

PRACE NAUKOWE

Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu

RESEARCH PAPERS

of Wrocław University of Economics

Nr 446

Metody i zastosowania badań operacyjnych



Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu
Wrocław 2016

Redakcja wydawnicza: Joanna Świrska-Korlub

Redakcja techniczna: Barbara Łopusiewicz

Korekta: Barbara Cibis

Łamanie: Małgorzata Myszkowska

Projekt okładki: Beata Dębska

Informacje o naborze artykułów i zasadach recenzowania
znajdują się na stronach internetowych

www.pracnaukowe.ue.wroc.pl

www.wydawnictwo.ue.wroc.pl

Publikacja udostępniona na licencji Creative Commons

Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 3.0 Polska
(CC BY-NC-ND 3.0 PL)



© Copyright by Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
Wrocław 2016

ISSN 1899-3192
e-ISSN 2392-0041

ISBN 978-83-7695-610-7

Wersja pierwotna: publikacja drukowana
Zamówienia na opublikowane prace należy składać na adres:
Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu
ul. Komandorska 118/120, 53-345 Wrocław
tel./fax 71 36 80 602; e-mail: econbook@ue.wroc.pl
www.ksiegarnia.ue.wroc.pl

Druk i oprawa: TOTEM

Wstęp

Wstęp	7
Krzysztof Echaust: Modelowanie wartości ekstremalnych stóp zwrotu na podstawie danych śróddziennych / Modeling of extreme returns on the basis of intraday data	9
Helena Gaspars-Wieloch, Ewa Michalska: On two applications of the Omega ratio: $\max\Omega_{\min}$ and $\Omega(H+B)$ / O dwóch zastosowaniach wskaźnika Omega: $\max\Omega_{\min}$ i $\Omega(H+B)$	21
Agata Gluzicka: Zastosowanie modelu MAD z dodatkowymi warunkami ograniczającymi / Application of the MAD model with additional constraints	37
Dorota Górecka, Małgorzata Szalucka: Foreign market entry mode decision – approach based on stochastic dominance rules versus multi-actor multi-criteria analysis / Wybór sposobu wejścia na rynek zagraniczny – podejście oparte na dominacjach stochastycznych a wieloaktorska analiza wielokryterialna	47
Paweł Hanczar, Dagmara Pisiewicz: Logistyka odzysku – optymalizacja przepływów w systemie gospodarki komunalnej / Reverse logistics – optimization of flows in the system of waste management	70
Michał Jakubiak, Paweł Hanczar: Optymalizacja tras zbiórki odpadów komunalnych na przykładzie MPO Kraków / Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes on the example of MPO Cracow	83
Michał Kameduła: Zastosowanie koewolucyjnego algorytmu genetycznego w rozwiązaniu zadania trójkryterialnego / Application of co-evolutionary genetic algorithm for a three-criterion problem.....	93
Donata Kopańska-Bródka, Renata Dudzińska-Baryła, Ewa Michalska: Zastosowanie funkcji omega w ocenie efektywności portfeli dwuskładnikowych / Two-asset portfolio performance based on the omega function .	106
Marek Kośny, Piotr Peternek: Zagadnienie sposobu definiowania preferencji na przykładzie przydziału uczniów do oddziałów klasowych / Definition of preferences in the context of pupils' allocation to classes	115
Wojciech Młynarski, Artur Prędki: Ocena efektywności technicznej i finansowej wybranych nadleśnictw Lasów Państwowych za pomocą metody DEA / Technical and financial efficiency evaluation for selected forestry managements of the State Forests National Forest Holding – the DEA approach.....	126

