy ładunkowej.



Rys. 6.12. Zależność czasu realizacji tras zbiórki dla liczby punktów odbioru dla próby reprezentatywnej zbiórki odpadów wielkogabarytowych na żądanie (opracowanie własne)

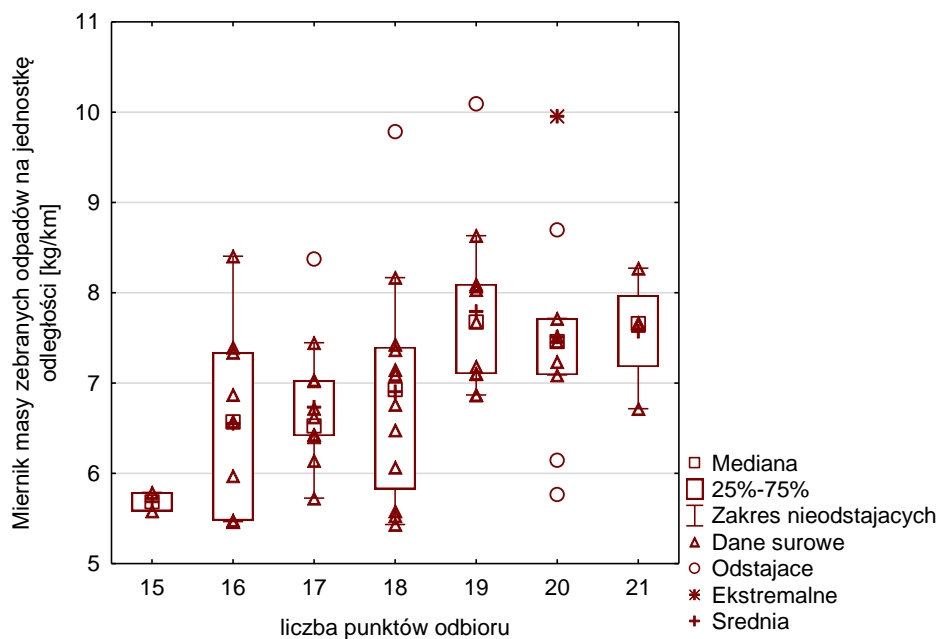
Podobnie jak w przypadku długości trasy zależność czasu realizacji trasy zbiórki zależy od liczby punktów odbioru oraz ilości odebranych odpadów. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na czas realizacji trasy jest czas załadunku odpadów wielkogabarytowych na pojazd. Im większa ilość odpadów tym czas załadunku będzie dłuższy. Należy jeszcze uwzględnić, że odpady wielkogabarytowe mogą mieć również nieregularny kształt, co dodatkowo wpływa na czas załadunku.

Na rysunku 6.13 została przedstawiona zależność miernika masy zebranych odpadów na jednostkę czasu dla liczby punktów odbioru dla próby reprezentatywnej zbiórki odpadów wielkogabarytowych na żądanie, natomiast na rysunku 6.14 przedstawiono zależność miernika zebranych odpadów na jednostkę odległości.



Rys. 6.13. Zależność miernika masy zebranych odpadów na jednostkę czasu dla liczby punktów odbioru dla próby reprezentatywnej zbiórki odpadów wielkogabarytowych na żądanie (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika masy zebranych odpadów na jednostkę czasu wynosi ok. 220 [kg/godz.]. Na wartość miernika masy zebranych odpadów na jednostkę czasu wpływa głównie czas załadunku odpadów zależny od ilości odpadów w danym punkcie, oraz czas przejazdów pomiędzy punktami i do miejsca rozładunku.



Rys. 6.14. Zależność miernika zebranych odpadów na jednostkę odległości dla liczby punktów odbioru dla próby reprezentatywnej zbiórki odpadów wielkogabarytowych na żądanie (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika masy zebranych odpadów wielkogabarytowych na jednostkę odległości wynosi ok. 7 [kg/km]. Na wartość miernika masy zebranych odpadów na jednostkę odległości wpływ ma rozproszenie punktów odbioru oraz ilość przejazdów do miejsca rozładunku.

6.5. Wyniki badań czasu i długości tras przed optymalizacją dla wybranych gmin w województwie śląskim

Trasy o numerach 1,2,3,4,5,6,7 są trasami zbiórek odpadów segregowanych według stałych punktów odbioru. Zbiórka odpadów jest realizowana cyklicznie wg. określonego harmonogramu. Zbiórki realizowane są dla sieci transportowej z szerokimi oknami czasowymi. Do obliczeń wybrano 8 reprezentatywnych przejazdów każdej z tras. Dla tras obliczono średnią arytmetyczną wszystkich parametrów realizacji trasy: czasu realizacji [godz.], długości trasy [km], średniej prędkości [km/godz.], oraz masy zebranych odpadów [t]. W kolejnym kroku wyznaczono odchylenie standardowe i średnią. Wyniki zestawiono w tablicach 6.7 - 6.13.

Tablica 6.7. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 1 (opracowanie własne)

| Lp. | Czas realizacji trasy [godz.] | Długość trasy [km] | Średnia prędkość [km/godz.] | Liczba punktów zbiórki | Masa odpadów [t] | Zużycie paliwa [l] |
|------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 03:32:19 | 41 | 29 | 50 | 1,20 | 17 |
| 2 | 03:37:30 | 38 | 26 | 50 | 1,02 | 16 |
| 3 | 02:59:14 | 33 | 28 | 50 | 0,80 | 14 |
| 4 | 03:26:54 | 44 | 30 | 50 | 1,15 | 18 |
| 5 | 03:41:10 | 42 | 42 | 50 | 1,06 | 18 |
| 6 | 03:55:41 | 56 | 32 | 50 | 0,95 | 24 |
| 7 | 02:42:02 | 42 | 29 | 50 | 0,88 | 18 |
| 8 | 02:55:23 | 38 | 28 | 50 | 1,23 | 16 |
| Średnia [-] | 03:21:17 | 42 | 31 | 50 | 1,04 | 18 |
| Odchylenie standardowe | $\sqrt{00:23:19}$ | $\sqrt{7,48}$ | $\sqrt{5,61}$ | | $\sqrt{0,16}$ | $\sqrt{3,15}$ |

Trasa obejmuje zbiórkę odpadów segregowanych z 50 punktów w zwartej zabudowie wielorodzinnej miejskiej. Średni czas realizacji zbiórki przy średniej prędkości 31km/godz. wynosi ok 3 godz. 21 min, średnio około 4 min/punkt. Podczas zbiórki na każdy przejazd zebrano średnio 1,04 tony odpadów (tab. 6.7).

Trasa nr 2 obejmuje obsługę 59 punktów, w których gromadzone są odpady segregowane (tab. 6.8). Trasa nr 2 zawiera o 9 punktów więcej w porównaniu do trasy nr 1. Z uwagi na większe rozproszenie punktów w terenie średni czas realizacji trasy wynosi ok. 5 godz. i jest dłuższy od czasu przejazdu trasy nr 1.

Tablica 6.8. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 2 (opracowanie własne)

| Lp. | Czas realizacji trasy [godz.] | Długość trasy [km] | Średnia prędkość [km/godz.] | Liczba punktów zbiórki | Masa odpadów [t] | Zużycie Paliwa [l] |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 04:47:28 | 115 | 38 | 59 | 2,02 | 48 |
| 2 | 05:19:25 | 125 | 34 | 59 | 1,78 | 53 |
| 3 | 04:53:39 | 133 | 37 | 59 | 1,56 | 56 |
| 4 | 04:58:27 | 142 | 38 | 59 | 1,95 | 60 |
| 5 | 05:23:07 | 131 | 38 | 59 | 1,64 | 55 |
| 6 | 04:56:13 | 143 | 36 | 59 | 1,84 | 60 |
| 7 | 04:55:55 | 110 | 38 | 59 | 1,79 | 46 |
| 8 | 04:59:03 | 105 | 37 | 59 | 1,88 | 44 |
| Średnia [¯] | 05:01:40 | 126 | 37 | 59 | 1,81 | 53 |
| Odchylenie standardowe σ | $\sqrt{00:03:43}$ | $\sqrt{11,44}$ | $\sqrt{0,38}$ | $\sqrt{0,00}$ | $\sqrt{0,09}$ | $\sqrt{4,81}$ |

Liczba punktów zbiórki na trasie nr 3 wynosi 82. Punkty zbiórki rozmieszczone są w strefie centrum gminy miejskiej. Średni czas realizacji trasy zbiórki trwa ok. 5 godz. 30 min. przy średniej prędkości pojazdów zbierających 21 km/godz. (tab. 6.9).

Tablica 6.9. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 3 (opracowanie własne)

| Lp. | Czas realizacji trasy [godz.] | Długość trasy [km] | Średnia prędkość [km/godz.] | Liczba punktów zbiórki | Masa odpadów [t] | Zużycie paliwa [l] |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 05:19:18 | 63 | 19 | 82 | 1,70 | 26 |
| 2 | 05:41:57 | 76 | 21 | 82 | 1,85 | 32 |
| 3 | 05:33:20 | 77 | 21 | 82 | 2,10 | 32 |
| 4 | 05:33:50 | 64 | 20 | 82 | 1,85 | 27 |
| 5 | 05:11:08 | 62 | 20 | 82 | 1,63 | 26 |
| 6 | 05:46:40 | 69 | 20 | 82 | 1,92 | 29 |
| 7 | 05:25:27 | 70 | 22 | 82 | 1,76 | 29 |
| 8 | 05:21:06 | 72 | 23 | 82 | 1,65 | 30 |
| Średnia [¯] | 05:29:06 | 69 | 21 | 82 | 1,81 | 29 |
| Odchylenie standardowe σ | $\sqrt{00:03:04}$ | $\sqrt{3,37}$ | $\sqrt{0,55}$ | | $\sqrt{0,10}$ | $\sqrt{1,41}$ |

Masa odpadów zebranych podczas realizacji tras zawarta jest w przedziale od 1,63 tony do 2,10 tony i wynosi średnio 1,81 tony odpadów zbieranych przy realizacji trasy nr 3 (tab. 6.9).

Średni czas realizacji trasy nr 4 wynosi ok 6 godz. przy średniej prędkości 19 km/godz., natomiast średnia masa zbieranych odpadów równa jest 2,09 tony (tab. 6.10).

Tablica 6.10. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 4 (opracowanie własne)

| Lp. | Czas realizacji trasy [godz.] | Długość trasy [km] | Średnia prędkość [km/godz.] | Liczba punktów zbiórki | Masa odpadów [t] | Zużycie paliwa [l] |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 06:19:42 | 78 | 21 | 107 | 2,25 | 33 |
| 2 | 05:45:44 | 80 | 20 | 107 | 1,93 | 34 |
| 3 | 05:52:11 | 79 | 20 | 107 | 1,88 | 33 |
| 4 | 06:27:29 | 78 | 18 | 107 | 2,13 | 33 |
| 5 | 05:45:44 | 80 | 20 | 107 | 1,96 | 34 |
| 6 | 05:48:11 | 79 | 22 | 107 | 2,10 | 33 |
| 7 | 06:37:29 | 75 | 16 | 107 | 2,24 | 32 |
| 8 | 06:32:13 | 80 | 19 | 107 | 2,19 | 34 |
| Średnia [-] | 06:01:05 | 79 | 19 | 107 | 2,09 | 33 |
| Odchylenie standardowe σ | $\sqrt{00:09:47}$ | $\sqrt{0,25}$ | $\sqrt{1,24}$ | | $\sqrt{0,07}$ | $\sqrt{0,11}$ |

Trasa nr 5 jest kolejną trasą zbiórki odpadów tworzyw sztucznych poddaną analizie. Trasa obejmuje 58 punktów zbiórki (tab. 6.11). Średni czas realizacji trasy trwa ok. 3 godz. 30 min.

Tablica 6.11. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 5 (opracowanie własne)

| Lp. | Czas realizacji trasy [godz.] | Długość trasy [km] | Średnia prędkość [km/godz.] | Liczba punktów zbiórki | Masa odpadów [t] | Zużycie paliwa [l] |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 03:22:09 | 68 | 39 | 58 | 2,16 | 29 |
| 2 | 03:28:54 | 67 | 37 | 58 | 1,80 | 28 |
| 3 | 03:46:02 | 71 | 37 | 58 | 1,76 | 30 |
| 4 | 03:32:50 | 68 | 38 | 58 | 1,93 | 29 |
| 5 | 03:39:33 | 58 | 35 | 58 | 2,06 | 24 |
| 6 | 03:52:35 | 63 | 36 | 58 | 2,21 | 26 |
| 7 | 03:19:10 | 64 | 37 | 58 | 1,95 | 27 |
| 8 | 03:20:55 | 62 | 36 | 58 | 2,11 | 26 |
| Średnia [-] | 03:32:46 | 65 | 37 | 58 | 2,00 | 27 |
| Odchylenie standardowe σ | $\sqrt{00:05:01}$ | $\sqrt{1,86}$ | $\sqrt{0,29}$ | | $\sqrt{0,10}$ | $\sqrt{0,78}$ |

Trasa nr 6 zawiera 41 punktów zbiórki podczas realizacji trasy (tab. 6.12). Średni czas realizacji trasy wynosi około 6 godz. 41 min. przy średniej prędkości pojazdów 36 km/godz. Średnia masa zebranych odpadów podczas realizacji trasy równa jest 1,56 tony.

Tablica 6.12. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 6 (opracowanie własne)

| Lp. | Czas realizacji trasy [godz.] | Długość trasy [km] | Średnia prędkość [km/godz.] | Liczba punktów zbiórki | Masa odpadów [t] | Zużycie paliwa [l] |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 07:01:00 | 44 | 29 | 41 | 1,36 | 18 |
| 2 | 07:12:00 | 58 | 42 | 41 | 1,60 | 24 |
| 3 | 06:45:00 | 51 | 32 | 41 | 1,45 | 21 |
| 4 | 06:12:00 | 52 | 29 | 41 | 1,55 | 22 |
| 5 | 06:05:00 | 43 | 38 | 41 | 1,76 | 18 |
| 6 | 06:22:00 | 44 | 38 | 41 | 1,65 | 18 |
| 7 | 07:10:00 | 47 | 36 | 41 | 1,52 | 20 |
| 8 | 06:44:00 | 55 | 38 | 41 | 1,59 | 23 |
| Średnia [¯] | 06:41:22 | 49 | 36 | 41 | 1,56 | 21 |
| Odchylenie standardowe σ | $\sqrt{00:11:46}$ | $\sqrt{4,46}$ | $\sqrt{4,23}$ | | $\sqrt{0,07}$ | $\sqrt{1,87}$ |

Trasa nr 7 obejmuje 43 punkty zbiórki na terenie zabudowy zwartej wielorodzinnej (tab. 6.13). Średni czas realizacji trasy dla 8 przejazdów wyniósł około 5 godz 54 min. Podczas zbiórki zebrano średnio 1,60 tony odpadów.

Tablica 6.13. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 7 (opracowanie własne)

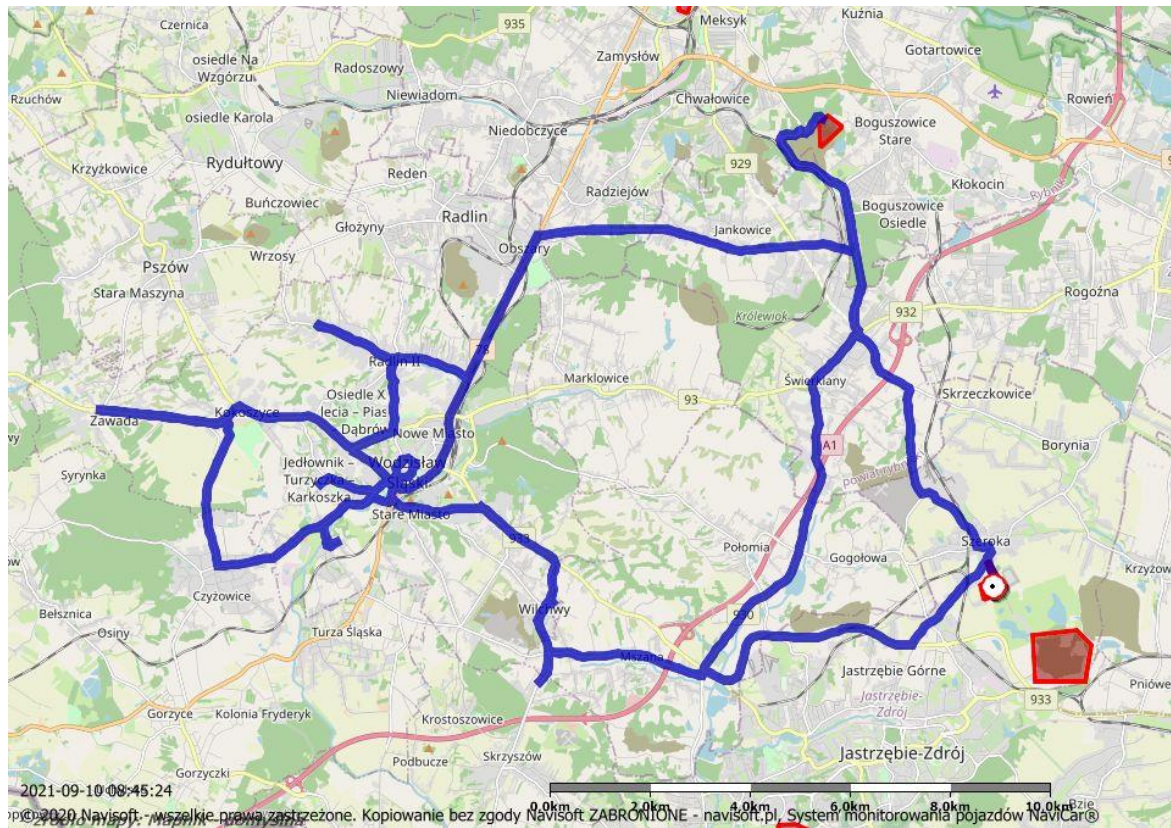
| Lp. | Czas realizacji trasy [godz.] | Długość trasy [km] | Średnia prędkość [km/godz.] | Liczba punktów zbiórki | Masa odpadów [t] | Zużycie paliwa [l] |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| 1 | 05:32:00 | 43 | 35 | 43 | 1,75 | 18 |
| 2 | 05:45:00 | 47 | 27 | 43 | 1,54 | 20 |
| 3 | 06:22:00 | 51 | 31 | 43 | 1,36 | 21 |
| 4 | 05:45:00 | 43 | 32 | 43 | 1,78 | 18 |
| 5 | 06:12:00 | 44 | 29 | 43 | 1,55 | 18 |
| 6 | 06:01:00 | 48 | 32 | 43 | 1,44 | 20 |
| 7 | 06:05:00 | 42 | 31 | 43 | 1,63 | 18 |
| 8 | 05:32:00 | 50 | 28 | 43 | 1,71 | 21 |
| Średnia [¯] | 05:54:15 | 46 | 31 | 43 | 1,60 | 19 |
| Odchylenie standardowe σ | $\sqrt{00:06:48}$ | $\sqrt{1,83}$ | $\sqrt{1,50}$ | | $\sqrt{0,10}$ | $\sqrt{0,77}$ |

Trasy oznaczone numerami 8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18 są trasami odbioru odpadów wielkogabarytowych. Odbiór odpadów odbywa się na żądanie, po zgłoszeniu chęci odbioru odpadów przez mieszkańców. Zgłoszenia przez mieszkańców dokonywane są telefonicznie lub mailowo. Trasy są planowane przez dyspozytorów wg. określonej liczby zgłoszeń. W tabelicy 6.14 zestawiono główne parametry tras takie jak: czas przejazdu [godz.], długość trasy [km], średnią prędkość pojazdów [km/godz.], oraz masę zebranych odpadów [t].

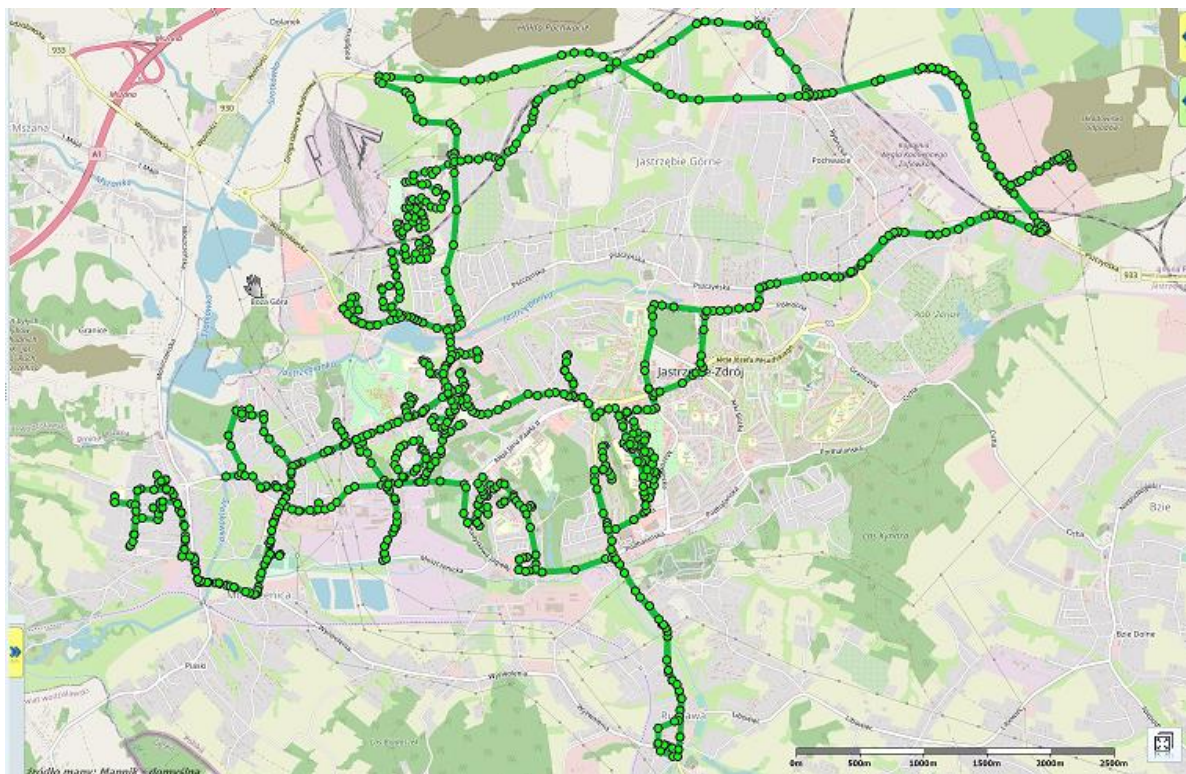
Tablica 6.14. Zestawienie parametrów realizacji tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych oznaczonych numerami od 8 do 18 (opracowanie własne)

| Lp. | Czas realizacji trasy [godz.] | Długość trasy [km] | Średnia prędkość [km/godz.] | Liczba punktów zbiórki | Masa odpadów [t] | Zużycie paliwa [l] |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| 8 | 07:42:51 | 254 | 42 | 17 | 1,78 | 38 |
| 9 | 09:16:59 | 285 | 43 | 15 | 1,65 | 43 |
| 10 | 09:15:14 | 222 | 40 | 16 | 1,32 | 33 |
| 11 | 08:53:54 | 300 | 40 | 20 | 2,12 | 45 |
| 12 | 06:30:40 | 179 | 42 | 14 | 1,55 | 27 |
| 13 | 07:10:10 | 195 | 39 | 16 | 1,7 | 30 |
| 14 | 06:40:00 | 181 | 41 | 19 | 1,74 | 27 |
| 15 | 07:40:40 | 176 | 43 | 19 | 1,82 | 27 |
| 16 | 06:30:00 | 171 | 44 | 18 | 1,65 | 26 |
| 17 | 07:40:00 | 183 | 41 | 19 | 1,78 | 28 |
| 18 | 06:35:00 | 186 | 38 | 16 | 1,65 | 28 |
| Średnia [¯] | 07:37:46 | 212 | 41 | 17 | 2 | 32 |
| Odchylenie standardowe σ | $\sqrt{01:32:26}$ | $\sqrt{102,69}$ | $\sqrt{0,82}$ | $\sqrt{2,19}$ | $\sqrt{0,22}$ | $\sqrt{14,81}$ |

Trasy zbiórki odpadów wielkogabarytowych zawierają od 14 do 20 punktów zbiórki. Zakres długości tras zawiera się w przedziale od 171 km do 300 km. Średnia długość trasy wynosi 212 km, średni czas prowadzenia zbiórek trwał 7 godz. i 37 minut. Podczas zbiórki zebrano średnio 1,17 tony odpadów wielkogabarytowych dla jednej trasy. Na rysunku 6.15 oraz 6.16 przedstawiono przykładowe wizualizacje tras przejazdu pojazdów zbierających odpady wielkogabarytowe i segregowane. [Opracowanie własne]



Rys. 6.15. Wizualizacja trasy przejazdu pojazdu zbierającego odpady na terenie zabudowy wielorodzinnej miejskiej dla trasy nr 2 (opracowanie własne)



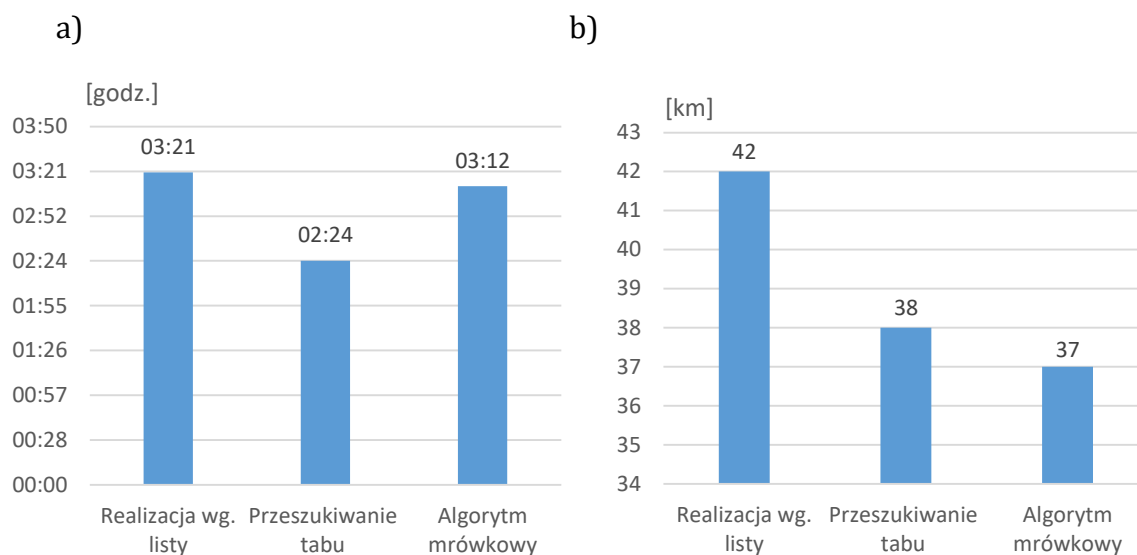
Rys. 6.16. Wizualizacja trasy przejazdu pojazdu zbierającego odpady na terenie zabudowy wielorodzinnej miejskiej dla trasy nr 3 (opracowanie własne)

6.6. Wyniki optymalizacji tras z wykorzystaniem algorytmów przeszukiwania tabu i mrówkowego

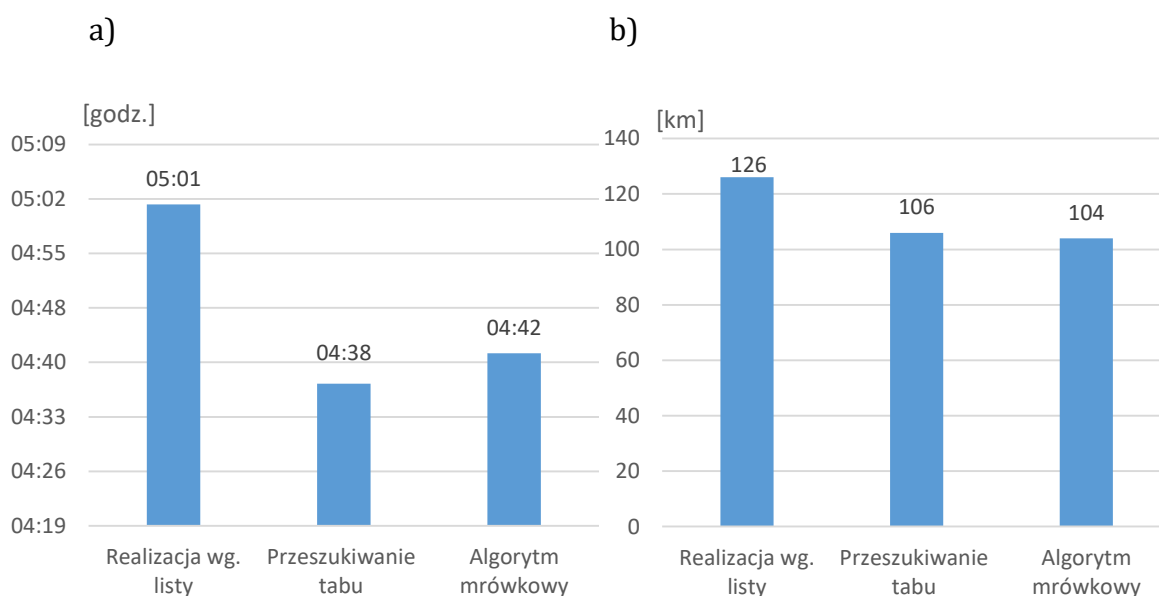
Planowanie tras odbioru odpadów stanowi bardzo duże wyzwanie w firmach odbierających odpady. Z powodu braku wykorzystania odpowiednich systemów informatycznych i algorytmów umożliwiających optymalizację tras, planowanie opiera się na doświadczeniu osób zarządzających zbiórka odpadów. Problem komiwożera [175] występuje w każdej sytuacji, gdy trzeba zaplanować trasę zbiórki odpadów. Kadra zarządzająca w firmach zbierających odpady coraz częściej poszukuje narzędzi, które mogą obniżyć koszty zbiórki tzn. czas przejazdu oraz długość trasy. Skrócenie czasu i długości trasy należy rozpatrywać w dwóch aspektach. Z jednej strony daje możliwość wykorzystania pojazdu w trakcie dnia roboczego do zbiórki innych odpadów, a z drugiej powoduje obniżenie zanieczyszczeń emitowanych podczas spalania paliw w silnikach pojazdów.

Dla każdej z zaplanowanych tras przedstawionych w rozdziale 6.5 przeprowadzono optymalizację z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji. Do obliczeń wykorzystano algorytm przeszukiwania tabu (przedstawiony na rys. 5.2), natomiast obliczenia z wykorzystaniem algorytmu mrówkowego obejmowały zależności (27-30). Do obliczeń wykorzystany został system informatyczny SZO. Obliczona funkcja celu (22) w systemie SZO wg zależności (23) – (25) umożliwiła przygotowanie sekwencji przejazdu pojazdów zbierających odpady i wydruk lokalizacji punktów na mapach cyfrowych. Model sieci transportowej (7) i lokalizacji punktów odbioru odpadów (8) został odwzorowany z wykorzystaniem map cyfrowych. Na wykresach przedstawiono zestawienie trasy wykonywanej wg doświadczenia dyspozytora oraz zoptymalizowany czas przejazdu oraz długość trasy. Porównania wyników obliczeń zestawiono na rysunkach 6.17 - 6.23.

Rysunek 6.17 przedstawia porównanie najważniejszych parametrów realizacji trasy nr 1. Zarówno czas realizacji trasy jak i długość trasy uległy skróceniu po optymalizacji. Długość trasy uległa skróceniu o ok. 14%.



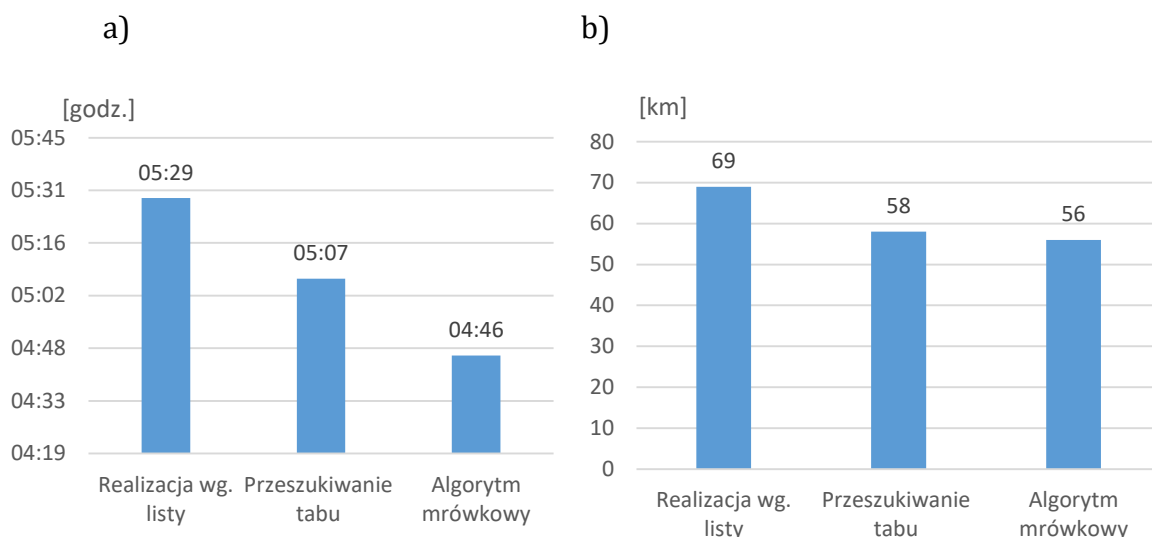
Rys. 6.17. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 1: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)



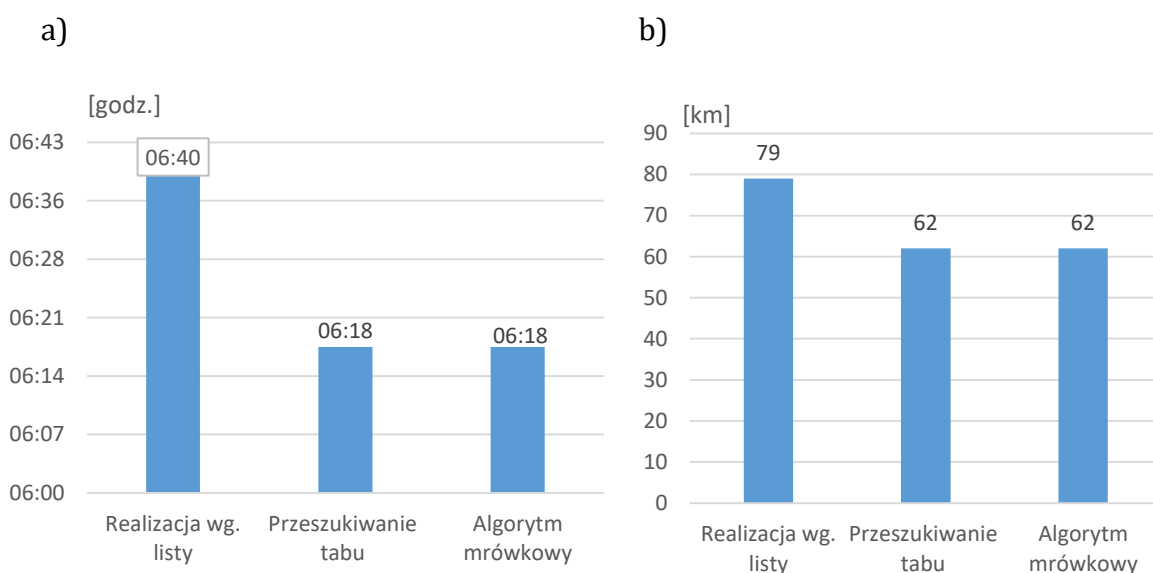
Rys. 6.18. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 2: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

Podczas realizacji trasy nr 2, czas realizacji trasy uległ skróceniu o ok. 7%, natomiast długość trasy o ok. 20% (rys. 6.18).

Czas przejazdu trasą nr 3 uległ skróceniu po optymalizacji przy pomocy przeszukiwania tabu o ok 7%, natomiast czas realizacji trasy przy wykorzystaniu algorytmu mrówkowego skrócono o ok 15%. Skrócenie długości trasy przyjmuje zbliżone wartości o ok. 21% (rys. 6.19).

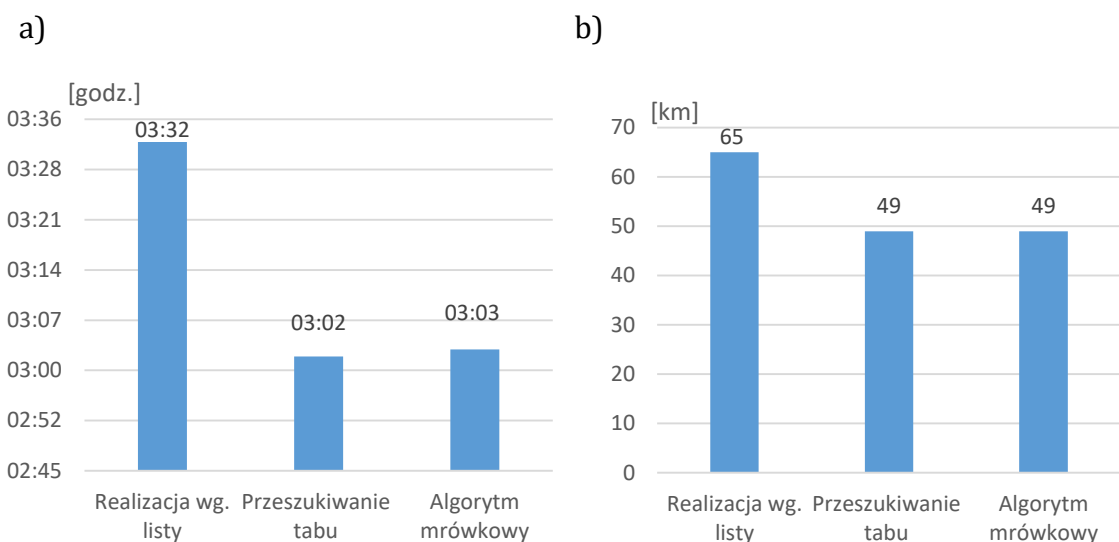


Rys. 6.19. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 3: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)



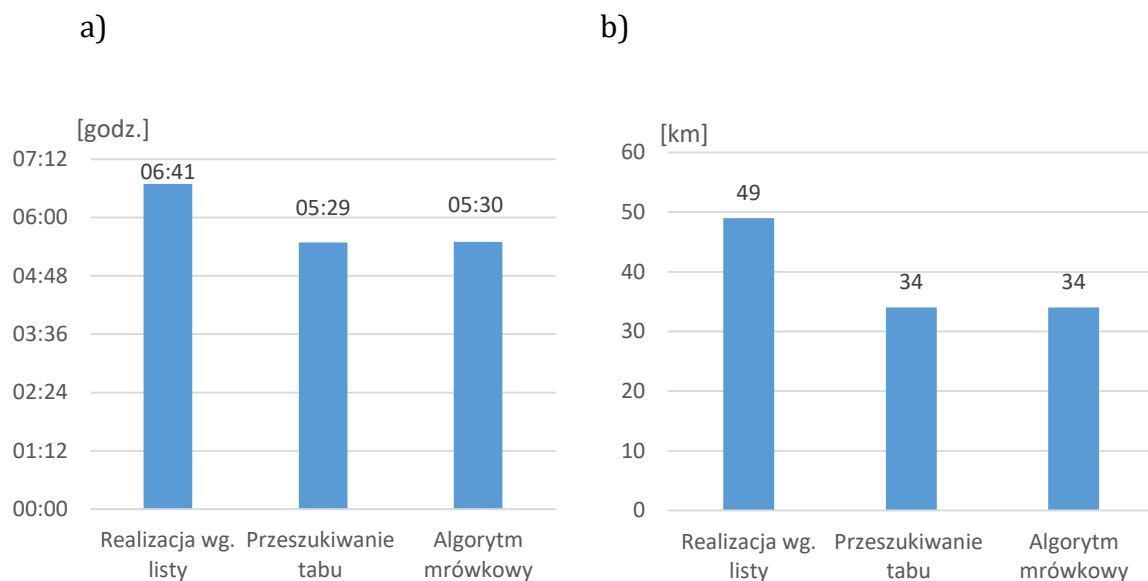
Rys. 6.20. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 4: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

W przypadku trasy nr 4 nastąpiła wyraźna redukcja czasu realizacji trasy z 6 godz. 40 min do 6 godz. 18 min. Długość trasy uległa skróceniu aż o 26% z 79 km do 62 km (rys. 6.20).



Rys. 6.21. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 5: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

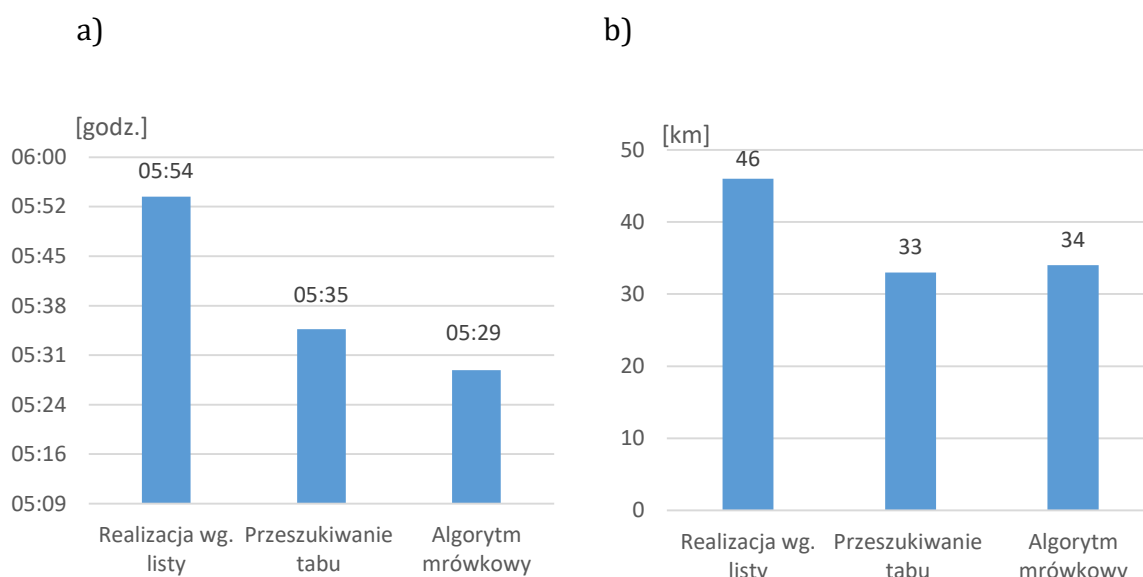
W przypadku realizacji trasy nr 5 można zauważyć wyraźne skrócenie zarówno czasu jak i długości trasy. Czas realizacji trasy zmniejszył się o około 12%, natomiast długość trasy o 16 km, czyli o około 32% (rys.6.21).



Rys. 6.22. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 6: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

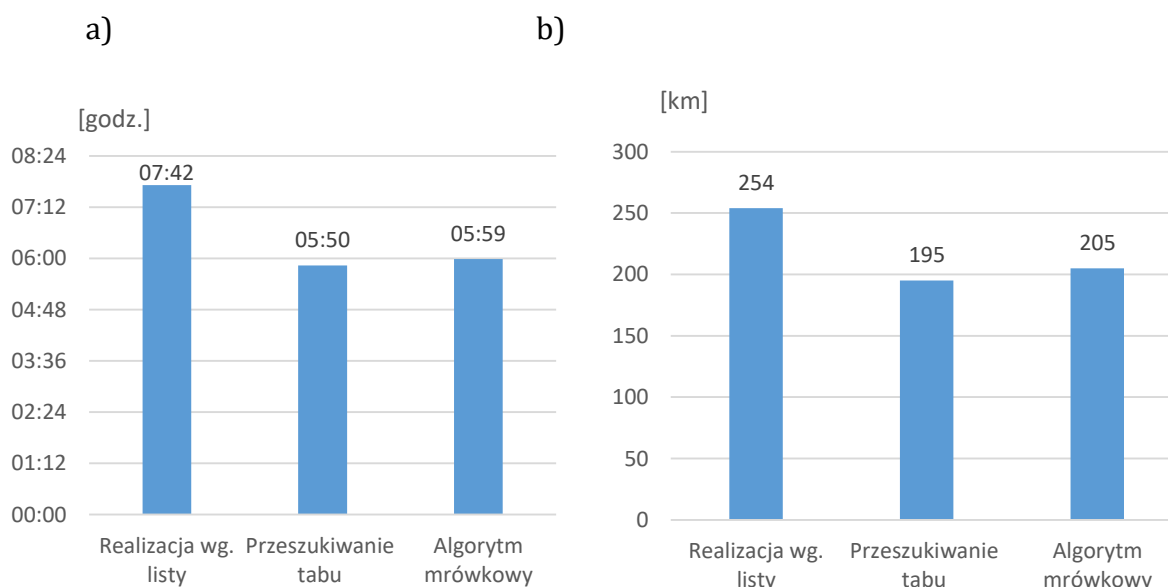
Z wyników przedstawionych na rysunku 6.22 wynika, że skrócenie czasu realizacji trasy wyniosło około 22% - czyli ograniczono czas przejazdu o 1h 10 min. Długość trasy uległa znacznemu skróceniu o 15 km i wyniosła 34 km.

W przypadku realizacji trasy nr 7 (rys. 6.23) podobnie jak w przypadku trasy nr 6 znacząco zmniejszono długość trasy, z 46 km do 33 km w przypadku zastosowania przeszukiwania tabu oraz 34 km w przypadku algorytmu mrówkowego.



Rys. 6.23. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 7: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

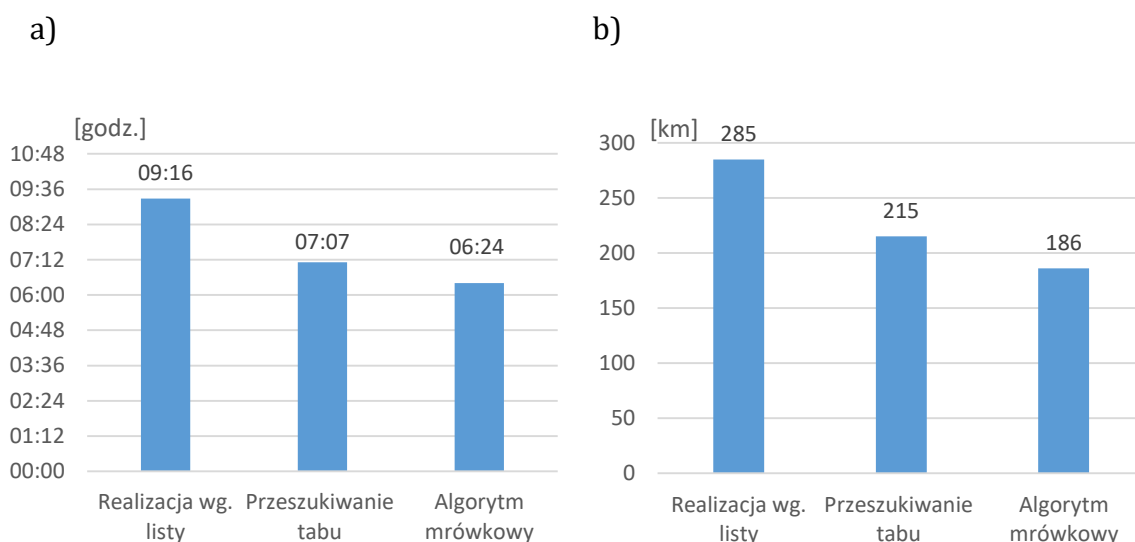
Na rysunkach 6.24 – 6.20 zestawiono wyniki optymalizacji tras przejazdu pojazdów przy zbiórce odpadów wielkogabarytowych. Podobnie jak dla wyników zbiórki odpadów selektywnie zbieranych tworzyw sztucznych, wykresy zawierają czas i odległość według doświadczenia dyspozytora oraz po przeprowadzeniu optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu przeszukiwania tabu oraz mrówkowego.



Rys. 6.24. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 8: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

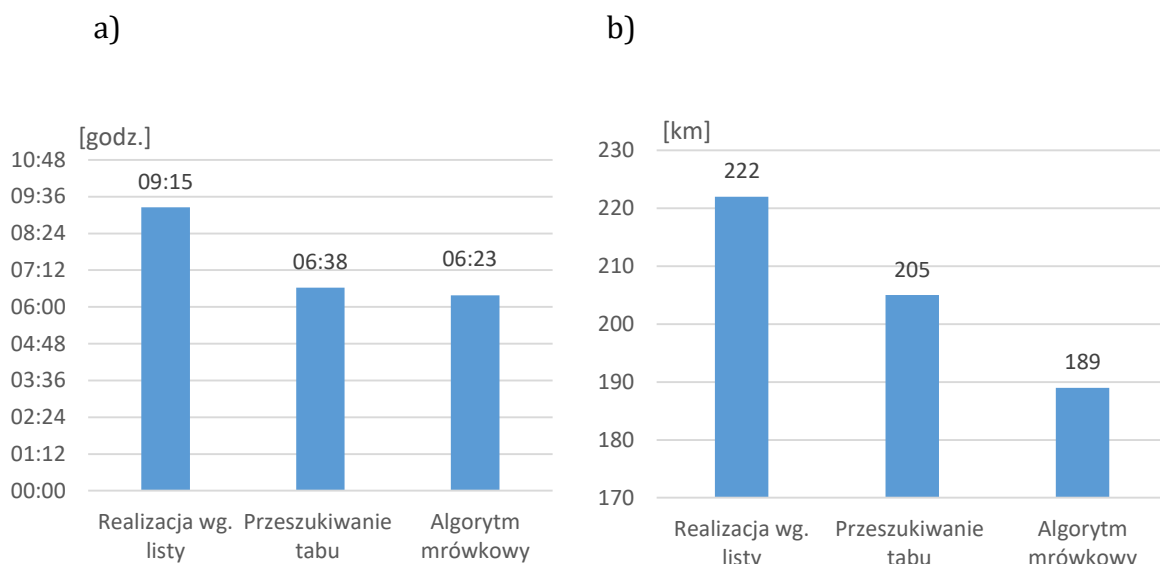
Dla trasy nr 8 uzyskano po optymalizacji skrócenie długości trasy od 49 km do 59 km – czyli o około 20% w stosunku do trasy zaplanowanej przez dyspozytora. Czas trwania trasy został znacząco skrócony o niecałe 2 godziny (rys. 6.24).