Piotr Namieciński: Alternatywna metoda określania preferencji decydenta w zagadnieniach wielokryterialnych / Alternative methods of decision-maker preferences identification in multicriteria issues	144
Marek Nowiński: Testowanie nieliniowych algorytmów optymalizacyjnych – zestaw funkcji typu <i>benchmark</i> / Testing nonlinear optimization algorithms – set of benchmark type functions	159
Agnieszka Przybylska-Mazur: Wybrana metoda analizy długoterminowej stabilności finansów publicznych / The selected method of analysis of the long-term sustainability of public finance	173
Ewa Roszkowska, Tomasz Wachowicz, Robert Jankowski: Analiza porozumienia końcowego w negocjacjach elektronicznych w kontekście zgodności systemu oceny ofert negocjatora z informacją preferencyjną/ Analyzing the negotiation agreements in a context of concordance of negotiation offer scoring systems with negotiators' preferential information	187
Aleksandra Sabo-Zielonka, Grzegorz Tarczyński: Adaptacja heurystyki <i>s-shape</i> na potrzeby wyznaczenia trasy przejścia w niestandardowym układzie strefy kompletacji zamówień / Adaptation of the s-shape heuristic for the custom layout of the order-picking zone	207
Jakub Staniak: Inicjalizacja ukrytych modeli Markowa z wykorzystaniem analizy skupień / Initialization of hidden Markov models by means of clustering analysis.....	224
Paulina Szterlik: Lokalizacja magazynu centralnego z zastosowaniem metod wielokryterialnych / Location of central warehouse using quantitative research	237
Grzegorz Tarczyński: Porównanie efektywności kompletacji łączonych zleceń z kompletacją niezależną / An attempt of comparison of order batching with independent order-picking	250

Wstęp

Kolejna, XXXIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa im. Profesora Władysława Bukietyńskiego, organizowana corocznie przez najważniejsze ośrodki naukowe zajmujące się dziedziną badań operacyjnych, w roku 2015 odbyła się w pięknym, zabytkowym i świeżo odremontowanym zespole pałacowo-parkowym w Łagowie koło Zgorzelca. Konferencję zrealizowaną pod nazwą *Metody i Zastosowania Badań Operacyjnych* przygotowała Katedra Badań Operacyjnych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu pod kierownictwem dr. hab. Marka Nowińskiego, prof. UE.

Konferencje te mają już długoletnią tradycję – są to coroczne spotkania pracowników nauki specjalizujących się w badaniach operacyjnych. Głównym celem konferencji było, podobnie jak w latach ubiegłych, stworzenie (przede wszystkim dla młodych teoretyków, a także praktyków dyscypliny) forum wymiany myśli na temat najnowszych osiągnięć dotyczących metod ilościowych wykorzystywanych do wspomagania procesów podejmowania decyzji, a także prezentacja nowoczesnych zastosowań badań operacyjnych w różnych dziedzinach gospodarki. Ten cenny dorobek naukowy nie może być zapomniany i jest publikowany po konferencji w postaci przygotowywanego przez organizatorów zeszytu naukowego zawierającego najlepsze referaty na niej zaprezentowane.

W pracach Komitetu Naukowego Konferencji uczestniczyli czołowi przedstawiciele środowisk naukowych z dziedziny badań operacyjnych w Polsce; byli to: prof. Jan B. Gajda (Uniwersytet Łódzki), prof. Stefan Grzesiak (Uniwersytet Szczeciński), prof. Bogumił Kamiński (SGH w Warszawie), prof. Ewa Konarzewska-Gubała (Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu), prof. Donata Kopańska-Bródka, prof. Maciej Nowak i prof. Tadeusz Trzaskalik (Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach), prof. Dorota Kuchta (Politechnika Wrocławska), prof. Krzysztof Piasecki (Uniwersytet w Poznaniu) i prof. Józef Stawicki (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu).

Zakres tematyczny konferencji obejmował teoretyczne i praktyczne zagadnienia dotyczące przede wszystkim:

- modelowania i optymalizacji procesów gospodarczych,
- metod wspomagających proces negocjacji,
- metod oceny efektywności i ryzyka na rynku kapitałowym i ubezpieczeniowym,
- metod ilościowych w transporcie i zarządzaniu zapasami,
- metod wielokryterialnych,
- optymalizacji w zarządzaniu projektami oraz analizy ryzyka decyzyjnego.