Wyniki badań zebrane na rysunku pokazują wymierne skrócenie długości trasy nr 9 po optymalizacji o 70 km dla zastosowanego algorytmu przeszukiwania tabu i aż o 99 km przy zastosowaniu algorytmu mrówkowego, w porównaniu a aktualnie wykonaną trasą przejazdu wynoszącą 285 km (rys. 6.25). Skrócony został również czas trasy po optymalizacji o ponad 2 godz. 9 min. (wg algorytmu przeszukiwania tabu) i o 2 godz. 52 min (wg algorytmu mrówkowego). Uzyskane skrócenie długości tras i czasu ich realizacji po optymalizacji jest znaczące.



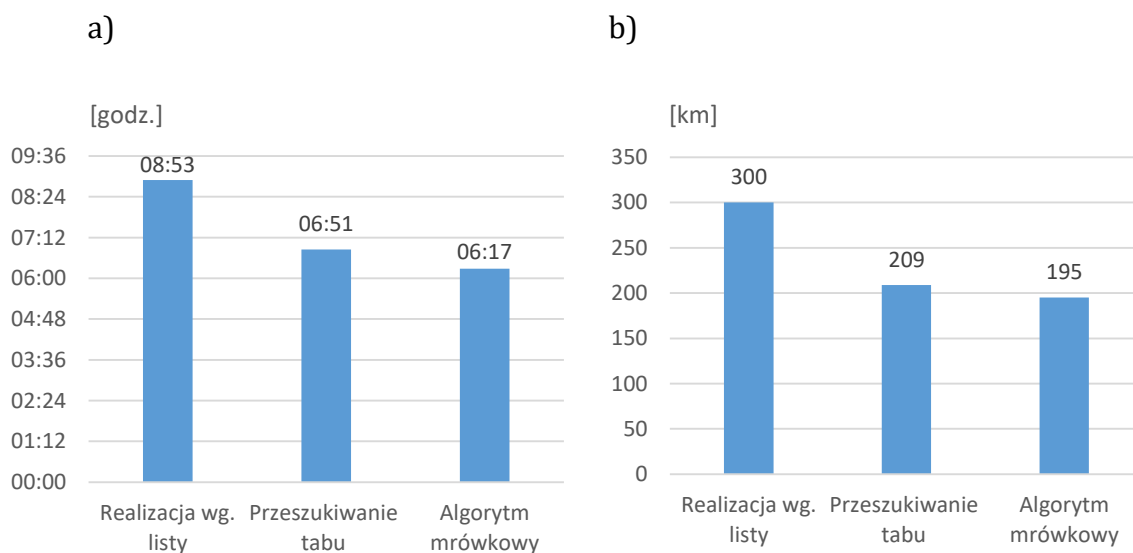
Rys. 6.25. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 9: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

Dla trasy nr 10 wyniki zastosowania różnych algorytmów są zróżnicowane - wskazują na wybór odmiennych tras przejazdu wykazując różnicę skrócenia trasy o 17 km dla algorytmu przeszukiwania tabu a dla mrówkowego o 33 km. Jednak czas przejazdu po optymalizacji jest zbliżony dla obu algorytmów. W porównaniu z wykonaną trasą według planowania dyspozytora czas został bardzo znacząco skrócony o 2 godziny 37 minut oraz o 2 godziny 52 minuty. Skrócenie czasu przejazdu jest znaczące (rys. 6.26).



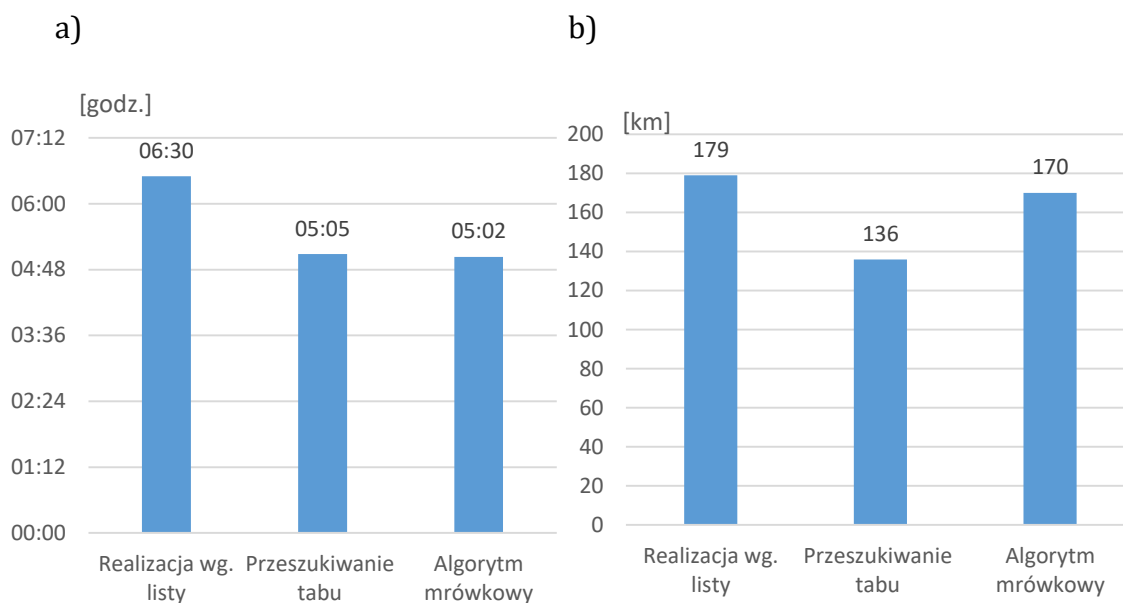
Rys. 6.26. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 10: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

Dla trasy nr 11 skrócono czas i długość przejazdu po optymalizacji (rys. 6.27). Czas realizacji trasy skrócono o około 2 godziny. Długość trasy w przypadku zastosowania przeszukiwania tabu została zmniejszona o ponad 90 km, a w przypadku zastosowania algorytmu mrówkowego aż o 105 km.



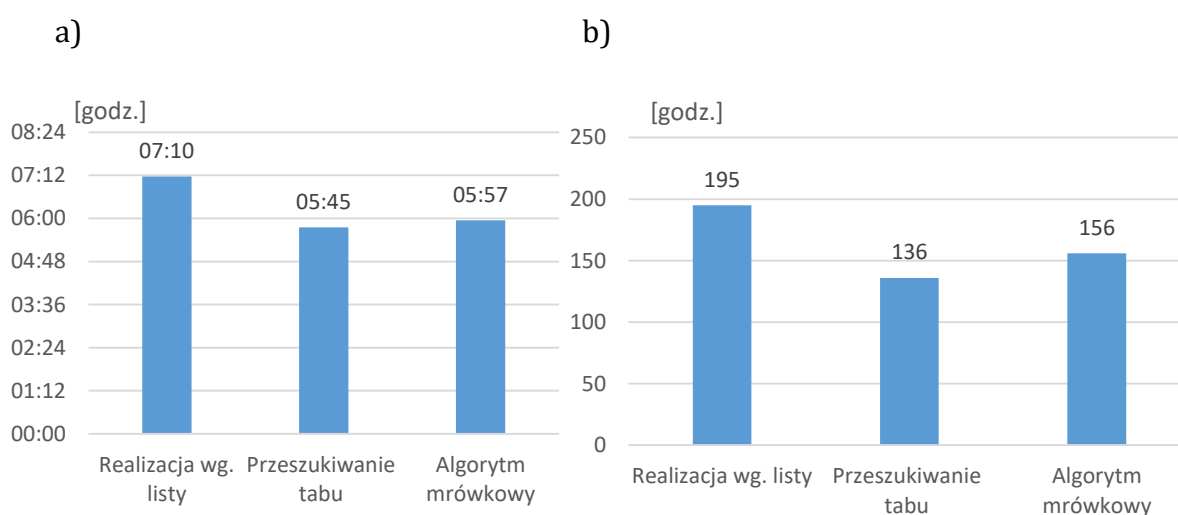
Rys. 6.27. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 11: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

Na rysunku 6.28 zestawiono parametry trasy 12. Czas realizacji trasy uległ skróceniu o około 1 godz. 30 min. Długość trasy w przypadku zastosowania przeszukiwania tabu skrócona została o 43 km, natomiast algorytm mrówkowy pozwolił na nieznaczne skrócenie trasy tylko o 7 km.



Rys. 6.28. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 12: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

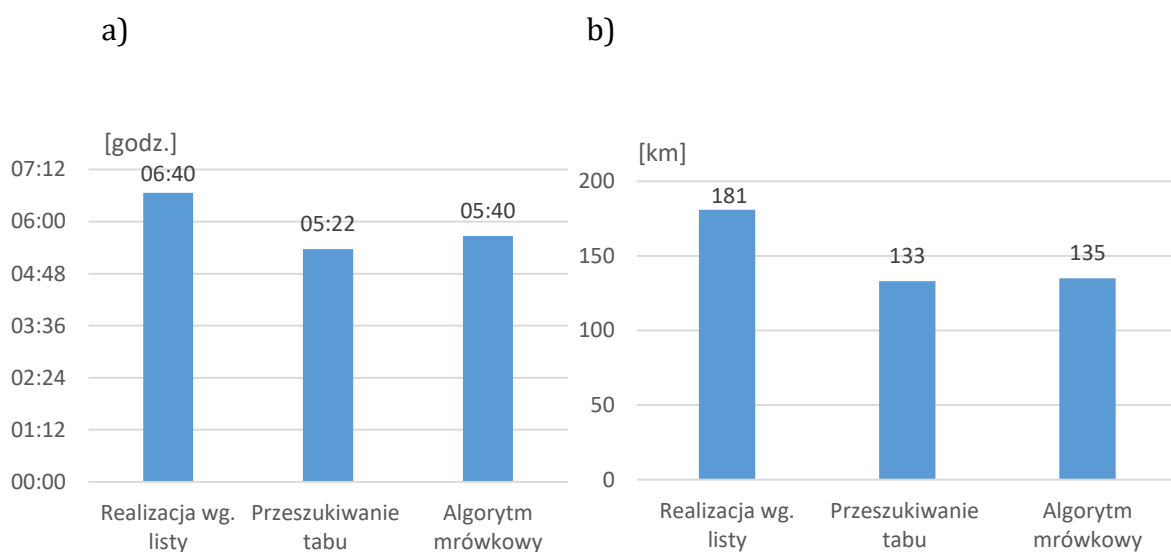
Dla trasy nr 13 podobnie jak w przypadku trasy nr 12 zmniejszeniu uległ znacząco zarówno czas realizacji trasy jak i długość trasy (rys. 6.29). Czas realizacji trasy skrócono z 7 godzin 10 minut do 5 godzin 45 minut stosując do optymalizacji algorytm przeszukiwania tabu i 5 godzin 57 minut stosując algorytm mrówkowy. Długość trasy zmniejszono z 195 km do 136 km (przeszukiwanie tabu) i 156 km (algorytm mrówkowy) po optymalizacji.



Rys. 6.29. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 13: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

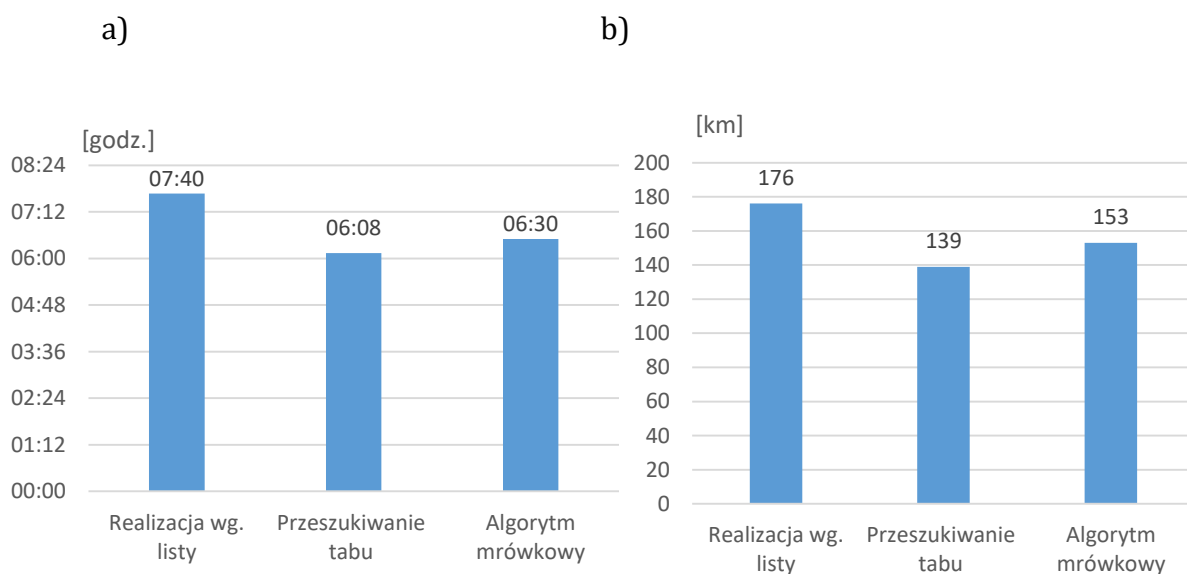
Wyniki przedstawione na rysunku 6.30 dla trasy 14 wskazują na zmniejszenie długości trasy po optymalizacji o około 50 km po zastosowaniu dowolnego z obu

algorytmów. Czas realizacji trasy skrócony została długość trasy 14 została skrócona średnio o 47 km. Natomiast przy zastosowaniu przeszukiwania tabu skrócono czas realizacji trasy o 1godz. 18 min.



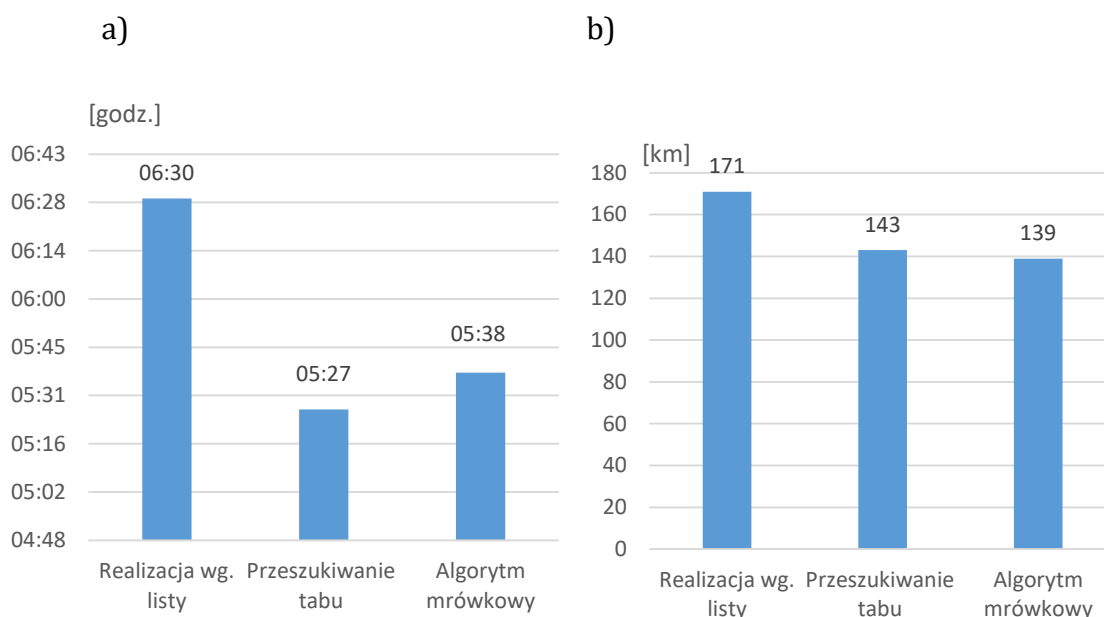
Rys. 6.30. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 14: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

Trasa nr 15 została skrócona po optymalizacji średnio o około 30 km (rys. 6.31). Czas przejazdu został skrócony o 1 godzinę 32 minuty po zastosowaniu algorytmu przeszukiwania tabu i 1 godzinę 10 minut po zastosowaniu algorytmu mrówkowego.



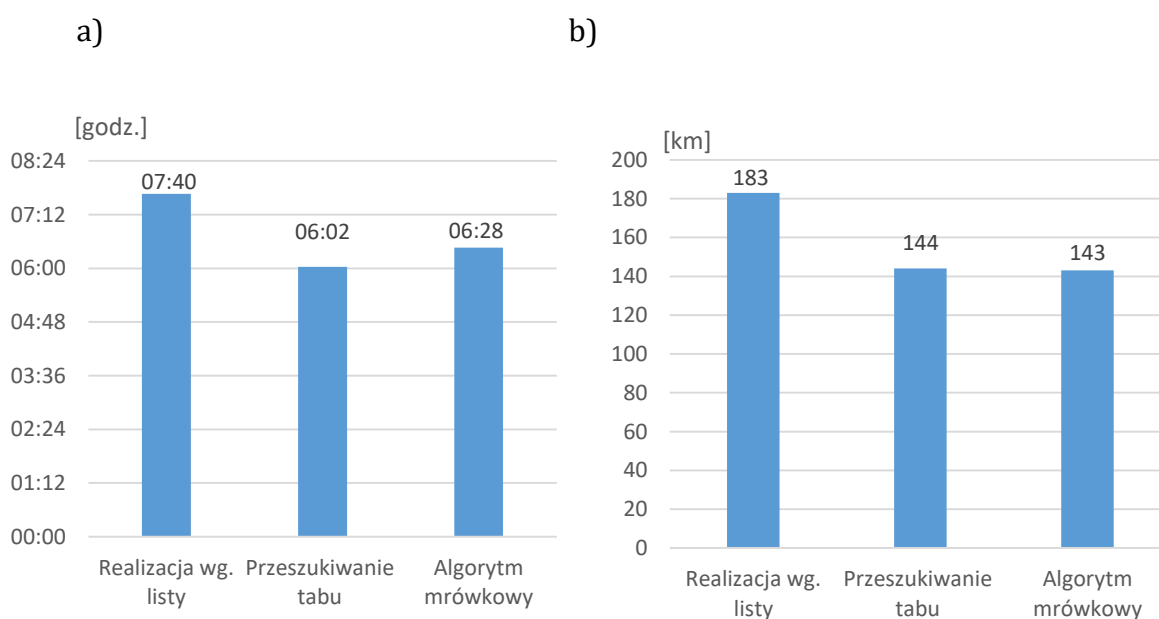
Rys. 6.31. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 15: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

Optymalizacja czasu przejazdu trasy nr 16 i jej długości umożliwiła skrócenie czasu jej trwania średnio o około 1 godzinę oraz skrócenie długości trasy o około 30 km, czyli kilkanaście procent (rys. 6.32).



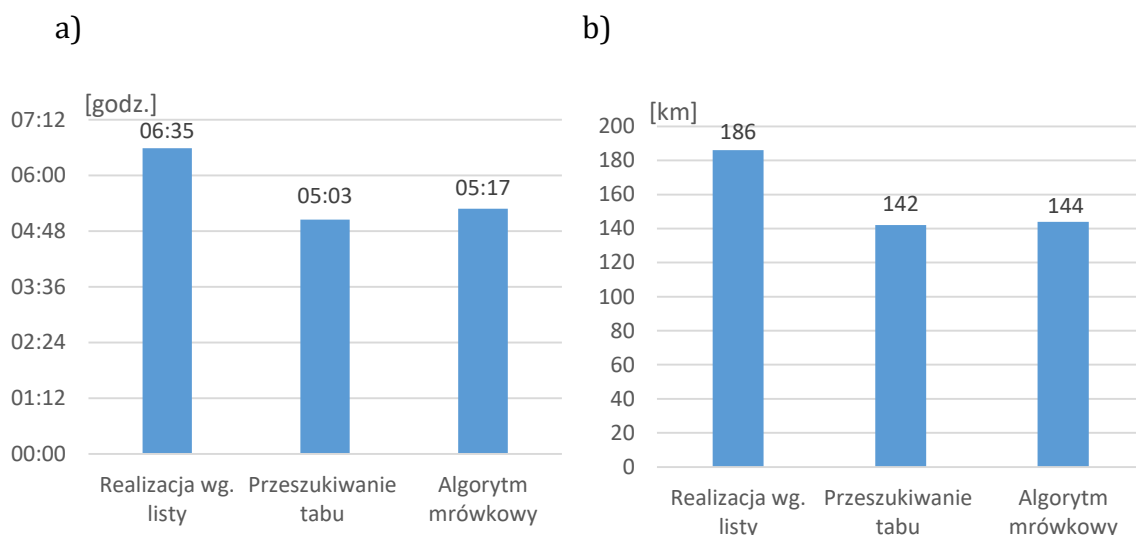
Rys. 6.32. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 16: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

Podobne wyniki uzyskano dla trasy nr 17. Przedstawione zostały one na rysunku 6.33. Optymalizacja z wykorzystaniem algorytmu przeszukiwania tabu i algorytmu mrówkowego pozwoliła na uzyskanie zbliżonych wyników.



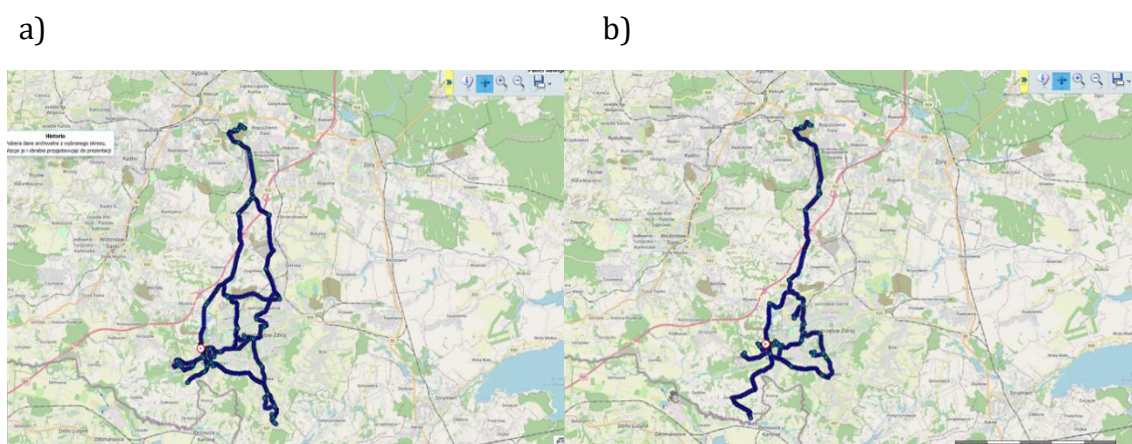
Rys. 6.33. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 17: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

W wyniku optymalizacji skrócono długość średnio o około 42 km. Czas trwania trasy również został skrócony odpowiednio po zastosowaniu algorytmu przeszukiwania tabu o ponad 1 godz. 30 min, a po zastosowaniu algorytmu mrówkowego o około 1 godz. 20 min (rys. 6.34).



Rys. 6.34. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 18: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy (opracowanie własne)

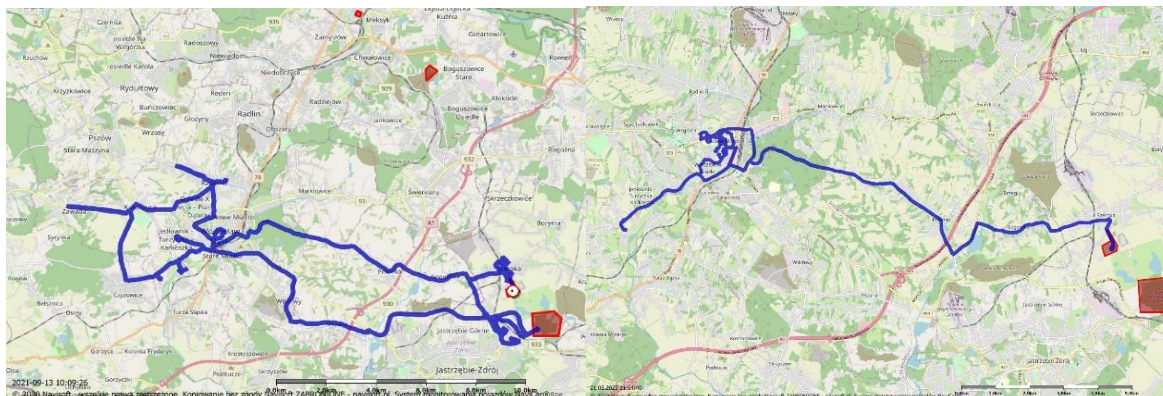
Na rysunku 6.35 oraz rysunku 6.36. przedstawiono przykładowe wizualizacje tras zrealizowanych wg. listy oraz po optymalizacji według zoptymalizowanego planu trasy przy zastosowaniu algorytmu mrówkowego.



Rys. 6.35. Wizualizacja tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych: a) realizacja trasy wg listy, b) realizacja trasy wg zoptymalizowanego planu trasy (opracowanie własne)

a)

b)



Rys. 6.36. Wizualizacja tras zbiórki tworzyw sztucznych: a) realizacja trasy wg listy, b) realizacja trasy wg zoptymalizowanego planu trasy (opracowanie własne)

6.7. Zestawienie porównawcze długości i czasu zrealizowanych tras przed i po optymalizacji

Zbiorcze wyniki przeprowadzonych optymalizacji tras zestawiono w tablicach 6.15 do 6.18. Dla każdej z realizowanych według aktualnego planu tras uzyskano wymierne skrócenie czasu przejazdu oraz długości trasy po optymalizacji. Efektem skrócenia długości trasy jest zmniejszenie zużycia paliwa i w konsekwencji ograniczenie emisji szkodliwych substancji. Skrócenie czasu realizacji trasy umożliwia wykorzystanie pojazdów do zbiórki z dodatkowych punktów i pozyskanie większej masy odpadów dla zmiany pracowniczej. Alternatywnie możliwe jest przypisanie zadań do zbiórki innych kategorii odpadów w czasie dnia roboczego. Dla lepszej czytelności sumarycznych wyników optymalizacji dla wszystkich tras wyznaczono wartości procentowe dla czasu trwania zbiórki i długości tras pojazdów zbierających. W wyniku optymalizacji tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych skrócono parametry realizacji trasy: czas do 30%, długość do 33%, natomiast dla tras zbiórki odpadów segregowanych czas skrócono do 18% a długość tras do 30%.

Czas wykonania zbiórek odpadów selektywnej zbiórki dla algorytmu przeszukiwania tabu pozwolił na skrócenie przejazdu pojazdów średnio o 12,3%, a dla algorytmu mrówkowego o 9,7% (tab. 6.15) po optymalizacji.

Tablica 6.15. Zestawienie czasu realizacji tras nr 1-7 – zbiórka odpadów tworzyw sztucznych (opracowanie własne)

| Nr. trasy | Realizacja wg. listy [godz.] | Czas przejazdu - optymalizacja wg algorytmu przeszukiwania tabu [godz.] | Skrócenie czasu realizacji po optymalizacji wg algorytmu przeszukiwania tabu [%] | Czas przejazdu - optymalizacja wg algorytmu mrówkowwgo [godz.] | Skrócenie czasu realizacji po optymalizacji – wg algorytmu mrówkowego [%] |
|-----------|------------------------------|---|--|--|---|
| 1 | 03:21 | 02:24 | 28 | 03:12 | 4 |
| 2 | 05:01 | 04:38 | 8 | 04:42 | 6 |
| 3 | 05:29 | 05:07 | 7 | 04:46 | 13 |
| 4 | 06:40 | 06:18 | 6 | 06:18 | 6 |
| 5 | 03:32 | 03:02 | 14 | 03:03 | 14 |
| 6 | 06:41 | 05:29 | 18 | 05:30 | 18 |
| 7 | 05:54 | 05:35 | 5 | 05:29 | 7 |

Tablica 6.16. Zestawienie czasu realizacji tras nr 8 – 18 – zbiórka odpadów wielkogabarytowych (opracowanie własne)

| Nr. trasy | Realizacja wg. listy [godz.] | Czas przejazdu -optymalizacja wg algorytmu przeszukiwani a tabu [godz.] | Skrócenie czasu realizacji po optymalizacji wg algorytmu przeszukiwania tabu [%] | Czas przejazdu - optymalizacja wg algorytmu mrówkowwgo [godz.] | Skrócenie czasu realizacji po optymalizacji – wg algorytmu mrówkowego [%] |
|-----------|------------------------------|---|--|--|---|
| 8 | 07:42 | 05:50 | 24 | 05:59 | 22 |
| 9 | 09:16 | 07:07 | 23 | 06:24 | 31 |
| 10 | 09:15 | 06:38 | 28 | 06:23 | 31 |
| 11 | 08:53 | 06:51 | 23 | 06:17 | 29 |
| 12 | 06:30 | 05:05 | 22 | 05:02 | 23 |
| 13 | 07:10 | 05:45 | 20 | 05:57 | 17 |
| 14 | 06:40 | 05:22 | 20 | 05:40 | 15 |
| 15 | 07:40 | 06:08 | 20 | 06:30 | 15 |
| 16 | 06:30 | 05:27 | 16 | 05:38 | 13 |
| 17 | 07:40 | 06:02 | 21 | 06:28 | 16 |
| 18 | 06:35 | 05:03 | 23 | 05:17 | 20 |

Czas wykonania zbiórek odpadów wielkogabarytowych na żądanie dla algorytmu przeszukiwania tabu pozwolił na skrócenie przejazdu pojazdów średnio o 21,8%, a dla algorytmu mrówkowego o 21,1% (tab. 6.16) po optymalizacji.

Tablica 6.17. Zestawienie długości tras o nr od 1 do 7 przed i po optymalizacji (opracowanie własne)

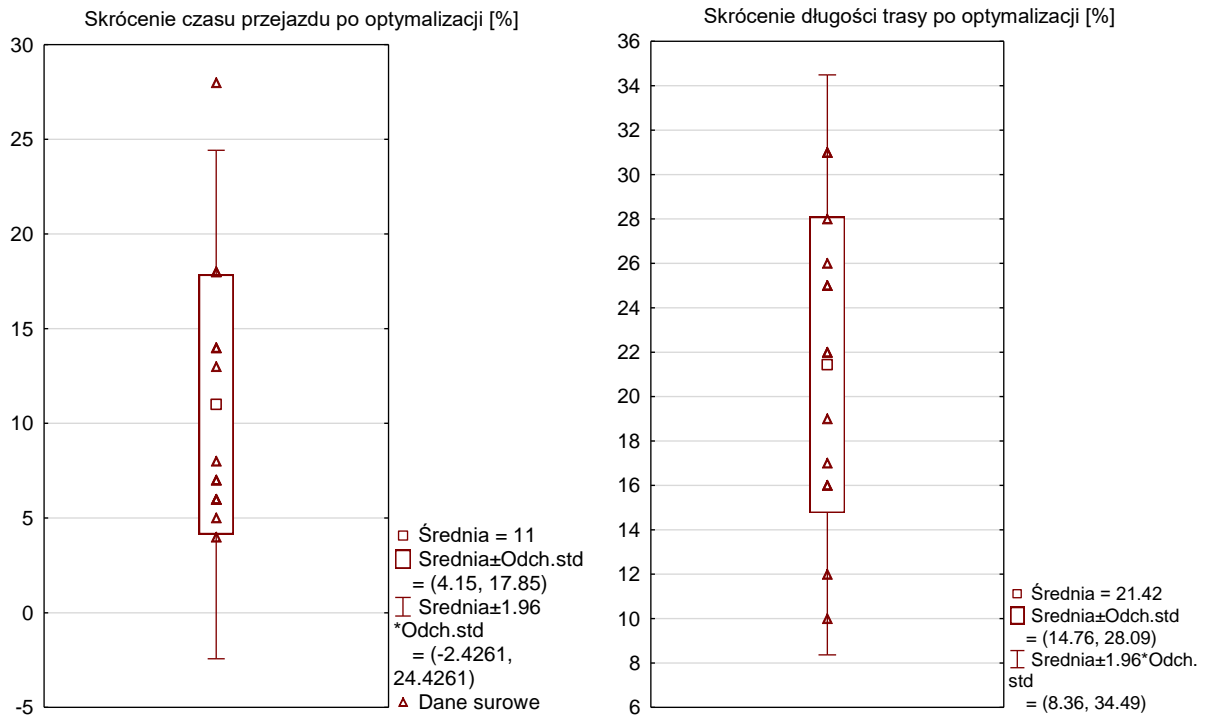
| Nr. trasy | Realizacja wg. listy [godz.] | Czas przejazdu -optymalizacja wg algorytmu przeszukiwani a tabu [godz.] | Skrócenie długości trasy po optymalizacji wg algorytmu przeszukiwania tabu [%] | Czas przejazdu - optymalizacja wg algorytmu mrówkowwgo [godz.] | Skrócenie długości trasy po optymalizacji – wg algorytmu mrówkowego [%] |
|-----------|------------------------------|---|--|--|---|
| 1 | 42 | 38 | 10 | 37 | 12 |
| 2 | 126 | 106 | 16 | 104 | 17 |
| 3 | 69 | 58 | 16 | 56 | 19 |
| 4 | 79 | 62 | 22 | 62 | 22 |
| 5 | 65 | 49 | 25 | 49 | 25 |
| 6 | 49 | 34 | 31 | 34 | 31 |
| 7 | 46 | 33 | 28 | 34 | 26 |

Długość tras pojazdów przy zbiórkach odpadów z selektywnej zbiórki przy zastosowaniu algorytmu przeszukiwania tabu została skrócona średnio o 21,1%, a dla algorytmu mrówkowego o 21,7% (tab. 6.17) do optymalizacji.

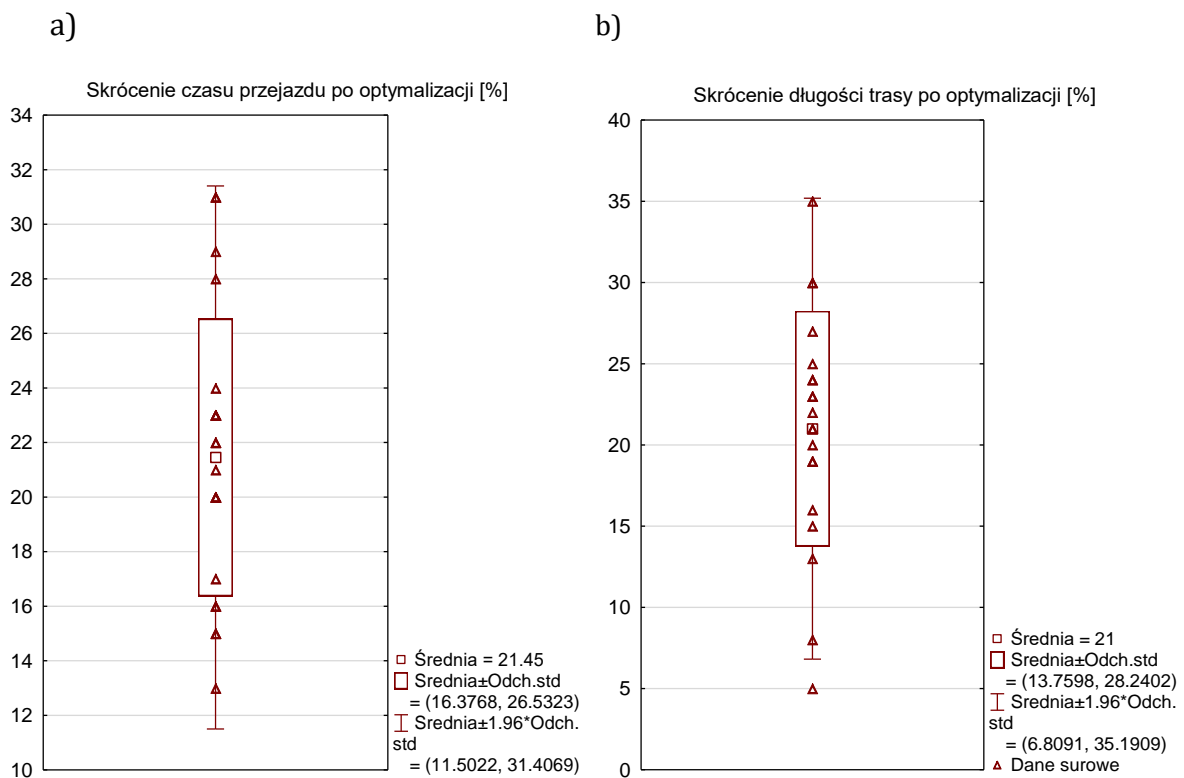
Tablica 6.18. Zestawienie długości tras o nr od 8 do 18 przed i po optymalizacji (opracowanie własne)

| Nr. trasy | Realizacja wg. listy [godz.] | Czas przejazdu -optymalizacja wg algorytmu przeszukiwani a tabu [godz.] | Skrócenie długości trasy po optymalizacji wg algorytmu przeszukiwania tabu [%] | Czas przejazdu - optymalizacja wg algorytmu mrówkowwgo [godz.] | Skrócenie długości trasy po optymalizacji – wg algorytmu mrówkowego [%] |
|-----------|------------------------------|---|--|--|---|
| 8 | 254 | 195 | 23 | 205 | 19 |
| 9 | 285 | 215 | 25 | 186 | 35 |
| 10 | 222 | 205 | 8 | 189 | 15 |
| 11 | 300 | 209 | 30 | 195 | 35 |
| 12 | 179 | 136 | 24 | 170 | 5 |
| 13 | 195 | 136 | 30 | 156 | 20 |
| 14 | 181 | 133 | 27 | 135 | 25 |
| 15 | 176 | 139 | 21 | 153 | 13 |
| 16 | 171 | 143 | 16 | 139 | 19 |
| 17 | 183 | 144 | 21 | 143 | 22 |
| 18 | 186 | 142 | 24 | 144 | 23 |

Długość tras pojazdów przy zbiórkach odpadów wielkogabarytowych na żądanie przy zastosowaniu do optymalizacji algorytmu przeszukiwania tabu została skrócona średnio o 22,6%, a dla algorytmu mrówkowego o 21% (tab. 6.18).



Rys. 6.37. Wyniki skrócenia czasu realizacji tras (a) oraz długości tras (b) po optymalizacji dla zbiórki odpadów z tworzyw sztucznych (opracowanie własne)



Rys. 6.38. Wyniki skrócenia czasu realizacji tras (a) oraz długości tras (b) po optymalizacji dla zbiórki odpadów wielkogabarytowych (opracowanie własne)

Na rysunkach 6.37 i 6.38 przedstawiono opracowanie statystyczne zbiorcze dla wyników optymalizacji z wykorzystaniem obu algorytmów. Dla zbiórki odpadów selektywnie zbieranych - tworzyw sztucznych - średni czas został skrócony o 11%, natomiast długość trasy o 21,42%. W zastosowaniach w praktyce, oznacza to, że przy uwzględnieniu pierwszego czynnika możliwe jest wydłużenie pracy i czasu zbiórki średnio o 11%. Wyznaczone wskaźniki masy zebranych odpadów na jednostkę czasu i odległości pozwalają na ocenę potencjału zbiórki przy dodatkowym czasie lub dodatkowej odległości przy prowadzeniu zbiórek.

Mediana wskaźnika masy zebranych odpadów tworzyw sztucznych wynosi 26 kg/km oraz 329 kg/godz. (por. tab. 6.5). Oznacza to, że po optymalizacji trasy nr 3 lub trasy nr 4 możliwe jest zebranie dodatkowych 160 kg odpadów przy zachowaniu aktualnego czasu zbiórki. W przypadku wykorzystania zoptymalizowanego planu odbioru ze względu na długość wykonywanych przejazdów uzyskano wynik skrócenia tras średnio o 21%. Dla trasy o długości 80 km (np. trasa nr 4) możliwe jest uwzględnienie dodatkowych punktów odbioru. Średnia masa zbieranych odpadów tworzyw sztucznych wynosi 26 kg/km, zatem zwiększenie długości trasy po optymalizacji o 20 km może przynieść wzrost masy zebranych odpadów o 520 kg. Podobnie dla zbiórki odpadów wielkogabarytowych. Możliwość wydłużenia trasy pozwala na zebranie dodatkowych 21% masy odpadów w jednostce czasu lub przy wydłużeniu czasu trwania zbiórki odpowiednio o 21,45% na jednostkę odległości (rys. 6.38). Mediana wskaźnika masy zebranych odpadów wielkogabarytowych wynosi 7.1 kg/km oraz 220 kg/godz. Oznacza to, że po optymalizacji przykładowej trasy 12 i 13 możliwe jest zebranie 218 kg odpadów przy zachowaniu aktualnego czasu zbiórki. W przypadku wykorzystania zoptymalizowanego planu odbioru uzyskano wynik skrócenia tras średnio o 22%.

6.8. Wyniki realizacji zoptymalizowanych tras przez kierowców w warunkach rzeczywistych

Wybrane trasy nr 1, 2, 3 oraz 5 zrealizowano ponownie w oparciu o plan trasy uzyskany po optymalizacji wg algorytmu mrówkowego. Przykładowy zmodyfikowany plan realizacji trasy (po optymalizacji) zawarto w tablicy 6.19. Przedstawiono w niej sekwencję przyjazdu do poszczególnych punktów odbioru w zabudowie miejskiej przy zbiórce odpadów tworzyw sztucznych.

Tablica 6.19. Plan realizacji trasy uzyskany po optymalizacji trasy z wykorzystaniem algorytmu mrówkowego (opracowanie własne)

| Nr. węzła | Adres |
|-----------|--|
| 1 | Jastrzębie-Zdrój Osiedle 1000-Lecia 1 |
| 2 | Jastrzębie-Zdrój Osiedle 1000-Lecia 2 |
| 3 | Jastrzębie-Zdrój Osiedle 1000-Lecia 5 |
| 4 | Jastrzębie-Zdrój Osiedle 1000-Lecia 6 |
| 5 | Jastrzębie-Zdrój Osiedle 1000-Lecia 14 |
| 6 | Jastrzębie-Zdrój Osiedle 1000-Lecia 18 |
| 7 | Jastrzębie-Zdrój Osiedle 1000-Lecia 24 |
| 8 | Jastrzębie-Zdrój Osiedle 1000-Lecia 30 |
| 9 | Jastrzębie-Zdrój Osiedle 1000-Lecia 31 |
| 10 | Jastrzębie-Zdrój ul. Miła 15 |
| 11 | Jastrzębie-Zdrój ul. Gagarina 108 |
| 12 | Jastrzębie-Zdrój ul. Gagarina 110 |
| 13 | Jastrzębie-Zdrój ul. Gagarina 112 |
| 14 | Jastrzębie-Zdrój ul. Gerarda 5 |
| 15 | Jastrzębie-Zdrój ul. Gerarda 27 |
| 16 | Jastrzębie-Zdrój ul. Kaszubska 1 |
| 17 | Jastrzębie-Zdrój ul. Kaszubska 9 |
| 18 | Jastrzębie-Zdrój ul. Kurpiowska 1 |
| 19 | Jastrzębie-Zdrój ul. Kurpiowska 2 |
| 20 | Jastrzębie-Zdrój ul. Kurpiowska 15 |
| 21 | Jastrzębie-Zdrój ul. Norwida 3 |
| 22 | Jastrzębie-Zdrój ul. Ruchu Oporu 4 |
| 23 | Jastrzębie-Zdrój ul. Ruchu Oporu 23 |
| 24 | Jastrzębie-Zdrój ul. Ruchu Oporu 34 |
| 25 | Jastrzębie-Zdrój ul. Ruchu Oporu 58 |
| 26 | Jastrzębie-Zdrój ul. Stodoły 54 |
| 27 | Jastrzębie-Zdrój ul. Truskawkowa 1 |
| 28 | Jastrzębie-Zdrój ul. Truskawkowa 5 |
| 29 | Jastrzębie-Zdrój ul. Truskawkowa 13 |
| 30 | Jastrzębie-Zdrój ul. Wodeckiego 2 |
| 31 | Jastrzębie-Zdrój ul. Wodeckiego 19 |
| 32 | Jastrzębie-Zdrój ul. Wspólna 4 |
| 33 | Jastrzębie-Zdrój ul. Wspólna 6 |
| 34 | Jastrzębie-Zdrój ul. Śląska 13 |
| 35 | Jastrzębie-Zdrój ul. Śląska 21 |
| 36 | Jastrzębie-Zdrój ul. Śląska 33 |
| 37 | Jastrzębie-Zdrój ul. Łowicka 11 |
| 38 | Jastrzębie-Zdrój ul. Śląska 43 |
| 39 | Jastrzębie-Zdrój ul. Gerarda Malchera 5 |
| 40 | Jastrzębie-Zdrój ul. Gerarda Malchera 27 |

Tablica 6.19. cd.

| Nr. węzła | Adres |
|-----------|--|
| 41 | Jastrzębie-Zdrój ul. Gerarda Malchera 41 |
| 42 | Jastrzębie-Zdrój ul. Edukacyjna 15 |
| 43 | Jastrzębie-Zdrój ul. Stodoły 9 |
| 44 | Jastrzębie-Zdrój ul. Łowicka 15 |

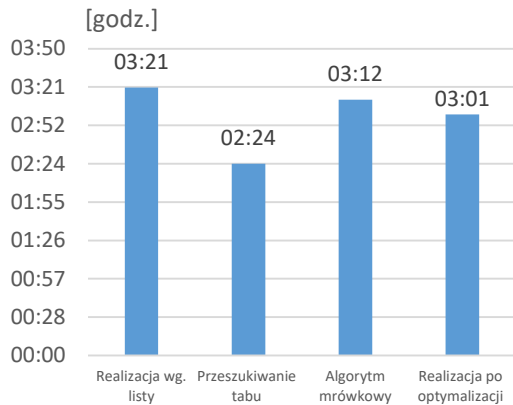
W wyniku realizacji tras rzeczywistych uzyskano bardzo zbliżone wyniki do wyznaczonych modelowo parametrów tras zoptymalizowanych z zastosowaniem algorytmu mrówkowego oraz przeszukiwania tabu. Parametry realizacji tras zestawiono w tablicy 6.20.

Tablica 6.20. Zestawienie parametrów realizacji tras wg zoptymalizowanego planu trasy (opracowanie własne)

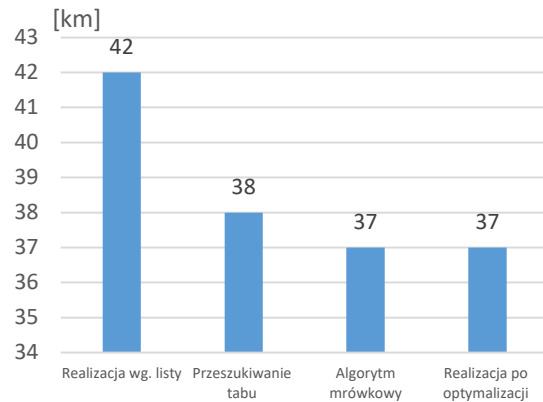
| Nr przejazdu trasy | Numer realizowanej trasy | Czas realizacji trasy [godz.] | Długość trasy [km] | Liczba punktów trasy |
|--------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | Trasa nr 1 | 02:56:00 | 39 | 44 |
| 2 | Trasa nr 1 | 03:05:00 | 37 | 44 |
| 3 | Trasa nr 1 | 03:01:00 | 38 | 44 |
| 4 | Trasa nr 1 | 03:05:00 | 33 | 44 |
| Średnia [-] | | 03:01:45 | 37 | |
| 1 | Trasa nr 2 | 04:45:00 | 110 | 56 |
| 2 | Trasa nr 2 | 04:52:00 | 105 | 56 |
| 3 | Trasa nr 2 | 04:47:00 | 107 | 56 |
| 4 | Trasa nr 2 | 04:38:00 | 102 | 56 |
| Średnia [-] | | 04:45:30 | 106 | |
| 1 | Trasa nr 3 | 05:10:00 | 59 | 82 |
| 2 | Trasa nr 3 | 04:55:00 | 64 | 82 |
| 3 | Trasa nr 3 | 04:57:00 | 55 | 82 |
| 4 | Trasa nr 3 | 05:00:00 | 60 | 82 |
| Średnia [-] | | 05:00:30 | 60 | |
| 1 | Trasa nr 5 | 03:10:00 | 52 | 71 |
| 2 | Trasa nr 5 | 03:03:00 | 55 | 71 |
| 3 | Trasa nr 5 | 03:17:00 | 49 | 71 |
| 3 | Trasa nr 5 | 03:05:00 | 50 | 71 |
| Średnia [-] | | 03:08:45 | 52 | |

Na rysunkach 6.39 – 6.42 zestawiono zbiorcze wyniki realizacji tras wg. listy przygotowanej przez dyspozytorów (jako rozwiązanie początkowe), po optymalizacji z zastosowaniem algorytmu mrówkowego, przeszukiwania tabu oraz w uśrednione parametry tras zrealizowanych w rzeczywistości przez kierowców wg. zoptymalizowanego planu.

a)



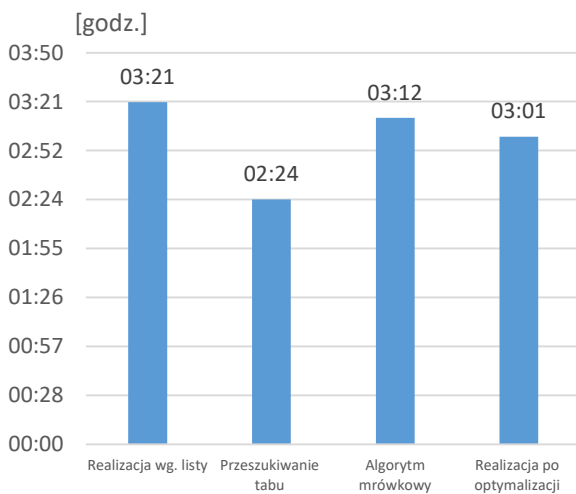
b)



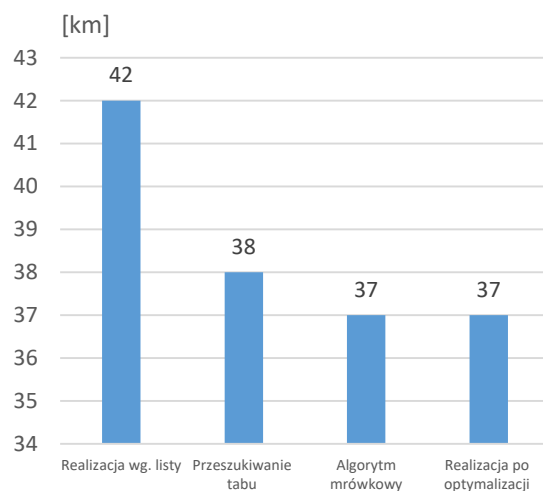
Rys. 6.39. Porównanie parametrów realizacji trasy nr 1: a) czasu realizacji tras; b) długości trasy (opracowanie własne)