W konferencji wzięło udział 43 przedstawiciele różnych środowisk naukowych, licznie reprezentujących krajowe ośrodki akademickie. W trakcie sześciu sesji ple-

narych, w tym dwóch sesji równoległych, przedstawiono 27 referatów, których poziom naukowy w przeważającej części był bardzo wysoki. Zaprezentowane referaty, po pozytywnych recenzjach, zostają dziś opublikowane w Pracach Naukowych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu w postaci artykułów naukowych w specjalnie wydany zeszycie konferencyjnym.

Przypominając przebieg konferencji, nie można nie wspomnieć o konkursie zorganizowanym dla autorów referatów niebędących samodzielnymi pracownikami nauki. Dotyczył on prezentacji najciekawszego zastosowania badań operacyjnych w praktyce gospodarczej. Komitet Organizacyjny Konferencji powołał kapitułę konkursu, w której skład weszli: prof. Ewa Konarzewska-Gubała – przewodnicząca, prof. Jan Gajda, prof. Stefan Grzesiak i prof. Donata Kopańska-Bródka. Członkowie Komisji Konkursowej oceniali referaty ze względu na:

- innowacyjność, oryginalność metody będącej przedmiotem zastosowania,
- znaczenie zastosowania dla proponowanego obszaru,
- stopień zaawansowania implementacji metody w praktyce.

Spośród 15 referatów zgłoszonych wyróżniono: 1. miejsce: dr Michał Jakubiak i dr hab. Paweł Hanczar (Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu), *Optymalizacja tras zbiórki odpadów komunalnych na przykładzie MPO Kraków*; 2. miejsce: mgr Dagmara Piesiewicz i dr hab. Paweł Hanczar (Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu), *Logistyka odzysku – optymalizacja przepływów w systemie gospodarki komunalnej*; 3. miejsce: dr Dorota Górecka i dr Małgorzata Szałucka (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu), *Wybór sposobu wejścia na rynek zagraniczny – wieloaktorska analiza wielokryterialna a podejście oparte na dominacjach stochastycznych*.

Przy okazji prezentowania opracowania poświęconego XXXIV Konferencji *Metody i Zastosowania Badań Operacyjnych* i jej bardzo wartościowego dorobku nie możemy nie podziękować członkom Komitetu Organizacyjnego Konferencji, w którego skład wchodził młodzi, acz doświadczeni pracownicy Katedry Badań Operacyjnych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu: dr Piotr Peternek (sekretarz), dr hab. Marek Kośny, dr Grzegorz Tarczyński oraz mgr Monika Stańczyk (biuro konferencji). Zapewnili oni w sposób profesjonalny sprawne przygotowanie i przeprowadzenie całego przedsięwzięcia oraz zadbali o sprawy administracyjne związane z realizacją konferencji, a także byli odpowiedzialni za dopilnowanie procesu gromadzenia i redakcji naukowych materiałów pokonferencyjnych, które mamy okazję Państwu dziś udostępnić.

Już dzisiaj cieszymy się na nasze kolejne spotkanie w ramach jubileuszowej XXXV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej im. Profesora Władysława Bukietyńskiego, która tym razem będzie organizowana przez naszych przyjaciół z Katedry Badań Operacyjnych Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu pod kierownictwem prof. dr. hab. Krzysztofa Piaseckiego.