W wyniku realizacji trasy numer 1 wg. zoptymalizowanego planu uzyskano zbliżone wartości parametrów do parametrów tras wykonanych przez kierowców do tras po optymalizacji wg modelu zbiórki (rys. 6.39).

a)

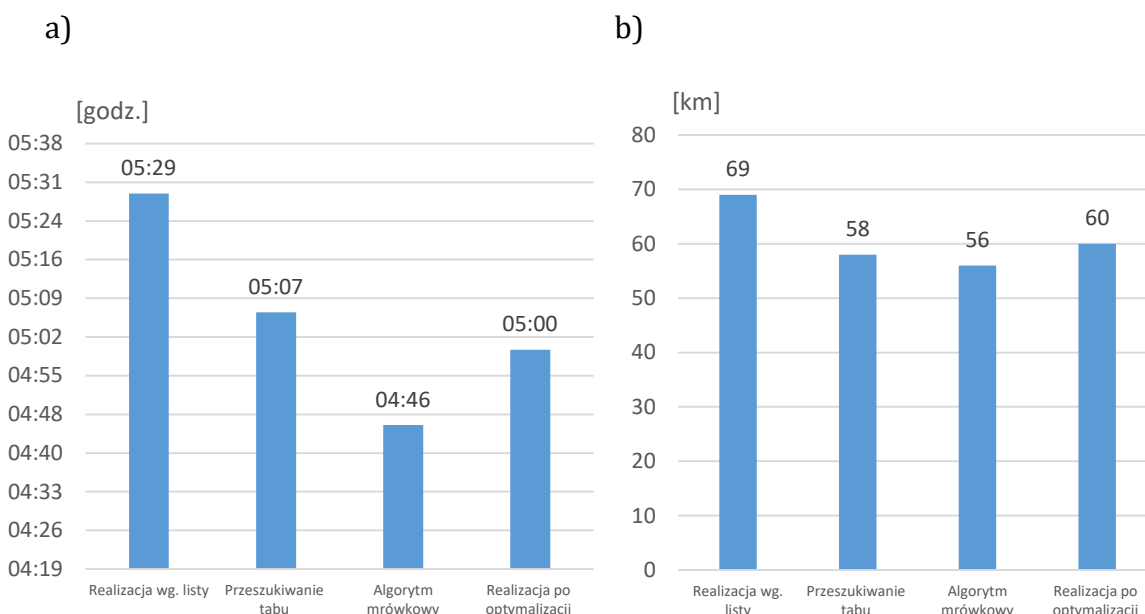


b)



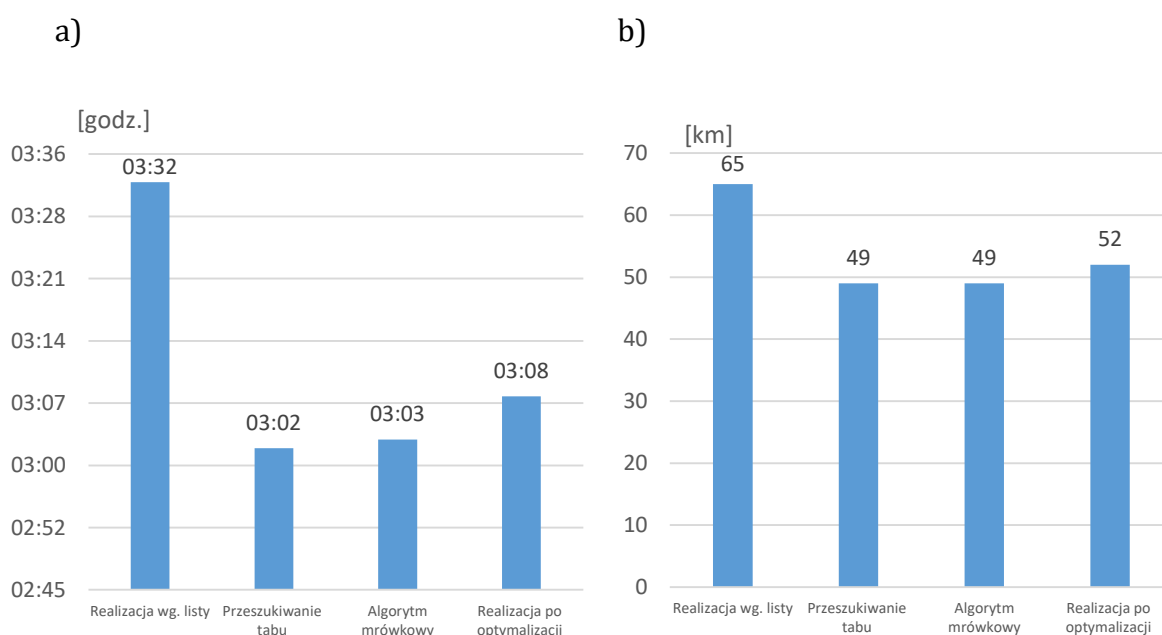
Rys. 6.40. Porównanie parametrów realizacji trasy nr 2: a) czasu realizacji tras; b) długości trasy (opracowanie własne)

Parametry przejazdu trasy nr 2 wg. zoptymalizowanego planu są również zbliżone do wyników z modelu matematycznego. W stosunku do realizacji trasy wg listy skrócono czas i długość trasy o kilkanaście % (rys. 6.40).



Rys. 6.41. Porównanie parametrów realizacji trasy nr 3: a) czasu realizacji tras; b) długości trasy (opracowanie własne)

Podobnie jak dla tras nr 1 i nr 2 parametry trasy nr 3 zrealizowanej przez kierowców miały podobny czas i odległość zbliżona do wyliczeń z modelu matematycznego wg algorytmu mrówkowego (rys. 6.41).



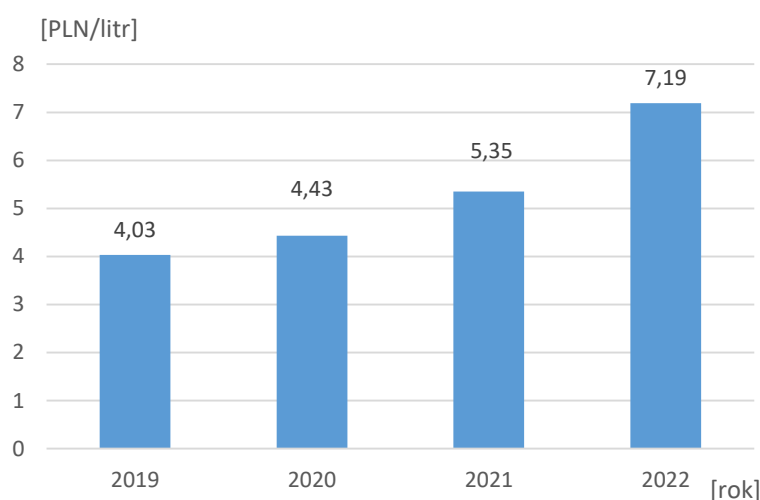
Rys. 6.42. Porównanie parametrów realizacji trasy nr 5: a) czasu realizacji tras; b) długości trasy (opracowanie własne)

W przypadku realizacji trasy rzeczywistej nr 5 wg planu po optymalizacji parametry trasy są wyższe od tras zoptymalizowanych z wykorzystaniem algorytmu mrówkowego i przeszukiwania tabu. W stosunku do trasy realizowanej wg. listy znacząco

skrócono czas oraz długość trasy. Wyniki czasu przejazdu i odległości tylko nieznacznie różnią się od obliczeń modelowych. (rys. 6.42).

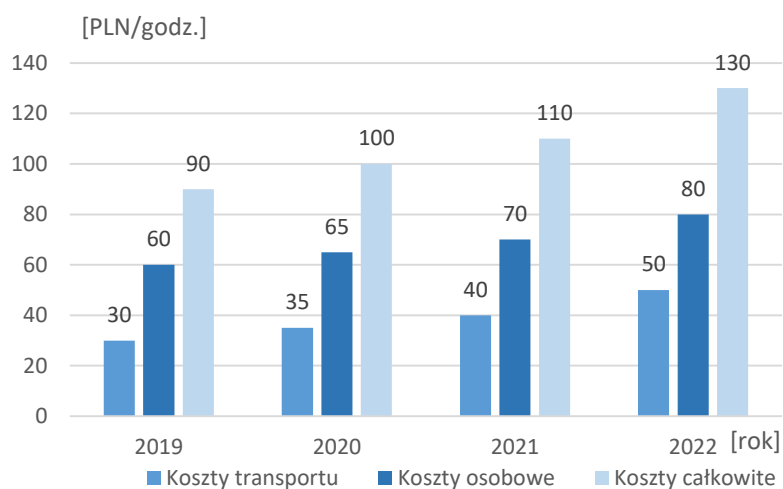
6.9. Wyniki badań efektywności ekonomicznej i wskaźników masy zebranych odpadów przed i po optymalizacji

Koszty zbiórki wykazują tendencję wzrostową na poziomie około 15% rocznie zgodnie z danymi udostępnionymi przez firmę PST Transgór S.A. Na wzrost kosztów ma wpływ wiele czynników. Do głównych należy zaliczyć wzrost kosztów wynagrodzeń kierowców i pracowników fizycznych oraz rosnące ceny paliw [176]. Wzrost wymagań gmin dotyczących pojazdów określonych normą emisji spalin - przynajmniej Euro 5 oraz konieczność stosowania pojazdów niskoemisyjnych np. zasilanych sprężonym gazem ziemnym (CNG) lub pojazdów zeroemisyjnych – pojazdów elektrycznych. Szacuje się, że koszty zbiórki odpadów stanowią około 35% wszystkich kosztów funkcjonowania systemu. Koszty przetwarzania i zagospodarowania odpadów stanowią około 60%. Na rysunku 6.43 przedstawiono wzrost cen oleju napędowego (ON) w latach 2019 – 2022. Po 2020 roku nastąpił znaczny wzrost cen ON w stosunku do 2020 r. i osiągnął około 21% w 2021 r., a w 2022 roku nawet 62%.

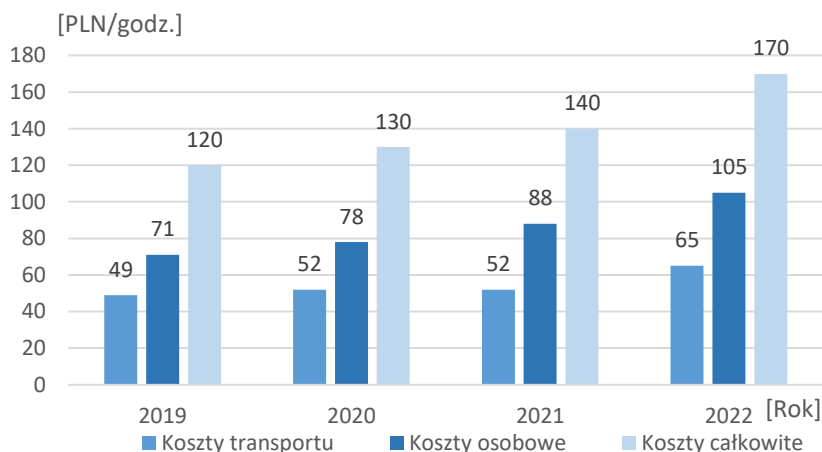


Rys. 6.43. Koszty oleju napędowego w latach 2019-2022 (opracowanie własne na podstawie [176])

W latach 2019 - 2022 nastąpił znaczący wzrost kosztów transportu w odniesieniu do roboczogodziny pojazdu wraz z trzyosobową załogą (rys. 6.44 – rys 6.45).



Rys. 6.44. Koszty odbioru i transportu odpadów [zł/godz.] w latach 2019-2022; pojazdy ciężarowe HDS (pracowanie własne)



Rys. 6.45. Koszty odbioru i transportu odpadów [zł/godz.] w latach 2019-2022; pojazdy z zabudową skrzyniową (opracowanie własne)

Jednym z głównych źródeł przychodu w systemie gospodarowania odpadami jest sprzedaż surowców wtórnych oraz przychody, które gminy uiszczają w postaci opłat za zbiórkę i transport odpadów. W latach 2019 - 2022 występowały wahania cen surowców zgodnie z danymi zawartymi w tabelicy 6.21. Obecnie można zaobserwować wzrost cen skupu jedynie dla kilku grup odpadów opakowaniowych np. butelek PET (politereftalan etylenu) oraz frakcji pochodzącej z przedmiotów i opakowań produktów tzw. chemii gospodarczej. Wraz ze wzrostem kosztów zbiórki odpadów następował wzrost opłat, które uiszczają gminy za zbiórkę i zagospodarowanie odpadów z średniego poziomu 350zł/tonę w 2019 roku do 850zł/tonę w 2022 r.

Tablica 6.21. Zmiany cen surowców w latach 2019 - 2022 (opracowanie własne)

| Rodzaj surowca | Rok | | | |
|---|----------|------|------|------|
| | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| | PLN/tona | | | |
| PET biały | 1300 | 1350 | 1450 | 2700 |
| PET kolor | 1200 | 1300 | 1000 | 2000 |
| Folia biała | 1100 | 1100 | 1200 | 1000 |
| Folia kolor | 600 | 650 | 700 | 600 |
| Tworzywa sztuczne z chemii gospodarczej | 800 | 850 | 800 | 1700 |
| Szkło | 50 | 50 | 50 | 60 |
| Makulatura | 350 | 350 | 350 | 400 |
| Tworzywa różne | 300 | 300 | 300 | 300 |

W tablicy 6.22 zestawiono wyznaczone wskaźniki efektywności ekonomicznej zbiórki dla 7 tras zbiórek odpadów segregowanych, oraz dla 11 tras zbiórek odpadów wielkogabarytowych wyznaczone z zależności (1). Do realizacji zbiórek odpadów segregowanych wykorzystano pojazdy ciężarowe z HDS, natomiast do zbiórki odpadów wielkogabarytowych pojazdy z zabudową skrzyniową.

Tablica 6.22. Zestawienie wskaźników efektywności ekonomicznej zbiórek dla poszczególnych tras (opracowanie własne]

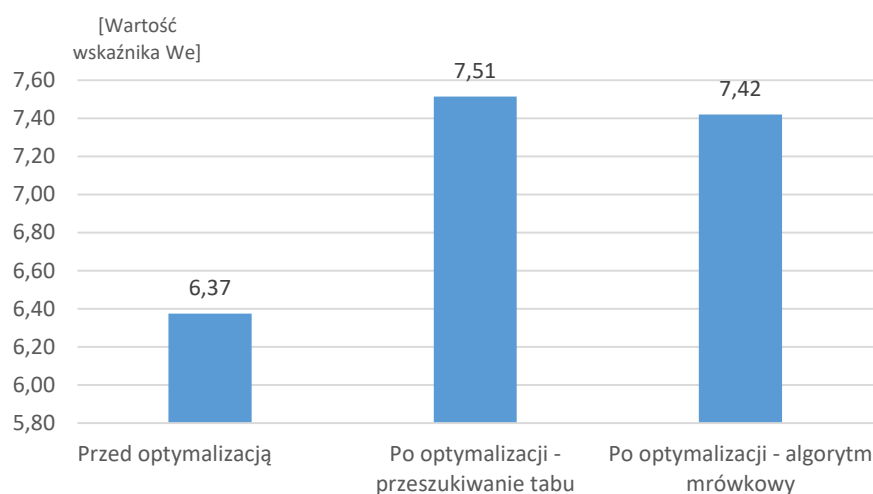
| Nr trasy | Wskaźnik efektywności W_e zbiórki przed optymalizacją | Wskaźnik efektywności zbiórki W_e po optymalizacji - przeszukiwanie tabu | Wskaźnik efektywności zbiórki W_e po optymalizacji - algorytm mrówkowy | Średnia zmiana wskaźnika po optymalizacji trasy [%] |
|-------------------------------|---|--|--|---|
| Pojazdy ciężarowe z HDS | | | | |
| 1 | 6,00 | 7,81 | 6,44 | 19 |
| 2 | 5,04 | 5,88 | 5,91 | 17 |
| 3 | 6,23 | 6,98 | 7,68 | 18 |
| 4 | 6,49 | 6,90 | 6,90 | 6 |
| 5 | 9,28 | 11,35 | 11,33 | 22 |
| 6 | 5,33 | 6,76 | 6,75 | 27 |
| 7 | 6,25 | 6,92 | 6,93 | 11 |
| Pojazdy z zabudową skrzyniową | | | | |
| 8 | 1,72 | 2,29 | 2,12 | 29 |
| 9 | 1,32 | 1,72 | 1,96 | 40 |
| 10 | 1,12 | 1,50 | 1,65 | 40 |
| 11 | 1,76 | 2,37 | 2,51 | 38 |
| 12 | 1,84 | 2,33 | 2,21 | 23 |
| 13 | 1,77 | 2,41 | 2,17 | 29 |

Tablica 6.22. cd.

| Nr trasy | Wskaźnik efektywności W_e zbiórki przed optymalizacją | Wskaźnik efektywności zbiórki W_e po optymalizacji - przeszukiwanie tabu | Wskaźnik efektywności zbiórki W_e po optymalizacji - algorytm mrówkowy | Średnia zmiana wskaźnika po optymalizacji trasy [%] |
|----------|---|--|--|---|
| 14 | 2,03 | 2,59 | 2,52 | 26 |
| 15 | 1,93 | 2,36 | 2,25 | 19 |
| 16 | 2,24 | 2,65 | 2,66 | 18 |
| 17 | 1,84 | 2,25 | 2,23 | 22 |
| 18 | 1,88 | 2,46 | 2,41 | 29 |

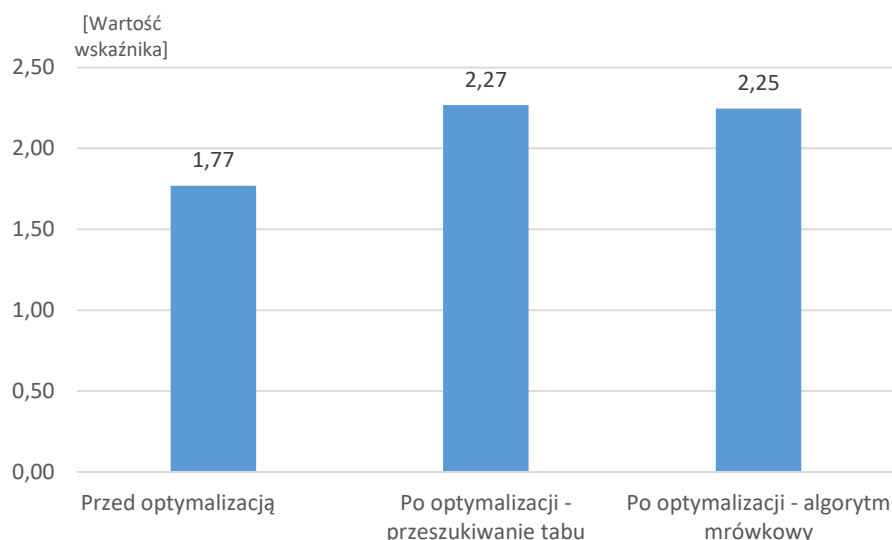
Jak wynika z wyznaczonych wskaźników efektywności zbiórki, efektywność prowadzenia zbiórek uległa poprawie. Dla zbiórek odpadów segregowanych (tworzyw sztucznych) w zakresie od 6% do 27%, natomiast dla zbiórek odpadów wielkogabarytowych od 18% do 40%.

Na rysunkach 6.46 oraz 6.47 przedstawiono porównanie średnich wartości wskaźnika efektywności ekonomicznej zbiórki W_e zrealizowanych tras zbiórek odpadów segregowanych (tworzyw sztucznych) oraz odpadów wielkogabarytowych.



Rys. 6.46. Porównanie średnich wartości wskaźnika efektywności ekonomicznej zbiórki W_e zrealizowanych tras zbiórek odpadów segregowanych (opracowanie własne)

Średnia wartość wskaźnika efektywności ekonomicznej zbiórki dla tras zbiórek odpadów segregowanych wzrosła z 6,37 do 7,51 po optymalizacji tras z zastosowaniem algorytmu przeszukiwania tabu.



Rys. 6.47. Porównanie średnich wartości wskaźnika efektywności ekonomicznej zbiórki W_e zrealizowanych tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych (opracowanie własne)

Średnia wartość wskaźnika efektywności ekonomicznej zbiórki dla tras zbiórek odpadów wielkogabarytowych wzrosła z 1,77 do 2,27 po optymalizacji tras z zastosowaniem algorytmu przeszukiwania tabu.

W oparciu o zależność (2) obliczono mierniki masy zebranych odpadów M_{mo}^s . Wyliczone wartości mierników zestawiono w tabelicy 6.23.

Tablica 6.23. Zestawienie wyliczonych wartości miernika masy [kg/km] zebranych odpadów (opracowanie własne)

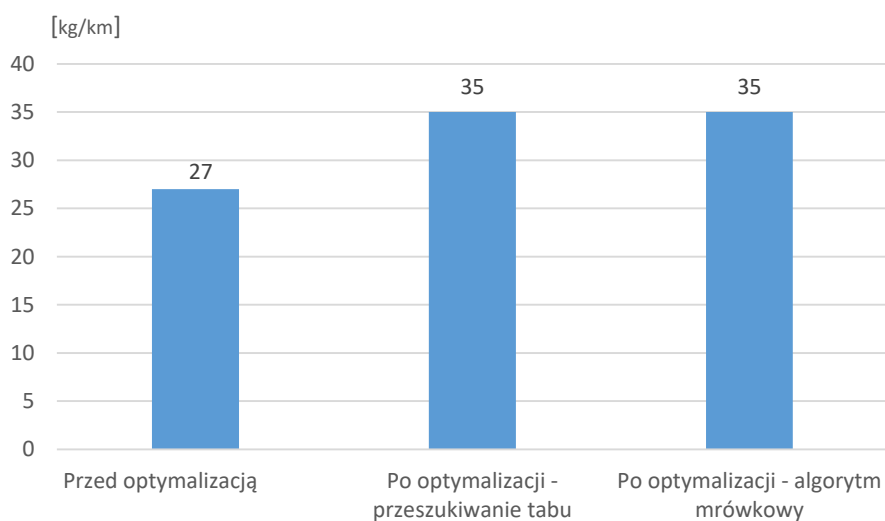
| Nr trasy | Miernik masy zabranych odpadów M_{mo}^s przed optymalizacją [kg/km] | Miernik masy zebranych odpadów M_{mo}^s po optymalizacji - przeszukiwanie tabu [kg/km] | Miernik masy zebranych odpadów M_{mo}^s po optymalizacji - algorytm mrówkowy [kg/km] | Średnia zmiana M_{mo}^s po optymalizacji trasy [%] |
|--------------------------------------|---|--|--|--|
| Pojazdy ciężarowe z HDS | | | | |
| 1 | 25 | 27 | 28 | 12 |
| 2 | 14 | 17 | 17 | 20 |
| 3 | 26 | 31 | 32 | 21 |
| 4 | 26 | 34 | 34 | 27 |
| 5 | 31 | 41 | 41 | 33 |
| 6 | 32 | 46 | 46 | 44 |
| 7 | 35 | 48 | 47 | 37 |
| Pojazdy z zabudową skrzyniową | | | | |
| 8 | 7 | 9 | 9 | 27 |
| 9 | 6 | 8 | 9 | 43 |
| 10 | 6 | 6 | 9 | 29 |
| 11 | 7 | 10 | 11 | 49 |
| 12 | 9 | 11 | 9 | 18 |
| 13 | 9 | 13 | 11 | 34 |

Tablica 6.23. cd.

| Nr trasy | Miernik masy zebranych odpadów M_{mo}^s przed optymalizacją [kg/km] | Miernik masy zebranych odpadów M_{mo}^s po optymalizacji - przeszukiwanie tabu [kg/km] | Miernik masy zebranych odpadów M_{mo}^s po optymalizacji - algorytm mrówkowy [kg/km] | Średnia zmiana M_{mo}^s po optymalizacji trasy [%] |
|----------|---|--|--|--|
| 14 | 10 | 13 | 13 | 35 |
| 15 | 10 | 13 | 12 | 21 |
| 16 | 11 | 13 | 13 | 21 |
| 17 | 10 | 12 | 12 | 28 |
| 18 | 9 | 12 | 11 | 30 |

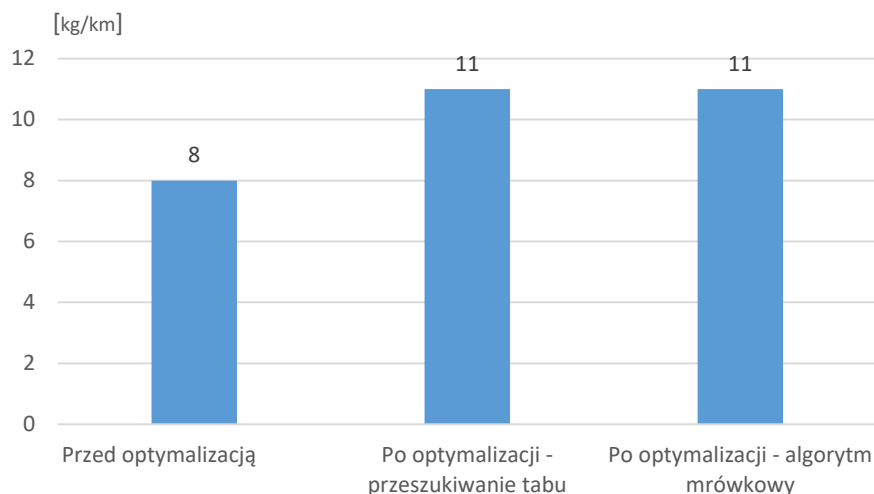
Wynikami zebrane w tablicy 6.23 wskazują, że po optymalizacji tras nastąpił znaczący wzrost miernika masy zebranych odpadów. Dla zbiórki odpadów segregowanych w zakresie od 12% do 44%, natomiast dla zbiórki odpadów wielkogabarytowych od 18% do 49%.

Na rysunkach 6.48 i 6.49 przedstawiono porównanie średnich wartości miernika masy zebranych odpadów M_{mo}^s zrealizowanych tras zbiórki odpadów segregowanych oraz odpadów wielkogabarytowych.



Rys. 6.48. Porównanie średnich wartości miernika masy zebranych odpadów w M_{mo}^s [kg/km] zrealizowanych tras zbiórki odpadów segregowanych (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika masy zebranych odpadów dla tras zbiórki odpadów segregowanych wzrasta z 27 do 35 [kg/km].



Rys. 6.49. Porównanie średnich wartości miernika masy zebranych odpadów [M_{mo}^s] [kg/km] zrealizowanych tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika masy zebranych odpadów dla tras zbiórek odpadów segregowanych wzrosła z 8 do 11 [kg/km].

6.10. Wyniki badań poziomów emisji przed i po optymalizacji dla zrealizowanych tras zbiórki

W oparciu o zależność (4) wyznaczono mierniki emisji CO₂ $M_{CO_2}^s$ tras zbiórki odpadów segregowanych oraz wielkogabarytowych. Wyliczone wartości mierników zestawiono w tabelicy 6.24.

Tablica 6.24. Zestawienie wyliczonych wartości miernika emisji CO₂ [g] (opracowanie własne)

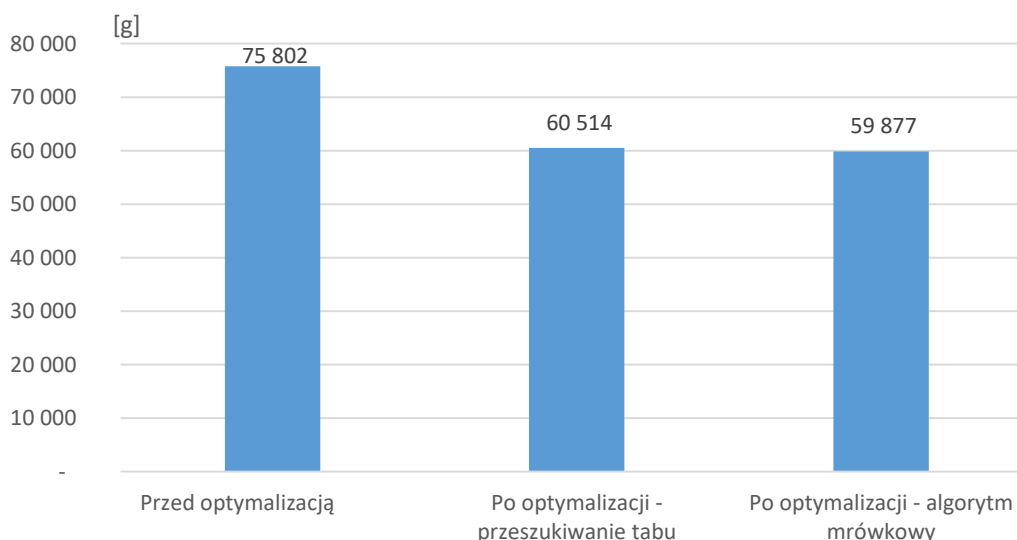
| Nr trasy | Miernik emisji CO ₂ dla tras przed optymalizacją [g] | Miernik emisji CO ₂ dla tras po optymalizacji - przeszukiwane tabu [g] | Miernik emisji CO ₂ dla tras po optymalizacji - algorytm mrówkowy [g] | Średnia zmiana po optymalizacji trasy [%] |
|-------------------------|---|---|--|---|
| Pojazdy ciężarowe z HDS | | | | |
| 1 | 46818,98 | 42360,03 | 41245,29 | 11 |
| 2 | 140456,93 | 118162,18 | 115932,71 | 17 |
| 3 | 76916,89 | 64654,78 | 62425,30 | 17 |
| 4 | 88064,27 | 69113,73 | 69113,73 | 22 |
| 5 | 72457,94 | 54622,14 | 54622,14 | 25 |
| 6 | 54622,14 | 37901,08 | 37901,08 | 31 |
| 7 | 51277,93 | 36786,34 | 37901,08 | 27 |

Tablica 6.24. cd.

| Nr trasy | Miernik emisji CO ₂ dla tras przed optymalizacją [g] | Miernik emisji CO ₂ dla tras po optymalizacji - przeszukiwane tabu [g] | Miernik emisji CO ₂ dla tras po optymalizacji - algorytm mrówkowy [g] | Średnia zmiana po optymalizacji trasy [%] |
|--------------------------------------|---|---|--|---|
| Pojazdy z zabudową skrzyniową | | | | |
| 8 | 74790,50 | 57417,91 | 60362,42 | 21 |
| 9 | 83918,48 | 60362,42 | 54767,85 | 31 |
| 10 | 65368,08 | 60362,42 | 43873,17 | 20 |
| 11 | 88335,24 | 61540,22 | 57417,91 | 33 |
| 12 | 52706,69 | 40045,31 | 50056,64 | 15 |
| 13 | 57417,91 | 40045,31 | 45934,33 | 25 |
| 14 | 53295,60 | 39161,96 | 39750,86 | 26 |
| 15 | 51823,34 | 40928,66 | 45050,97 | 17 |
| 16 | 50351,09 | 42106,47 | 40928,66 | 18 |
| 17 | 53884,50 | 42400,92 | 42106,47 | 22 |
| 18 | 54767,85 | 41812,01 | 42400,92 | 23 |

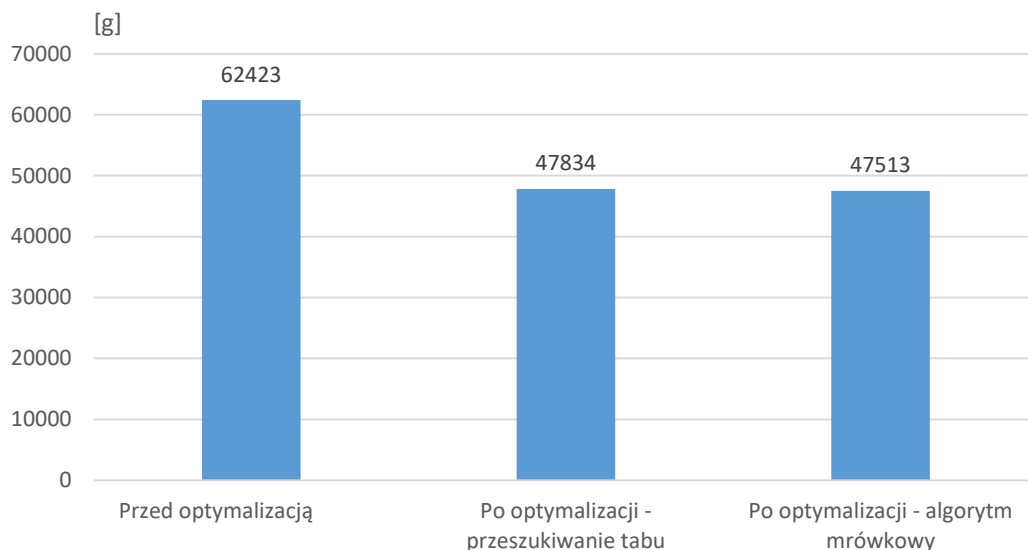
Wyniki badań przedstawione w tablicy 6.24 emisji CO₂ (przed i po optymalizacji) pozwalają na ocenę poziomu redukcji emisji w wyniku skrócenia tras po optymalizacji. Dla zbiórek odpadów segregowanych wartość zmniejszenia emisji zawarta jest w przedziale 11% - 31%, natomiast dla zbiórek odpadów wielkogabarytowych w przedziale 15% - 33%.

Na rysunku 6.50 przedstawiono porównanie średnich wartości miernika emisji CO₂ [$M_{CO_2}^s$] zrealizowanych tras zbiórki odpadów segregowanych natomiast na rysunku 6.51 dla odpadów wielkogabarytowych.



Rys. 6.50. Porównanie średnich wartości miernika emisji CO₂ [$M_{CO_2}^s$] [g] zrealizowanych tras zbiórki odpadów segregowanych (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika emisji CO₂ dla tras zbiórek odpadów segregowanych została zredukowana z wartości 75802 g do 59877 g po optymalizacji tras z zastosowaniem algorytmu mrówkowego.



Rys. 6.51. Porównanie średnich wartości miernika emisji CO₂ [$M_{CO_2}^s$] [g] zrealizowanych tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika emisji CO₂ dla tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych została zredukowana z wartości 62423 g do 47513 g po optymalizacji tras z zastosowaniem algorytmu mrówkowego.

Wykorzystując zależność (5) wyznaczono mierniki emisji NO_x $M_{NO_x}^s$ tras zbiórek odpadów segregowanych oraz wielkogabarytowych. Wyliczone wartości mierników zestawiono w tabelicy 6.25.

Tablica 6.25. Zestawienie wyliczonych wartości miernika emisji NO_x [g] (opracowanie własne)

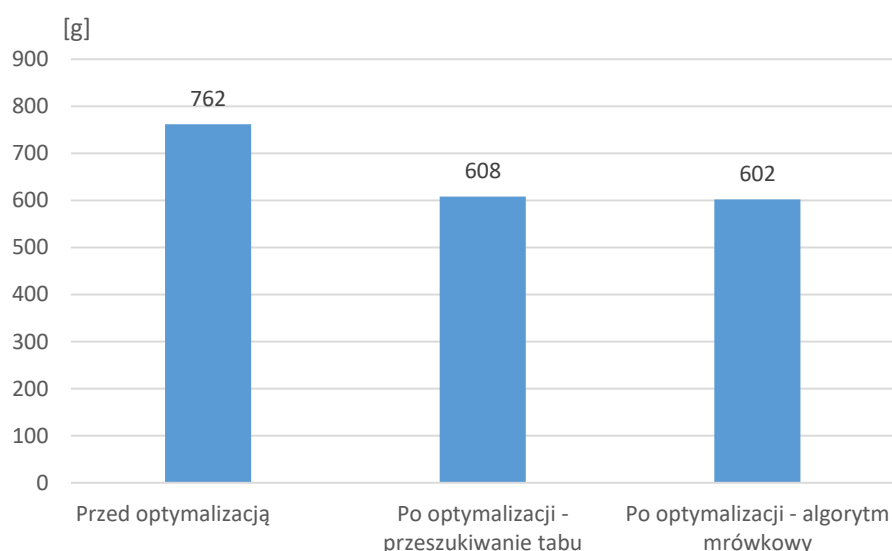
| Nr trasy | Wartość emisji NO _x dla tras przed optymalizacją [g] | Wartość emisji NO _x dla tras po optymalizacji - przeszukiwane tabu [g] | Wartość emisji NO _x dla tras po optymalizacji - algorytm mrówkowy [g] | Średnia zmiana po optymalizacji trasy [%] |
|--------------------------------|---|---|--|---|
| Pojazdy ciężarowe z HDS | | | | |
| 1 | 471,15 | 426,28 | 415,06 | 11 |
| 2 | 1413,45 | 1189,10 | 1166,66 | 17 |
| 3 | 774,03 | 650,64 | 628,20 | 17 |
| 4 | 886,21 | 695,51 | 695,51 | 22 |
| 5 | 729,16 | 549,68 | 549,68 | 25 |
| 6 | 549,68 | 381,41 | 381,41 | 31 |
| 7 | 516,02 | 370,19 | 381,41 | 27 |

Tablica 6.25. cd.

| Nr trasy | Wartość emisji NO _x dla tras przed optymalizacją [g] | Wartość emisji NO _x dla tras po optymalizacji - przeszukiwane tabu [g] | Wartość emisji NO _x dla tras po optymalizacji - algorytm mrówkowy [g] | Średnia zmiana po optymalizacji trasy [%] |
|-------------------------------|---|---|--|---|
| Pojazdy z zabudową skrzyniową | | | | |
| 8 | 297,84 | 228,66 | 240,39 | 21 |
| 9 | 334,20 | 240,39 | 218,11 | 31 |
| 10 | 260,32 | 240,39 | 174,72 | 20 |
| 11 | 351,78 | 245,08 | 228,66 | 33 |
| 12 | 209,90 | 159,48 | 199,34 | 15 |
| 13 | 228,66 | 159,48 | 182,93 | 25 |
| 14 | 212,24 | 155,96 | 158,30 | 26 |
| 15 | 206,38 | 162,99 | 179,41 | 17 |
| 16 | 200,52 | 167,68 | 162,99 | 18 |
| 17 | 214,59 | 168,86 | 167,68 | 22 |
| 18 | 218,11 | 166,51 | 168,86 | 23 |

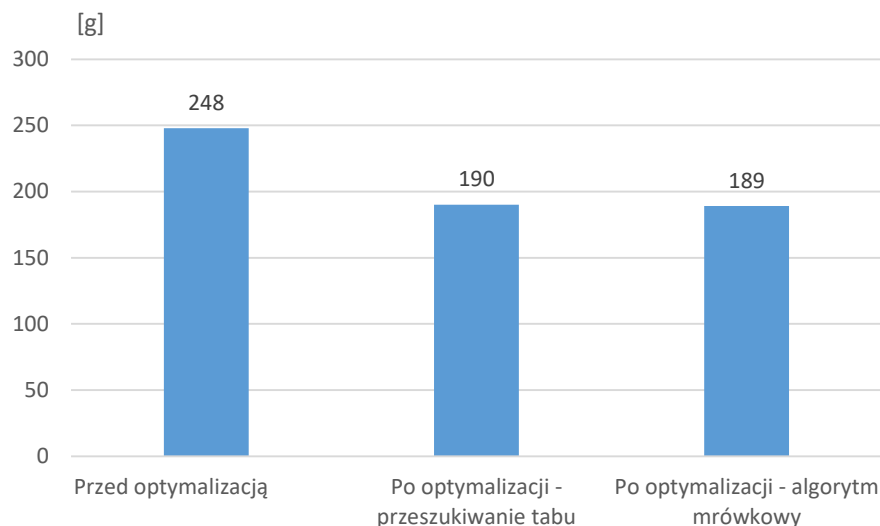
Wyniki obliczeń zawarte w tablicy 6.25 po optymalizacji tras pojazdów wskazują na wymierne ograniczenie emisji NO_x przy zbiorce odpadów dla realizowanych tras. Dla zbiórki odpadów segregowanych w zakresie od 11% do 31%, natomiast dla zbiórki odpadów wielkogabarytowych od 15% do 33%.

Na rysunku 6.52 przedstawiono porównanie średnich wartości miernika emisji NO_x [$M_{NO_x}^s$] zrealizowanych tras zbiórki odpadów segregowanych, natomiast na rysunku 6.53 dla odpadów wielkogabarytowych.



Rys. 6.52. Porównanie średnich wartości miernika emisji NO_x - [$M_{NO_x}^s$] [g] zrealizowanych tras zbiórki odpadów segregowanych (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika emisji NO_x dla tras zbiórek odpadów segregowanych została zredukowana z wartości 762 g do 602 g po optymalizacji tras z zastosowaniem algorytmu mrówkowego (rys. 6.52).



Rys. 6.53. Porównanie średnich wartości miernika emisji NO_x [$M_{NO_x}^s$] [g] zrealizowanych tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika emisji NO_x dla tras zbiórek odpadów wielkogabarytowych została zredukowana z 248 g do 189 g po optymalizacji trasy z wykorzystaniem algorytmu mrówkowego (rys. 6.53).

W oparciu o zależność (6) wyznaczono mierniki emisji PM M_{PM}^s tras zbiórek odpadów segregowanych oraz wielkogabarytowych. Obliczone wartości mierników zestawiono w tabelicy 6.26.

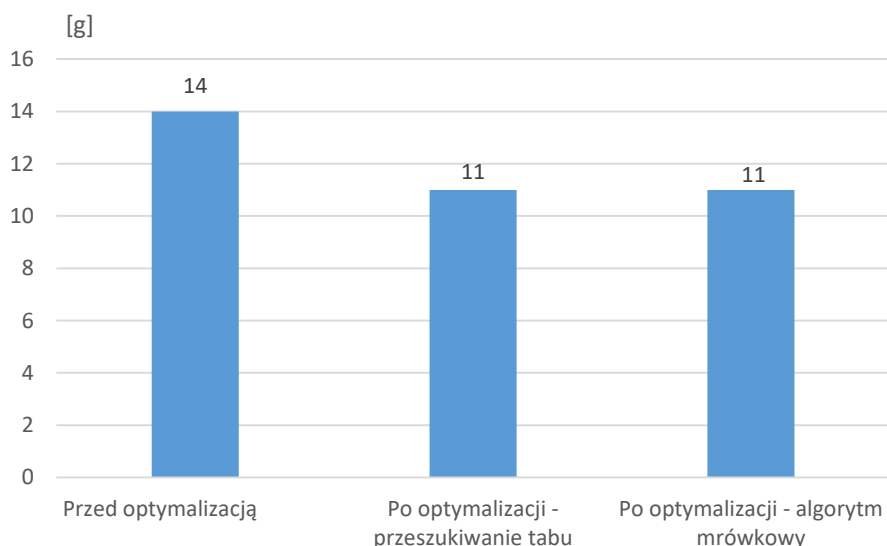
Tabela 6.26. Zestawienie wyliczonych wartości miernika emisji PM [g] (opracowanie własne)

| Nr trasy | Wartość emisji PM dla tras przed optymalizacją [g] | Wartość emisji PM dla tras po optymalizacji - przeszukiwane tabu [g] | Wartość emisji PM dla tras po optymalizacji - algorytm mrówkowy [g] | Średnia zmiana po optymalizacji trasy [%] |
|-------------------------|--|--|---|---|
| Pojazdy ciężarowe z HDS | | | | |
| 1 | 8,73 | 7,90 | 7,69 | 11 |
| 2 | 26,18 | 22,02 | 21,61 | 17 |
| 3 | 14,34 | 12,05 | 11,64 | 17 |
| 4 | 16,41 | 12,88 | 12,88 | 22 |
| 5 | 13,51 | 10,18 | 10,18 | 25 |
| 6 | 10,18 | 7,06 | 7,06 | 31 |
| 7 | 9,56 | 6,86 | 7,06 | 27 |

Tablica 6.26. cd.

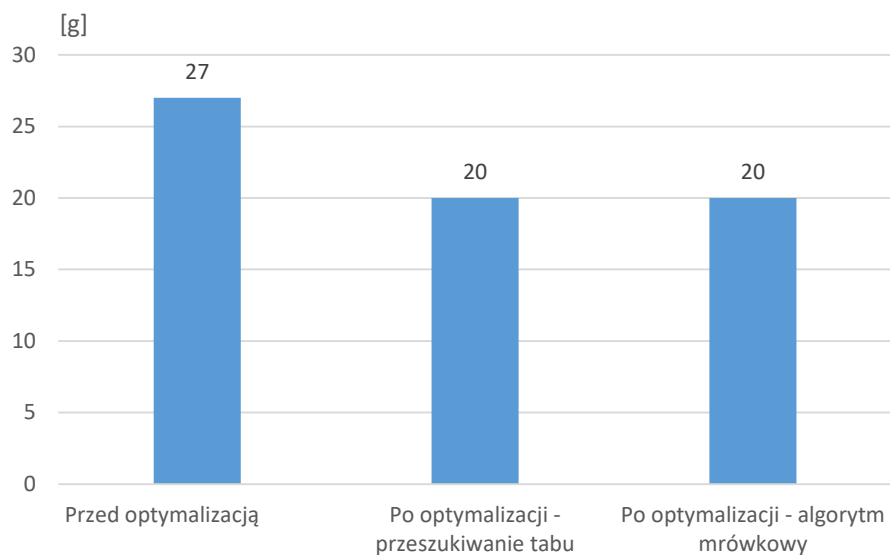
| Nr trasy | Wartość emisji PM dla tras przed optymalizacją [g] | Wartość emisji PM dla tras po optymalizacji - przeszukiwanie tabu [g] | Wartość emisji PM dla tras po optymalizacji - algorytm mrówkowy [g] | Średnia zmiana po optymalizacji trasy [%] |
|-------------------------------|--|---|---|---|
| Pojazdy z zabudową skrzyniową | | | | |
| 8 | 32,64 | 25,06 | 26,34 | 21 |
| 9 | 36,62 | 26,34 | 23,90 | 31 |
| 10 | 28,53 | 26,34 | 19,15 | 20 |
| 11 | 38,55 | 26,86 | 25,06 | 33 |
| 12 | 23,00 | 17,48 | 21,85 | 15 |
| 13 | 25,06 | 17,48 | 20,05 | 25 |
| 14 | 23,26 | 17,09 | 17,35 | 26 |
| 15 | 22,62 | 17,86 | 19,66 | 17 |
| 16 | 21,97 | 18,38 | 17,86 | 18 |
| 17 | 23,52 | 18,50 | 18,38 | 22 |
| 18 | 23,90 | 18,25 | 18,50 | 23 |

Zakres uzyskanego ograniczenia emisji zawiera się w zakresie od 11% do 31%, dla zbiórki odpadów segregowanych, natomiast dla zbiórki odpadów wielkogabarytowych od 15% do 33%. Zastosowanie optymalizacji tras i w konsekwencji ich skrócenie pozwala na wymierne ograniczenie emisji PM. Na rysunku 6.54 przedstawiono porównanie średnich wartości miernika emisji PM M_{PM}^S zrealizowanych tras zbiórek odpadów segregowanych, natomiast na rysunku 6.55. dla odpadów wielkogabarytowych.



Rys. 6.54. Porównanie średnich wartości miernika emisji PM [M_{PM}^S] [g] zrealizowanych tras zbiórek odpadów segregowanych (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika emisji PM dla tras zbiórek odpadów segregowanych została zredukowana z 14 g do 11 g (rys.6.54).



Rys. 6.55. Porównanie średnich wartości miernika emisji PM $[M_{PM}^S] [g]$ zrealizowanych tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych (opracowanie własne)

Średnia wartość miernika emisji PM dla tras zbiórek odpadów wielkogabarytowych została ograniczona z 27 g do 20 g dla wykonywanych tras (rys.6.55).

7. Wnioski

Na podstawie badań zrealizowanych w ramach niniejszej dysertacji można wysunąć następujące wnioski:

- opracowany model matematyczny zbiórki i transportu odpadów uwzględniający wskaźnik efektywności ekonomicznej, mierniki masy zebranych odpadów oraz mierniki oddziaływania na środowisko umożliwił przeprowadzenie obliczeń tych czynników dla wybranych kategorii odpadów – selektywnej zbiórki – tworzyw sztucznych i odpadów wielkogabarytowych,
- dzięki zastosowaniu algorytmów sztucznej inteligencji – przeszukiwania tabu i mrówkowego uzyskano wymierne efekty poprawy efektywności transportu i zbiórki odpadów. Dla odpadów tworzyw sztucznych i odpadów wielkogabarytowych znacząco ograniczono czas przejazdu i długość tras,
- w wyniku optymalizacji tras przy odbiorze odpadów tworzyw sztucznych w zabudowie zwartej miejskiej średnia długość tras została skrócona o 21%, natomiast czas realizacji zbiórki o 11% w stosunku do aktualnie realizowanych tras,
- w wyniku optymalizacji tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych uzyskano średnie skrócenie długości tras do 22%, natomiast czasu przejazdu do 22% w stosunku do tras realizowanych aktualnie przez kierowców w firmie zbierającej odpady,
- wskaźnik efektywności ekonomicznej zbiórki i transportu dla odpadów tworzyw sztucznych został podwyższony do 27%, natomiast dla odpadów wielkogabarytowych do 40%,
- mierniki emisji NO_x, PM, CO₂ zmniejszyły się – dla tras zbiórki odpadów tworzyw sztucznych o 31%, natomiast dla tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych do 33%.

Wymienione powyżej wnioski potwierdzają zrealizowanie **celu badawczego** pracy doktorskiej ze wskazaniem zasadności wykorzystania algorytmów sztucznej inteligencji.

Opracowane nowe plany zbiórki odpadów po zastosowaniu optymalizacji pozwoliły na wykonanie tych tras przez kierowców w warunkach rzeczywistych. Wybrane trasy były realizowane kilkakrotnie, a uzyskane wyniki odległości oraz czasu wykonywania tras były zbliżone do tras wyznaczonych w modelu matematycznym. Można stwierdzić,

że **cel utylitarny** został zrealizowany i wyniki mogą zostać wykorzystane w praktyce w zbiórce i transporcie odpadów w przedsiębiorstwach transportowych.

Wyznaczone wskaźniki ekonomiczne oraz mierniki emisji umożliwiają oceną transportu i zbiórki odpadów komunalnych w ujęciu interdyscyplinarnym. Uzyskane rezultaty po optymalizacji tras i przeprowadzeniu pozostałych obliczeń **udowadniają tezę** postawioną w doktoracie dotyczącą wpływu zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji na poprawę efektywności ekonomicznej transportu i zbiórki odpadów komunalnych w sposób wymierny.

Opracowany model oraz wyniki wskaźników i mierników wyznaczonych w niniejszej pracy nadają się do rozwinięcia modelu zbiórki i transportu odpadów. Umożliwiają one zastosowanie analizy wielokryterialnej podejmowania decyzji przy doborze specjalistycznych pojazdów, projektowania tras zbiórek, a także estymacji wpływu na środowisko naturalne w ujęciu interdyscyplinarnym. Stanowi to temat do dalszych badań wynikających ze zrealizowanej pracy doktorskiej.