Marek Nowiński

Michał Jakubiak, Paweł Hanczar

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
e-mails: michal.jakubiak@ue.wroc.pl; pawel.hanczar@ue.wroc.pl

OPTIMALIZACJA TRAS ZBIÓRKI ODPADÓW KOMUNALNYCH NA PRZYKŁADZIE MPO KRAKÓW

OPTIMIZATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE COLLECTION AND TRANSPORTATION ROUTES ON THE EXAMPLE OF MPO CRACOW

DOI: 10.15611/pn.2016.446.06

JEL Classification: R41, C44

Streszczenie: Nowa ustawa dotycząca gospodarowania odpadami, która weszła w życie w 2013 roku, spowodowała duże zainteresowanie aspektami logistycznymi wspomagającymi zarządzanie i rozwój gmin. Mimo niewątpliwie wielu pozytywnych aspektów, będących wynikiem nowego ustawodawstwa, wciąż jest wiele problemów do uporządkowania. Firmy oraz gminy zaczęły liczyć koszty, które okazały się często znacznie większe, niż przypuszczano. Gospodarowanie odpadami stało się kolejnym istotnym aspektem funkcjonowania gmin. Autorzy poddali analizie funkcjonowanie Miejskiego Przedsiębiorstwa Oczyszczania w Krakowie pod kątem układania i realizacji tras zbiórki odpadów komunalnych. MPO Kraków, będące organizacją zarządzającą systemem oczyszczania Krakowa, jest odpowiedzialne za ekonomiczną realizację usług zbiórki odpadów przy jednoczesnym zapewnieniu ich jakości. Autorzy na przykładzie dwóch wybranych tras zbiórki odpadów porównali warianty planistyczne przedstawione przez przedstawicieli firmy wraz ich z rzeczywistą realizacją. Podjęta została również próba określenia potencjału optymalizacyjnego oraz wskazanie korzyści wynikających z optymalizacji tras zbiórki odpadów komunalnych.

Słowa kluczowe: gospodarka odpadami, logistyka zwrotna, optymalizacja tras.

Summary: The new waste management law, which entered into force in 2013, caused great interest in supporting logistical aspects of managing and developing communities. Although undoubtedly many positive issues that we observe as a result of new legislation, there are still many problems to organize. Companies and communes started to calculate costs which turned out to be much higher than it had been expected. The authors analyzed the functioning of the Cracow Municipal Waste Disposal in terms of arrangement and implementation of municipal waste collection routes. MPO Krakow is an organization which manages the system for the treatment of Cracow, is responsible for the economic implementation of waste collection services while ensuring quality processes. The authors on the example of two selected routes of municipal waste collection, compare planning options presented by the representatives of the

company with the real execution. The authors made an attempt to determine the optimization potential and an indication of the benefits of optimization municipal waste collection routes.

Keywords: waste management, reverse logistics, route optimization.

1. Wstęp

Od zarania dziejów wszędzie tam, gdzie przebywa oraz osiedla się człowiek, pojawiają się odpady. Początkowo w dość małych skupiskach ludzkich nie stanowiły one problemu, były wręcz naturalną częścią życia każdego społeczeństwa. Jednakże wraz z rozwojem gospodarczym oraz wzrostem liczebności ludzi odpady zaczęły się być dla człowieka dużym problemem. Tradycyjne i zawsze towarzyszące człowiekowi odpady organiczne, poszerzone zostały o wiele nowych grup odpadów, takich jak szkło, metale, tworzywa sztuczne, chemia, sprzęt elektroniczny i wiele innych. Dobra konsumpcyjne, które stały się ogólnodostępne na co dzień, są coraz bardziej różnorodne i opakowane. Ludzie więcej kupują, co równoznaczne jest z tym, iż więcej wyrzucają. Wzrasta również świadomość ekologiczna społeczeństwa, która odsłoniła skalę zagrożenia, jakie wiąże się z źle przeprowadzoną zbiórką odpadów oraz z niewłaściwym ich gospodarowaniem.