Spis literatury

- [1] „World”, *The World Factbook*. Central Intelligence Agency, 7 luty 2023. Dostęp: 20 luty 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/world/>
- [2] „GDP (current US\$) | Data”. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?end=2020&start=1990> (dostęp 23 grudzień 2022).
- [3] „File:Municipal waste generated, in selected years, 1995-2020 (kg per capita) .png”. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Municipal_waste_generated,_in_selected_years,_1995-2020_\(kg_per_capita\)_png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Municipal_waste_generated,_in_selected_years,_1995-2020_(kg_per_capita)_png) (dostęp 23 grudzień 2022).
- [4] GUS, „Infrastruktura komunalna w 2017 r.”, *stat.gov.pl*. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/infrastruktura-komunalna-nieruchomosci/nieruchomosci-budynki-infrastruktura-komunalna/infrastruktura-komunalna-w-2017-r-,3,15.html> (dostęp 25 grudzień 2022).
- [5] J. Kulczycka, „Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych”, *Kraków: Wydawnictwo IGSMiE PAN*, 2019.
- [6] J. Kulczycka, „Wskaźniki gospodarki o obiegu zamkniętym dla Unii Europejskiej i Polski”, *Gospodarka w praktyce i teorii*, t. 53, nr 4, s. 81–93, 2018.
- [7] „Ustawa z dnia 1 lipca 2011 roku o zmianie ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach oraz niektórych innych ustaw (Dz. U. Nr 152, poz. 897).”
- [8] E. K. Chyłek, „Nowe strategie Komisji Europejskiej dotyczące biogospodarki i gospodarki wewnętrznej o obiegu zamkniętym”, *polish Journal of agronomy*, t. 25, s. 3–12, 2016.
- [9] „Circular economy action plan”. https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en (dostęp 23 marzec 2022).
- [10] J. Jędrak, E. Konduracka, A. J. Badyda, i P. Dąbrowiecki, *Wpływ zanieczyszczeń powietrza na zdrowie*. Krakowski Alarm Smogowy, 2017. Dostęp: 13 luty 2023. [Online]. Dostępne na: <https://depot.ceon.pl/handle/123456789/15434>
- [11] C. Rosik-Dulewska, *Podstawy Gospodarki Odpadami*, Szóste uaktualnione. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2015.
- [12] M. Wojtaszek-Kalaitzidi i R. Wasielewski, „Kierunki zagospodarowania odpadów sztucznych w krajach Unii Europejskiej. Directions of waste plastics recovery in countries of European Union”, *Archive of Waste Management*, t. 11, s. 1–12, sty. 2009.
- [13] B. Bień i J. D. Bień, „Gromadzenie i selektywna zbiórka odpadów komunalnych w gminach”, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, t. 13, nr 3, s. 173–183, 2010.
- [14] J. Zalewska, „System gospodarowania odpadami w Polsce–stan aktualny i kierunki doskonalenia”, *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Ekonomika i Organizacja Logistyki*, t. 4, nr 1, s. 103–113, 2019.
- [15] K. Pikoń i K. Galica, „Spalanie odpadów komunalnych–analiza przypadku”, *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, t. 5, s. 71–90, 2007.
- [16] N. Poranek, A. Czajkowski, Ł. Wagstyl, i B. Łażniewska–Piekarczyk, „Zagospodarowanie odpadów wtórnych jako ostatni element GOZ”, *Współczesne Problemy Ochrony Środowiska i Energetyki (Recycling waste management as the last element of circular economy. In Contemporary Problems of Environmental Protection and Energy)*, s. 213–220, 2020.
- [17] J. Pyssa, „Techniczno-ekonomiczne oraz ekologiczne aspekty odzysku i unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych”, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 24, nr 1, s. 113–125, 2008.
- [18] „Transport — Europejska Agencja Środowiska”. <https://www.eea.europa.eu/pl/themes/transport> (dostęp 30 grudzień 2022).
- [19] „Emisje CO2 z samochodów: fakty i liczby (infografiki) | Aktualności | Parlament Europejski”, 11 kwiecień 2019.

- <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20190313STO31218/emis-je-co2-z-samochodow-fakty-i-liczby-infografiki> (dostęp 6 grudzień 2022).
- [20] „Regulation (EC) No 715/2007 on type approval of motor vehicles — European Environment Agency”. <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/regulation-ec-no-715-2007> (dostęp 7 luty 2023).
- [21] J. Korhonen, A. Honkasalo, i J. Seppälä, „Circular Economy: The Concept and its Limitations”, *Ecological Economics*, t. 143, s. 37–46, 2018.
- [22] D. Ning, „Cleaner Production, Eco-industry and Circular Economy”, *Research of Environmental Sciences*, t. 6, nr 1, 2001.
- [23] F. Bartolacci, R. Cerqueti, A. Paolini, i M. Soverchia, „An economic efficiency indicator for assessing income opportunities in sustainable waste management”, *Environmental Impact Assessment Review*, t. 78, s. 106279, 2019.
- [24] E. European Commission, „Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy COM/2015/0614”, *COM (2011)*, s. 21, 2015.
- [25] E. European Commission, „A Resource-Efficient Europe—Flagship Initiative under the Europe 2020 Strategy”, *COM (2011)*, s. 21, 2011.
- [26] F. C. Bergeron, „Analytical method of waste allocation in waste management systems: Concept, method and case study”, *Environmental Impact Assessment Review*, t. 62, s. 35–48, 2017.
- [27] A. Massarutto, „Economic aspects of thermal treatment of solid waste in a sustainable WM system”, *Waste Management*, t. 37, s. 45–57, 2015.
- [28] F. Bartolacci, A. Paolini, A. G. Quaranta, i M. Soverchia, „Assessing factors that influence waste management financial sustainability”, *Waste management*, t. 79, s. 571–579, 2018.
- [29] D. Hoornweg i P. Bhada-Tata, „What a waste: a global review of solid waste management”, 2012, Dostęp: 13 luty 2016. [Online]. Dostępne na: <https://wdronline.worldbank.org/handle/10986/17388>
- [30] P. H. Brunner, „Urban Mining A Contribution to Reindustrializing the City”, *Journal of Industrial Ecology*, t. 15, nr 3, s. 339–341, 2011, doi: 10.1111/j.1530-9290.2011.00345.x.
- [31] B. Robelia i T. Murphy, „What do people know about key environmental issues? A review of environmental knowledge surveys”, *Environmental Education Research*, t. 18, nr 3, s. 299–321, 2012.
- [32] K. O. Zacho i M. A. Mosgaard, „Understanding the role of waste prevention in local waste management: A literature review”, *Waste Management & Research*, t. 34, nr 10, s. 980–994, 2016.
- [33] B. Gatersleben, L. Steg, i C. Vlek, „Measurement and Determinants of Environmentally Significant Consumer Behavior”, *Environment and Behavior*, t. 34, nr 3, s. 335–362, 2002, doi: 10.1177/0013916502034003004.
- [34] J. Li, L. Liu, J. Ren, H. Duan, i L. Zheng, „Behavior of urban residents toward the discarding of waste electrical and electronic equipment: a case study in Baoding, China”, *Waste Management & Research*, t. 30, nr 11, s. 1187–1197, 2012, doi: 10.1177/0734242X12456728.
- [35] N. Milovantseva i J.-D. Saphores, „E-waste bans and U.S. households’ preferences for disposing of their e-waste”, *Journal of Environmental Management*, t. 124, s. 8–16, lip. 2013, doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.019.
- [36] A. Borthakur i M. Govind, „Emerging trends in consumers’ E-waste disposal behaviour and awareness: A worldwide overview with special focus on India”, *Resources, Conservation and Recycling*, t. 117, s. 102–113, luty 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.11.011.
- [37] M. Grodzińska-Jurczak, „The relation between education, knowledge and action for better waste management in Poland”, *Waste management & research*, t. 21, nr 1, s. 2–18, 2003.
- [38] A. Minelgaitė i G. Liobikienė, „Waste problem in European Union and its influence on waste management behaviours”, *Science of the Total Environment*, t. 667, s. 86–93, 2019.
- [39] B. Esmaeilian, B. Wang, K. Lewis, F. Duarte, C. Ratti, i S. Behdad, „The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper”, *Waste Management*, t. 81, s. 177–195, lis. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.09.047.

- [40] S. J. Raghu i L. L. Rodrigues, „Behavioral aspects of solid waste management: A systematic review”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, t. 70, nr 12, s. 1268–1302, 2020.
- [41] H. Friege, M. Oberdörfer, i M. Günther, „Optimising waste from electric and electronic equipment collection systems: A comparison of approaches in European countries”, *Waste Management & Research*, t. 33, nr 3, s. 223–231, 2015.
- [42] Z. Zsigraiova, V. Semiao, i F. Beijoco, „Operation costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of MSW collection routes using GIS. The case study of Barreiro, Portugal”, *Waste Management*, t. 33, nr 4, s. 793–806, kwi. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.11.015.
- [43] A. Pires, G. Martinho, i N.-B. Chang, „Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques”, *Journal of Environmental Management*, t. 92, nr 4, s. 1033–1050, kwi. 2011, doi: 10.1016/j.jenvman.2010.11.024.
- [44] T. C. Kinnaman, „Policy Watch: Examining the Justification for Residential Recycling”, *Journal of Economic Perspectives*, t. 20, nr 4, s. 219–232, 2006, doi: 10.1257/jep.20.4.219.
- [45] E. Dijkgraaf i R. Gradus, „Cost savings of contracting out refuse collection”, *Empirica*, t. 30, s. 149–161, 2003.
- [46] V. Elia, M. G. Gnoni, i F. Tornese, „Assessing the Efficiency of a PSS Solution for Waste Collection: A Simulation Based Approach”, *Procedia CIRP*, t. 47, s. 252–257, sty. 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.03.086.
- [47] F. Passarini, I. Vassura, F. Monti, L. Morselli, i B. Villani, „Indicators of waste management efficiency related to different territorial conditions”, *Waste Management*, t. 31, nr 4, s. 785–792, kwi. 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2010.11.021.
- [48] P. Beigl i S. Salhofer, „Comparison of ecological effects and costs of communal waste management systems”, *Resources, Conservation and Recycling*, t. 41, nr 2, s. 83–102, maj 2004, doi: 10.1016/j.resconrec.2003.08.007.
- [49] K. Fricke, T. Bahr, W. Bidlingmaier, i C. Springer, „Energy efficiency of substance and energy recovery of selected waste fractions”, *Waste Management*, t. 31, nr 4, s. 644–648, kwi. 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2010.11.017.
- [50] A. Lombrano, „Cost efficiency in the management of solid urban waste”, *Resources, Conservation and Recycling*, t. 53, nr 11, s. 601–611, wrz. 2009, doi: 10.1016/j.resconrec.2009.04.017.
- [51] N. F. da Cruz, P. Simões, i R. C. Marques, „Economic cost recovery in the recycling of packaging waste: the case of Portugal”, *Journal of Cleaner Production*, t. 37, s. 8–18, grudz. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.05.043.
- [52] G. De Feo, C. Ferrara, A. Finelli, i A. Grosso, „Environmental and economic benefits of the recovery of materials in a municipal solid waste management system”, *Environmental Technology*, t. 40, nr 7, s. 903–911, 2019, doi: 10.1080/09593330.2017.1411395.
- [53] S. Hellweg, G. Doka, G. Finnveden, i K. Hungerbühler, „Assessing the eco-efficiency of end-of-pipe technologies with the environmental cost efficiency indicator”, *Journal of Industrial Ecology*, t. 9, nr 4, s. 189–203, 2005.
- [54] P. Simões, P. Carvalho, i R. C. Marques, „Performance assessment of refuse collection services using robust efficiency measures”, *Resources, Conservation and Recycling*, t. 67, s. 56–66, paź. 2012, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.07.006.
- [55] Ch. Achillas, D. Aidonis, Ch. Vlachokostas, N. Moussiopoulos, G. Baniias, i D. Triantafyllou, „A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media”, *Resources, Conservation and Recycling*, t. 66, s. 76–84, wrz. 2012, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.01.004.
- [56] B. Mota, M. I. Gomes, A. Carvalho, i A. P. Barbosa-Povoa, „Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning”, *Journal of Cleaner Production*, t. 105, s. 14–27, paź. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.052.
- [57] M. Nowak, Ö. Ergun, i I. I. I. Chelsea C. White, „Pickup and Delivery with Split Loads”, *Transportation Science*, t. 42, nr 1, s. 32–43, 2008.

- [58] G. Ghiani, D. Laganà, E. Manni, R. Musmanno, i D. Vigo, „Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues”, *Computers & Operations Research*, t. 44, s. 22–32, kwi. 2014, doi: 10.1016/j.cor.2013.10.006.
- [59] A. Sbihi i R. W. Eglese, „Combinatorial optimization and Green Logistics”, *4OR*, t. 5, nr 2, s. 99–116, cze. 2007, doi: 10.1007/s10288-007-0047-3.
- [60] E. Arıkan, Z. T. Şimşit-Kalender, i Ö. Vayvay, „Solid waste disposal methodology selection using multi-criteria decision making methods and an application in Turkey”, *Journal of Cleaner Production*, paź. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.054.
- [61] E. Dosal, J. R. Viguri, i A. Andrés, „Multi-criteria decision-making methods for the optimal location of construction and demolition waste (C&DW) recycling facilities”, w *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Elsevier, 2013, s. 76–107. Dostęp: 1 luty 2016. [Online]. Dostępne na: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857096821500051>
- [62] A. W. Larsen, H. Merrild, J. Møller, i T. H. Christensen, „Waste collection systems for recyclables: An environmental and economic assessment for the municipality of Aarhus (Denmark)”, *Waste Management*, t. 30, nr 5, s. 744–754, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.10.021>.
- [63] S. Rodrigues, G. Martinho, i A. Pires, „Waste collection systems. Part B: Benchmarking indicators. Benchmarking of the Great Lisbon Area, Portugal”, *Journal of Cleaner Production*, t. 139, s. 230–241, grudz. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.146.
- [64] R. Kijak i D. Moy, „A decision support framework for sustainable waste management”, *Journal of Industrial Ecology*, t. 8, nr 3, s. 33–50, 2004.
- [65] C. Zurbrügg, M. Caniato, i M. Vaccari, „How Assessment Methods Can Support Solid Waste Management in Developing Countries—A Critical Review”, *Sustainability*, t. 6, nr 2, s. 545–570, sty. 2014, doi: 10.3390/su6020545.
- [66] L. Rigamonti, I. Sterpi, i M. Grosso, „Integrated municipal waste management systems: An indicator to assess their environmental and economic sustainability”, *Ecological Indicators*, t. 60, s. 1–7, sty. 2016, doi: 10.1016/j.ecolind.2015.06.022.
- [67] A. Sarra, M. Mazzocchitti, i A. Rapposelli, „Evaluating joint environmental and cost performance in municipal waste management systems through data envelopment analysis: Scale effects and policy implications”, *Ecological Indicators*, t. 73, s. 756–771, luty 2017, doi: 10.1016/j.ecolind.2016.10.035.
- [68] G. Bertanza, E. Ziliani, i L. Menoni, „Techno-economic performance indicators of municipal solid waste collection strategies”, *Waste Management*, t. 74, s. 86–97, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.009>.
- [69] M. X. Paes, G. A. de Medeiros, S. D. Mancini, A. P. Bortoleto, J. A. P. de Oliveira, i L. A. Kulay, „Municipal solid waste management: Integrated analysis of environmental and economic indicators based on life cycle assessment”, *Journal of Cleaner Production*, t. 254, s. 119848, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119848>.
- [70] P. Sawicki, I. T. E. Wydawnictwo, i W. N. I. T. Eksploatacji, *Wielokryterialna optymalizacja procesów w transporcie*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - Państwowego Instytutu Badawczego, 2013. [Online]. Dostępne na: <https://books.google.pl/books?id=gutloAEACAAJ>
- [71] P. Toth i D. Vigo, *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2014. [Online]. Dostępne na: <https://books.google.pl/books?id=VUzUBQAAQBAJ>
- [72] S. Das i B. Kr. Bhattacharyya, „Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes”, *Waste Management*, t. 43, s. 9–18, wrz. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.06.033.
- [73] F. McLeod i T. Cherrett, „Quantifying the transport impacts of domestic waste collection strategies”, *Waste Management*, t. 28, nr 11, s. 2271–2278, lis. 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.09.041.
- [74] J. Bramel i D. Simchi-Levi, „A location based heuristic for general routing problems”, *Operations research*, t. 43, nr 4, s. 649–660, 1995.

- [75] T. K. Ralphs, L. Kopman, W. R. Pulleyblank, i L. E. Trotter, „On the capacitated vehicle routing problem”, *Mathematical programming*, t. 94, nr 2–3, s. 343–359, 2003.
- [76] G. Ulusoy, „The fleet size and mix problem for capacitated arc routing”, *European Journal of Operational Research*, t. 22, nr 3, s. 329–337, 1985.
- [77] Y.-C. Liang, V. Minanda, i A. Gunawan, „Waste collection routing problem: A mini-review of recent heuristic approaches and applications”, *Waste Management & Research*, t. 40, nr 5, s. 519–537, 2022.
- [78] R. J. Kuo, F. E. Zulvia, i K. Suryadi, „Hybrid particle swarm optimization with genetic algorithm for solving capacitated vehicle routing problem with fuzzy demand – A case study on garbage collection system”, *Applied Mathematics and Computation*, t. 219, nr 5, s. 2574–2588, lis. 2012, doi: 10.1016/j.amc.2012.08.092.
- [79] S. F. Ghannadpour, S. Noori, i R. Tavakkoli-Moghaddam, „A multi-objective vehicle routing and scheduling problem with uncertainty in customers’ request and priority”, *Journal of Combinatorial Optimization*, t. 28, nr 2, s. 414–446, 2014, doi: 10.1007/s10878-012-9564-x.
- [80] S. Liu, W. Huang, i H. Ma, „An effective genetic algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problems”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, t. 45, nr 3, s. 434–445, maj 2009, doi: 10.1016/j.tre.2008.10.003.
- [81] A. S. Tasan i M. Gen, „A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries”, *Computers & Industrial Engineering*, t. 62, nr 3, s. 755–761, kwi. 2012, doi: 10.1016/j.cie.2011.11.025.
- [82] Z. Ursani, D. Essam, D. Cornforth, i R. Stocker, „Localized genetic algorithm for vehicle routing problem with time windows”, *Applied Soft Computing*, t. 11, nr 8, s. 5375–5390, grudz. 2011, doi: 10.1016/j.asoc.2011.05.021.
- [83] B. M. Baker i M. A. Ayechev, „A genetic algorithm for the vehicle routing problem”, *Computers & Operations Research*, t. 30, nr 5, s. 787–800, 2003.
- [84] B. Ombuki, B. J. Ross, i F. Hanshar, „Multi-objective genetic algorithms for vehicle routing problem with time windows”, *Applied Intelligence*, t. 24, nr 1, s. 17–30, 2006.
- [85] L. N. De Castro i F. J. Von Zuben, „Artificial immune systems: Part I–basic theory and applications”, *Universidade Estadual de Campinas, Dezembro de, Tech. Rep*, t. 210, 1999.
- [86] J. Timmis, T. Knight, L. N. de Castro, i E. Hart, „An overview of artificial immune systems”, w *Computation in Cells and Tissues*, Springer, 2004, s. 51–91.
- [87] H. Keko, M. Skok, i D. Skrlec, „Artificial immune systems in solving routing problems”, w *EUROCON 2003. Computer as a Tool. The IEEE Region 8*, IEEE, 2003, s. 62–66. Dostęp: 28 styczeń 2017. [Online]. Dostępne na: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1247979/>
- [88] A. Diabat, D. Kannan, M. Kaliyan, i D. Svetinovic, „An optimization model for product returns using genetic algorithms and artificial immune system”, *Resources, Conservation and Recycling*, t. 74, s. 156–169, maj 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.12.010.
- [89] J. B. Escario, J. F. Jimenez, i J. M. Giron-Sierra, „Ant Colony Extended: Experiments on the Travelling Salesman Problem”, *Expert Systems with Applications*, t. 42, nr 1, s. 390–410, sty. 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2014.07.054.
- [90] S.-H. Huang i P.-C. Lin, „Vehicle routing–scheduling for municipal waste collection system under the “Keep Trash off the Ground” policy”, *Omega*, t. 55, s. 24–37, wrz. 2015, doi: 10.1016/j.omega.2015.02.004.
- [91] N. V. Karadimas, K. Papatzelou, i V. G. Loumos, „Optimal solid waste collection routes identified by the ant colony system algorithm”, *Waste management & research*, t. 25, nr 2, s. 139–147, 2007.
- [92] J. Liu i Y. He, „A clustering-based multiple ant colony system for the waste collection vehicle routing problems”, w *2012 Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design*, IEEE, 2012, s. 182–185.
- [93] S. Seçkiner, A. M. Shumye, i S. Geçer, „Minimizing solid waste collection routes using ant colony algorithm: a case study in gaziantep district”, *Journal of Transportation and Logistics*, t. 6, nr 1, s. 29–47, 2021.

- [94] Y. Lin, Z. Bian, i X. Liu, „Developing a dynamic neighborhood structure for an adaptive hybrid simulated annealing – tabu search algorithm to solve the symmetrical traveling salesman problem”, *Applied Soft Computing*, t. 49, s. 937–952, grudz. 2016, doi: 10.1016/j.asoc.2016.08.036.
- [95] S. Shao, S. X. Xu, i G. Q. Huang, „Variable neighborhood search and tabu search for auction-based waste collection synchronization”, *Transportation Research Part B: Methodological*, t. 133, s. 1–20, 2020.
- [96] A. M. Benjamin i J. E. Beasley, „Metaheuristics for the waste collection vehicle routing problem with time windows, driver rest period and multiple disposal facilities”, *Computers & Operations Research*, t. 37, nr 12, s. 2270–2280, grudz. 2010, doi: 10.1016/j.cor.2010.03.019.
- [97] K. Buhrkal, A. Larsen, i S. Ropke, „The Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows in a City Logistics Context”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, t. 39, s. 241–254, 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.03.105.
- [98] B.-I. Kim, S. Kim, i S. Sahoo, „Waste collection vehicle routing problem with time windows”, *Computers & Operations Research*, t. 33, nr 12, s. 3624–3642, grudz. 2006, doi: 10.1016/j.cor.2005.02.045.
- [99] A. Król, P. Nowakowski, i B. Mrówczyńska, „How to improve WEEE management? Novel approach in mobile collection with application of artificial intelligence”, *Waste Management*, t. 50, s. 222–233, kwi. 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.02.033.
- [100] P. Nowakowski, A. Król, i B. Mrówczyńska, „Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimisation”, *Waste Management*, t. 69, s. 377–392, lis. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.045.
- [101] E. Babae Tirkolae, P. Abbasian, M. Soltani, i S. A. Ghaffarian, „Developing an applied algorithm for multi-trip vehicle routing problem with time windows in urban waste collection: A case study”, *Waste Manag Res*, t. 37, nr 1_suppl, s. 4–13, 2019, doi: 10.1177/0734242X18807001.
- [102] J. Bautista, E. Fernández, i J. Pereira, „Solving an urban waste collection problem using ants heuristics”, *Computers & Operations Research*, t. 35, nr 9, s. 3020–3033, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.01.029>.
- [103] J. R. Gómez, J. Pacheco, i H. Gonzalo-Orden, „A Tabu search method for a bi-objective urban waste collection problem”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, t. 30, nr 1, s. 36–53, 2015.
- [104] H. Wu, F. Tao, i B. Yang, „Optimization of vehicle routing for waste collection and transportation”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, t. 17, nr 14, s. 4963, 2020.
- [105] E. B. Tirkolae, A. Goli, S. Gütmen, G.-W. Weber, i K. Szwedzka, „A novel model for sustainable waste collection arc routing problem: Pareto-based algorithms”, *Ann Oper Res*, 2022, doi: 10.1007/s10479-021-04486-2.
- [106] C. A. Arribas, C. A. Blazquez, i A. Lamas, „Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems”, *Waste Management & Research*, t. 28, nr 4, s. 355–363, 2010, doi: 10.1177/0734242X0935343.
- [107] N.-B. Chang, H. Y. Lu, i Y. L. Wei, „GIS technology for vehicle routing and scheduling in solid waste collection systems”, *Journal of environmental engineering*, t. 123, nr 9, s. 901–910, 1997.
- [108] M. Faccio, A. Persona, i G. Zanin, „Waste collection multi objective model with real time traceability data”, *Waste Management*, t. 31, nr 12, s. 2391–2405, grudz. 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.07.005.
- [109] A. Medvedev, P. Fedchenkov, A. Zaslavsky, T. Anagnostopoulos, i S. Khoruzhnikov, „Waste Management as an IoT-Enabled Service in Smart Cities”, w *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 15th International Conference, NEW2AN 2015, and 8th Conference, ruSMART 2015, St. Petersburg, Russia, August 26-28, 2015, Proceedings*, S. Balandin, S. Andreev, i Y. Koucheryavy, Red., Cham: Springer International Publishing,

- 2015, s. 104–115. [Online]. Dostępne na: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-23126-6_10
- [110] S. Nanda i F. Berruti, „Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review”, *Environmental Chemistry Letters*, t. 19, nr 2, s. 1433–1456, 2021.
- [111] M. S. S. R. Tejaswini, P. Pathak, i D. K. Gupta, „Sustainable approach for valorization of solid wastes as a secondary resource through urban mining”, *Journal of Environmental Management*, t. 319, s. 115727, 2022.
- [112] Z. Zhang, M. Z. Malik, A. Khan, N. Ali, S. Malik, i M. Bilal, „Environmental impacts of hazardous waste, and management strategies to reconcile circular economy and eco-sustainability”, *Science of the Total Environment*, t. 807, s. 150856, 2022.
- [113] S. Salhofer, F. Schneider, i G. Obersteiner, „The ecological relevance of transport in waste disposal systems in Western Europe”, *Waste Management*, t. 27, nr 8, s. S47–S57, sty. 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2007.02.025.
- [114] W. P. Anderson, P. S. Kanaroglou, i E. J. Miller, „Urban Form, Energy and the Environment: A Review of Issues, Evidence and Policy”, *Urban Studies*, t. 33, nr 1, s. 7–35, 1996.
- [115] K. Ahn i H. Rakha, „The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, t. 13, nr 3, s. 151–167, maj 2008, doi: 10.1016/j.trd.2008.01.005.
- [116] G. Tavares, Z. Zsigraiova, V. Semiao, i M. da Graça Carvalho, „A case study of fuel savings through optimisation of MSW transportation routes”, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, t. 19, nr 4, s. 444–454, cze. 2008, doi: 10.1108/14777830810878632.
- [117] T. Bektaş i G. Laporte, „The pollution-routing problem”, *Transportation Research Part B: Methodological*, t. 45, nr 8, s. 1232–1250, 2011.
- [118] M. Figliozzi, „Vehicle Routing Problem for Emissions Minimization”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, t. 2197, s. 1–7, 2010.
- [119] W. Bi, W. Lu, Z. Zhao, i C. J. Webster, „Combinatorial optimization of construction waste collection and transportation: A case study of Hong Kong”, *Resources, Conservation and Recycling*, t. 179, s. 106043, 2022.
- [120] G. Fontaras i in., „Assessment of on-road emissions of four Euro V diesel and CNG waste collection trucks for supporting air-quality improvement initiatives in the city of Milan”, *Science of The Total Environment*, t. 426, s. 65–72, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.038>.
- [121] M. A. Hannan i in., „Waste collection route optimisation model for linking cost saving and emission reduction to achieve sustainable development goals”, *Sustainable Cities and Society*, t. 62, s. 102393, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102393>.
- [122] K. Lewczuk, J. Żak, D. Pyza, i I. Jacyna-Gołda, „Vehicle routing in an urban area: Environmental and technological determinants”, *WIT Transactions on the Built Environment*, t. 130, s. 373–384, 2013.
- [123] T. Nuortio, J. Kytojoki, H. Niska, i O. Braysy, „Improved route planning and scheduling of waste collection and transport”, *Expert Systems with Applications*, t. 30, nr 2, s. 223–232, luty 2006, doi: 10.1016/j.eswa.2005.07.009.
- [124] R. Assaf i Y. Saleh, „Vehicle-Routing Optimization for Municipal Solid Waste Collection Using Genetic Algorithm: The Case of Southern Nablus City”, *Civil and Environmental Engineering Reports*, t. 26, nr 3, s. 43–57, wrz. 2017, doi: 10.1515/ceer-2017-0034.
- [125] E. Mofid-Nakhaee i F. Barzinpour, „A multi-compartment capacitated arc routing problem with intermediate facilities for solid waste collection using hybrid adaptive large neighborhood search and whale algorithm”, *Waste Manag Res*, t. 37, nr 1, s. 38–47, sty. 2019, doi: 10.1177/0734242X18801186.
- [126] V. Nevrlý, R. Šomplák, i P. Popela, „Heuristics for Waste Collection Arc Routing Problem”, *mendel*, t. 25, nr 1, s. 15–22, 2019, doi: 10.13164/mendel.2019.1.015.
- [127] I. Jacyna-Gołda, M. Izdebski, i A. Podvieszko, „Assessment of efficiency of assignment of vehicles to tasks in supply chains: a case study of a municipal company”, *Transport*, t. 32, nr 3, s. 243–251, 2017, doi: 10.3846/16484142.2016.1275040.

- [128] Ł. Wojciechowski, T. Cisowski, i A. Małek, „Route optimization for city cleaning vehicle”, *Open Engineering*, t. 11, nr 1, s. 483–498, 2021, doi: 10.1515/eng-2021-0049.
- [129] P. Nowakowski, K. Szwarc, i U. Boryczka, „Combining an artificial intelligence algorithm and a novel vehicle for sustainable e-waste collection”, *The Science of the total environment*, t. 730, s. 138726, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138726.
- [130] P. Nowakowski, K. Szwarc, i U. Boryczka, „Vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand supported by artificial intelligence algorithms”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, t. 63, s. 1–22, 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.04.007.
- [131] E. Michłowicz, „Optimization of nonlinear Transport-production task of medical waste”, *Archives of Transport*, t. 24, nr 3, s. 353–366, 2012, doi: 10.2478/v10174-012-0022-4.
- [132] B. Mrówczyńska, „Route planning of separate waste collection on a small settlement”, *Transport Problems*, t. 9, nr 1, s. 61–68, 2014.
- [133] B. Mrówczyńska, „Optimal routes scheduling for municipal waste disposal garbage trucks using evolutionary algorithm and artificial immune system”, *Transport Problems*, t. 6, s. 5–12, 2011.
- [134] A. Korcyl, R. Książek, i K. Gdowska, „A milp model for route optimization problem in a municipal multi-landfill waste collection system”, zaprezentowano na 13th International Conference on Industrial Logistics, ICIL 2016 - Conference Proceedings, 2016, s. 109–118. [Online]. Dostępne na: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84999289182&partnerID=40&md5=c7ff96c648cda45cedf384089b7e3e9a>
- [135] M. Jakubiak, „The Improvement in Collection of Municipal Waste on the Example of a Chosen Municipality”, zaprezentowano na Transportation Research Procedia, 2016, s. 122–129. doi: 10.1016/j.trpro.2016.11.013.
- [136] R. Książek, K. Gdowska, i A. Korcyl, „Recyclables collection route balancing problem with heterogeneous fleet”, *Energies*, t. 14, nr 21, 2021, doi: 10.3390/en14217406.
- [137] M. Izdebski i M. Jacyna, „The organization of municipal waste collection: The decision model”, *Rocznik Ochrona Srodowiska*, t. 20, s. 919–933, 2018.
- [138] P. Nowakowski i A. Król, „The influence of preliminary processing of end-of-life tires on transportation cost and vehicle exhausts emissions”, *Environmental Science and Pollution Research*, sty. 2020, doi: 10.1007/s11356-019-07421-y.
- [139] P. Nowakowski, K. Szwarc, i U. Boryczka, „Combining an artificial intelligence algorithm and a novel vehicle for sustainable e-waste collection”, *Science of The Total Environment*, s. 138726, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138726>.
- [140] P. Nowakowski i B. Mrówczyńska, „Towards sustainable WEEE collection and transportation methods in circular economy - Comparative study for rural and urban settlements”, *Resources, Conservation and Recycling*, t. 135, s. 93–107, sie. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.12.016.
- [141] P. Nowakowski i M. Wala, „Problemy transportu w zbiorce selektywnej odpadów po wprowadzeniu znowelizowanej ustawy o odpadach w Polsce - na przykładzie gminy wiejskiej”, *International Scientific Conference*, s. 821–830, 2016.
- [142] P. Nowakowski i M. Wala, „Charakterystyka zbiórki zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego na przykładzie zbiórki mobilnej w Wodzisławiu Śląskim”, *International Scientific Conference*, s. 800–808, 2017.
- [143] M. Wala i P. Nowakowski, „A method and application to identify reasons for decreasing vehicles' driving speed in cities”, *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*, nr 98, s. 181–190, 2018.
- [144] P. Nowakowski, K. Szwarc, i M. Wala, „Supporting collection and transportation of bulky waste using artificial intelligence algorithms”, *Aleksander Stadkowski, Maria Cieśla, Piotr Czech, Tomasz Haniszewski, Michał Juzek, Paweł Marzec, Grzegorz Peruń, Grzegorz Wojnar, redaktorzy, Transport problems*, s. 27.06-29.06, 2018.
- [145] M. Wala i P. Nowakowski, „Investigating the economic efficiency of waste collection and transportation—case study for urban and rural municipalities in Poland”, *Transport Problems*, t. 15, nr 2, s. 93–105, 2020.

- [146] P. Nowakowski i M. Wala, „Chapter 23 - Challenges and innovations of transportation and collection of waste”, w *Urban Ecology*, P. Verma, P. Singh, R. Singh, i A. S. Raghubanshi, Red., Elsevier, 2020, s. 457–478. doi: 10.1016/B978-0-12-820730-7.00023-9.
- [147] M. Wala i P. Nowakowski, *Studium porównawcze sposobów zbierania i transportu odpadów biodegradowalnych w województwie śląskim w Polsce (Comparative study of collection and transportation modes of bio-degradable waste - case study for the Silesian region in Poland)*. 2020.
- [148] P. Nowakowski, K. Szwarc, i M. Wala, „Chapter 24 - Investigation of the sustainable waste transportation in urban and rural municipalities—Key environmental parameters of the collection vehicles use”, w *Circular Economy and Sustainability*, A. Stefanakis i I. Nikolaou, Red., Elsevier, 2022, s. 457–487. doi: 10.1016/B978-0-12-819817-9.00026-0.
- [149] P. Nowakowski i M. Wala, „The evaluation of energy consumption in transportation and processing of municipal waste for recovery in a waste-to-energy plant: a case study of Poland”, *Environmental Science and Pollution Research*, t. 30, nr 4, s. 8809–8821, 2023, doi: 10.1007/s11356-022-21220-y.
- [150] P. Nowakowski i M. Wala, „Investigating electric garbage trucks use for waste collection for urban and rural communities”, *Conference Proceedings IX-th International Conference on Sustainable Solid Waste Management Corfu*, 2023.
- [151] „Efektywne gospodarowanie zasobami a gospodarka o obiegu zamkniętym | Noty tematyczne o Unii Europejskiej | Parlament Europejski”, 31 sierpień 2022. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pl/sheet/76/efektywne-gospodarowanie-zasobami-a-gospodarka-o-obiegu-zamknietym> (dostęp 1 luty 2023).
- [152] M. Wala i P. Nowakowski, „Investigating the economic efficiency of waste collection and transportation—case study for urban and rural municipalities in Poland”, *Transport Problems*, t. 15, nr 2, Art. nr 2, 2020.
- [153] „Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy.” Dz.U. L 312 z 22.11.2008, s. 3.
- [154] A. Fayyazbakhsh i in., „Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies”, *Journal of Cleaner Production*, t. 376, s. 134260, lis. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134260.
- [155] T. Jeyaseelan, P. Ekambaram, J. Subramanian, i T. Shamim, „A comprehensive review on the current trends, challenges and future prospects for sustainable mobility”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 157, s. 112073, kwi. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112073.
- [156] P. Nowakowski, *Logistyka recyklingu zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Od projektowania po przetwarzanie - Monografia*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, 2015.
- [157] M. S. Arioli, M. de A. D’Agosto, F. G. Amaral, i H. B. B. Cybis, „The evolution of city-scale GHG emissions inventory methods: A systematic review”, *Environmental Impact Assessment Review*, t. 80, s. 106316, sty. 2020, doi: 10.1016/j.eiar.2019.106316.
- [158] T. M. Bachmann, „Considering environmental costs of greenhouse gas emissions for setting a CO2 tax: A review”, *Science of The Total Environment*, t. 720, s. 137524, cze. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137524.
- [159] R. Haakman, I. Beenakker, i H. Geerlings, „Reducing vehicle-related NOx and PM emissions in metropolitan areas: A comparison between the Randstad and the Rhine-Ruhr area”, *Journal of Cleaner Production*, t. 247, s. 119175, luty 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119175.
- [160] Y. Jiang i in., „Understanding elevated real-world NOx emissions: Heavy-duty diesel engine certification testing versus in-use vehicle testing”, *Fuel*, t. 307, s. 121771, sty. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121771.
- [161] P. Lyu, P. (Slade) Wang, Y. Liu, i Y. Wang, „Review of the studies on emission evaluation approaches for operating vehicles”, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, t. 8, nr 4, s. 493–509, sie. 2021, doi: 10.1016/j.jtte.2021.07.004.
- [162] M. Keller i P. Wüthrich, „Handbook emission factors for road transport 3.1 / 3.2 Quick reference”. INFRAS - Forschung und Beratung, Bern, 2014.

- [163] N. Deo, *Teoria grafów i jej zastosowania w technice i informatyce*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1980. [Online]. Dostępne na: <http://books.google.pl/books?id=ZpiJtgAACAAJ>
- [164] P. Toth i D. Vigo, *Vehicle routing: problems, methods, and applications*, t. 18. Siam, 2014.
- [165] T. Ambroziak i R. Jachimowski, „Wybrane aspekty zagadnienia okien czasowych w problemie trasowania pojazdów”, *Automatyka*, t. T 15, nr Z 2, s. 51–59, 2011.
- [166] E. Michłowicz, „Problem komiwojażera dla kilku centrów dystrybucji”, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, t. z. 70, s. 113–125, 2009.
- [167] F. Glover, „Future paths for integer programming and links to artificial intelligence”, *Computers & Operations Research*, t. 13, nr 5, s. 533–549, 1986, doi: 10.1016/0305-0548(86)90048-1.
- [168] A. Debudaj-Grabysz, S. Deorowicz, i J. Widuch, *Algorytmy i struktury danych: wybór zawaansowanych metod*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012.
- [169] M. Dorigo, „Ant Colony Optimization—new optimization techniques in engineering”, by *Onwubolu, GC, and BV Babu, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, s. 101–117, 1991.
- [170] M. Dorigo i K. Socha, „An introduction to ant colony optimization”, w *Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics, Second Edition*, Chapman and Hall/CRC, 2018, s. 395–408.
- [171] P. Nowakowski, K. Szwarc, i M. Wala, „Investigation of the sustainable waste transportation in urban and rural municipalities-Key environmental parameters of the collection vehicles use”, w *Circular Economy and Sustainability: Volume 1: Management and Policy*, 2021, s. 457–487. doi: 10.1016/B978-0-12-819817-9.00026-0.
- [172] „Miasto w liczbach - Wodzisław Śląski”, [wodzislaw-slaski.pl. https://wodzislaw-slaski.pl/miasto-w-liczbach](https://wodzislaw-slaski.pl/miasto-w-liczbach) (dostęp 1 luty 2023).
- [173] „Jastrzębie-Zdroj w liczbach”, 11 stycznia 2023. https://www.jastrzebie.pl/strefa-mieszkanca/aktualnosci/aktualnosc/jastrzebie-zdroj-w-liczbach?sword_list%5B0%5D=liczba&sword_list%5B1%5D=ludno%C5%9Bci&no_cache=1 (dostęp 1 luty 2023).
- [174] „Gmina w liczbach”, *Urząd Gminy Pawłowice*. <https://www.pawlowice.pl/mieszkaniec/gmina/gmina-w-liczbach/> (dostęp 1 luty 2023).
- [175] A. Syberfeldt, J. Rogström, i A. Geertsen, „Simulation-based optimization of a real-world travelling salesman problem using an evolutionary algorithm with a repair function”, *International Journal of Artificial Intelligence and Expert Systems*, t. 6, nr 3, s. 27–39, 2015.
- [176] „Archiwum cen paliw”, *Grupa LOTOS S.A.* https://www.lotos.pl/145/type,oil_eurodiesel/dla_biznesu/hurtowe_ceny_paliw/archiwum_cen_paliw (dostęp 23 luty 2023).

Spis rysunków

- 1.1. Zmiany wartości produktu krajowego brutto w skali globalnej w latach 1990-2020
- 1.2. Porównanie ilości wytworzonych odpadów komunalnych na mieszkańca w roku 1995 oraz 2020
- 1.3. Masa wytwarzanych odpadów komunalnych [kg] na mieszkańca w Polsce
- 1.4. Modele gospodarki: a) model gospodarki o obiegu zamkniętym, b) model gospodarki liniowej
- 2.1. Etapy systemu gospodarowania odpadami
- 2.2. Emisje w transporcie w UE
- 4.1. Systemy gromadzenia odpadów w zależności od typu zabudowy: a) system niewymienny w zabudowie zwartej wielorodzinnej, b) system wymienny w zabudowie jednorodzinnej
- 4.2. Etapy zbiórki odpadów zmieszanych na terenie zabudowy wielorodzinnej zwartej w gminie miejskiej
- 4.3. Etapy zbiórki odpadów segregowanych na terenie zabudowy wielorodzinnej zwartej w gminie miejskiej
- 4.4. Etapy zbiórki odpadów zmieszanych na terenie zabudowy jednorodzinnej w gminie wiejskiej
- 4.5. Etapy zbiórki odpadów segregowanych na terenie zabudowy jednorodzinnej w gminie wiejskiej
- 5.1. Schemat realizacji części badawczej w dysertacji
- 5.2. Schemat algorytmu przeszukiwania tabu
- 5.3. Schemat funkcjonalny obsługi systemu informatycznego SZO
- 6.1. Obszar realizacji tras na terenie gmin województwa śląskiego.
- 6.2. Mapka Wodzisławia Śląskiego z zaznaczoną strefą centrum oraz siecią dróg
- 6.3. Mapka Jastrzębia-Zdroju z zaznaczoną strefą centrum oraz siecią dróg
- 6.4. Mapka Gminy Pawłowice z siecią dróg
- 6.5. Sposoby gromadzenia różnych kategorii odpadów
- 6.6. Pojazdy wykorzystywane do zbiórki odpadów [Opracowanie własne]: a) pojazd specjalistyczny typu smieciarka; b) pojazd za zabudową skrzyniową c) pojazd ciężarowy z (HDS)
- 6.7. Wizualizacja trasy przejazdu pojazdu zbierającego odpady na terenie zabudowy jednorodzinnej wiejskiej.
- 6.8. Zrzut ekranu z systemu zarządzania flotą przy zbiórce odpadów
- 6.9. Długości wykonywanych tras (a) i czas realizacji (b) dla próby reprezentatywnej zbiórek odpadów
- 6.10. Mierniki masy zebranych odpadów na jednostkę odległości (a) i czasu (b) dla próby reprezentatywnej zbiórek odpadów
- 6.11. Zależność długości tras zbiórki dla liczby punktów odbioru dla próby reprezentatywnej zbiórki odpadów wielkogabarytowych na żądanie
- 6.12. Zależność czasu realizacji tras zbiórki dla liczby punktów odbioru dla próby reprezentatywnej zbiórki odpadów wielkogabarytowych na żądanie
- 6.13. Zależność miernika masy zebranych odpadów na jednostkę czasu dla liczby punktów odbioru dla próby reprezentatywnej zbiórki odpadów wielkogabarytowych na żądanie
- 6.14. Zależność miernika zebranych odpadów na jednostkę odległości dla liczby punktów odbioru dla próby reprezentatywnej zbiórki odpadów wielkogabarytowych na żądanie
- 6.15. Wizualizacja trasy przejazdu pojazdu zbierającego odpady na terenie zabudowy wielorodzinnej miejskiej dla trasy nr 2
- 6.16. Wizualizacja trasy przejazdu pojazdu zbierającego odpady na terenie zabudowy wielorodzinnej miejskiej dla trasy nr 3
- 6.17. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 1: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.18. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 2: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.19. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 3: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.20. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 4: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.21. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 5: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy

- 6.22 Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 6: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.23. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 7: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.24. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 8: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.25. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 9: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.26. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 10: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.27. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 11: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.28. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 12: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.29. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 13: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.30. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 14: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.31. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 15: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.32. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 16: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.33. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 17: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.34. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr. 18: a) czasu realizacji trasy, b) długości trasy
- 6.35. Wizualizacja tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych: a) realizacja trasy wg listy
b) realizacja trasy wg zoptymalizowanego planu trasy
- 6.36. Wizualizacja tras zbiórki tworzyw sztucznych: a) realizacja trasy wg listy, b) realizacja trasy
wg zoptymalizowanego planu trasy
- 6.37 Wyniki skrócenia czasu realizacji tras (a) oraz długości tras (b) po optymalizacji dla zbiórki
odpadów z tworzyw sztucznych
- 6.38. Wyniki skrócenia czasu realizacji tras (a) oraz długości tras (b) po optymalizacji dla zbiórki
odpadów wielkogabarytowych
- 6.39. Porównanie parametrów realizacji trasy nr 1: a) czasu realizacji tras; b) długości trasy
- 6.40. Porównanie parametrów realizacji trasy nr 2: a) czasu realizacji tras; b) długości trasy
- 6.41. Porównanie parametrów realizacji trasy nr 3: a) czasu realizacji tras; b) długości trasy
- 6.42. Porównanie parametrów realizacji trasy nr 5: a) czasu realizacji tras; b) długości trasy
- 6.43. Koszty oleju napędowego w latach 2019 - 2022
- 6.44. Koszty odbioru i transportu odpadów [zł/godz.] w latach 2019 - 2022: pojazd ciężarowy
z HDS
- 6.45. Koszty odbioru i transportu odpadów [zł/godz.] w latach 2019 - 2022 : pojazd z zabudową
skrzyniową
- 6.46. Porównanie średnich wartości wskaźnika efektywności ekonomicznej zbiórki W_e
zrealizowanych tras zbiórki odpadów segregowanych
- 6.47. Porównanie średnich wartości wskaźnika efektywności ekonomicznej zbiórki W_e
zrealizowanych tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych
- 6.48. Porównanie średnich wartości miernika masy zebranych odpadów M_{mo}^s zrealizowanych tras
zbiórki odpadów segregowanych
- 6.49. Porównanie średnich wartości miernika masy zebranych odpadów $[M_{mo}^s]$ zrealizowanych
tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych
- 6.50. Porównanie średnich wartości miernika emisji CO_2 $[M_{CO_2}^s]$ zrealizowanych tras zbiórki
odpadów segregowanych
- 6.51. Porównanie średnich wartości miernika emisji CO_2 $[M_{CO_2}^s]$ zrealizowanych tras zbiórki
odpadów wielkogabarytowych
- 6.52. Porównanie średnich wartości miernika emisji NO_x $[M_{NO_x}^s]$ zrealizowanych tras zbiórki
odpadów segregowanych
- 6.53. Porównanie średnich wartości miernika emisji NO_2 $[M_{NO_x}^s]$ zrealizowanych tras zbiórki
odpadów wielkogabarytowych
- 6.54. Porównanie średnich wartości miernika emisji PM $[M_{PM}^s]$ zrealizowanych tras zbiórki
odpadów segregowanych
- 6.55. Porównanie średnich wartości miernika emisji PM $[M_{PM}^s]$ zrealizowanych tras zbiórki
odpadów wielkogabarytowych

Spis tablic

- 2.1. Europejskie normy emisji (Euro 5 i Euro 6) dla lekkich samochodów dostawczych
- 2.2. Europejskie normy emisji dla silników wysokoprężnych pojazdów o dużej ładowności
- 2.3. Poziom dźwięku emitowany przez różne środki transport
- 2.4. Zestawienie artykułów, w których zastosowano algorytmy heurystyczne
- 2.5. Zestawienie artykułów z literatury polskiej związanych z optymalizacją tras pojazdów przy zbiórce odpadów komunalnych
- 2.6. Wykaz zrealizowanych badań własnych i publikacji
- 2.7. Zestawienie wyników przeglądu systemów zarządzania w firmach odbierających odpady
- 4.1. Parametry systemu gospodarki odpadami
- 6.1. Sposób gromadzenia odpadów w gospodarstwach domowych.
- 6.2. Częstotliwość zbiórek odpadów w badanych gminach
- 6.3. Specyfikacja pojazdów przeznaczonych do zbiórki odpadów
- 6.4. Charakterystyka tras wybranych do optymalizacji
- 6.5. Zestawienie wyznaczonych statystyk dla tras zbiórki odpadów tworzyw sztucznych
- 6.6. Zestawienie wyznaczonych statystyk dla tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych
- 6.7. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 1
- 6.8. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 2
- 6.9. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 3
- 6.10. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 4
- 6.11. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 5
- 6.12. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 6
- 6.13. Zestawienie parametrów realizacji trasy nr 7
- 6.14. Zestawienie parametrów realizacji tras zbiórki odpadów wielkogabarytowych oznaczonych numerami od 8 do 18
- 6.15. Zestawienie czasu realizacji tras nr. 1 - 7 – zbiórka odpadów tworzyw sztucznych
- 6.16. Zestawienie czasu realizacji tras nr. 8 – 18 – zbiórka odpadów wielkogabarytowych
- 6.17. Zestawienie długości tras o nr od 1 do 7
- 6.18. Zestawienie długości tras o nr. od 8 do 18
- 6.19. Plan realizacji trasy uzyskany po optymalizacji trasy z wykorzystaniem algorytmu mrówkowego
- 6.20. Zestawienie parametrów realizacji tras wg zoptymalizowanego planu trasy
- 6.21. Zmiany cen surowców w latach 2019-2022
- 6.22. Zestawienie wskaźników efektywności ekonomicznej zbiórek dla poszczególnych tras
- 6.23. Zestawienie wyliczonych wartości miernika masy zebranych odpadów
- 6.24. Zestawienie wyliczonych wartości miernika emisji CO₂
- 6.25. Zestawienie wyliczonych wartości miernika emisji NO_x
- 6.26. Zestawienie wyliczonych wartości miernika emisji PM