Według ustawy o odpadach (Ustawa z 14 grudnia 2012 r. o odpadach, Dz.U. 2013 nr 0, poz. 21), odpad to „każda substancja lub przedmiot, których posiadacz zamierza się pozbyć, pozbywa się lub jest zobowiązany do ich pozbycia się”. Innymi słowy, odpady to wszystkie uboczne produkty działalności człowieka (przemysłowej, gospodarczej, usługowej) nieprzydatne w miejscu i czasie, w którym powstały, szkodliwe lub uciążliwe dla środowiska, mogące prowadzić do jego degradacji. W przemysłowych procesach realizacji powstają nie tylko te produkty, które są pożądane (np. produkty gotowe), ale również te, których nie chcemy. Ale czy to oznacza, że dobra te są całkowicie nieprzydatne? Coś, co dla jednych jest odpadem, dla innych – w innym miejscu lub w innym czasie – może być przydatnym surowcem, półproduktem lub nawet produktem. W wyniku kurczących się zasobów naturalnych Ziemi coraz większej produkcji oraz wzrostu kosztów energii odpady zaczęły odgrywać coraz większą rolę w tworzeniu wartości łańcuchów dostaw.

2. Wykorzystanie logistyki w aspektach ekologicznych – przegląd pojęć

W procesach gospodarowania odpadami uczestniczy podsystem logistyki wtórnej. Obejmuje on procesy transportu, składowania i przeładunki odpadów, a także procesy ich utylizacji. W literaturze przedmiotu spotyka się dwa pojęcia logistyki wtórnej:

- *reverse logistics*, tłumaczone jako: logistyka zwrotna, odzysku, utylizacji, recykulacji,
- *green logistics*, tłumaczone jako ekologiczność [Michniewska 2006, s. 29-30].

Mimo coraz większego znaczenia, jakiego nabiera koncepcja logistyki wtórnej, pojęcie to nie zostało do tej pory jednoznacznie zdefiniowane. Wielu autorów [Fleischmann 2003; Mason 2002; Kivinen 2002] uważa, że ze względu na szeroki obszar zastosowań koncepcji logistycznych wykorzystywanych w tematyce ekologicznej trudno będzie dojść do konsensusu przy definiowaniu tego terminu. Żeby przedstawić różne podejścia do zagadnień logistyki, warto przeanalizować kilka publikacji.

Jedną z pierwszych, oficjalnie wprowadzającą i definiującą pojęcie logistyki odzysku (*reverse logistics*), jest tak zwana Biała księga opublikowana przez Council of Logistics Management. Termin ten używany jest w „odniesieniu do roli logistyki w recyklingu i usuwaniu odpadów oraz zarządzaniu materiałami niebezpiecznymi. W szerszej perspektywie obejmuje wszystkie kwestie dotyczące działań logistycznych realizowanych w celu zmniejszenia i ponownego wykorzystania materiałów, recyklingu i zastępowania surowców materiałami z odzysku” [Stock 1992]. Definicja zwraca uwagę na rolę kreowania wartości dodanej z odzysku dzięki możliwości ponownego użycia materiałów oraz gospodarowania odpadami w celu zmniejszenia ich uciążliwości dla otoczenia.

Pohlen i Farris zwracają uwagę na rolę logistyki przy „skoordynowanym ruchu produktów od klientów do producenta przy użyciu kanałów dystrybucji” [Pohlen, Farris 1992, s. 35-37]. Autorzy kładą nacisk na dość powszechną ideę, w której logistyka odpowiada za „proces planowania, organizowania i kontrolowania efektywnego ekonomicznie przepływu materiałów (surowców, półproduktów i produktów gotowych) wraz z powiązаныmi z tymi przepływami informacjami od miejsca konsumpcji do miejsc pochodzenia w celu odzyskania wartości bądź właściwego zagospodarowania [Dale, Rogers, Tibben-Lembke 1998]. Ph. Schary i T. Skjott-Larsen reprezentują koncepcję, w której „odwrócona logistyka stanowi osobne zadanie w łańcuchu podaży, któremu należy tworzyć własne środowisko – łańcuchy odpadów” [Schary, Skjott-Larsen 2002, s. 116]. Mimo osobnego środowiska funkcjonowania logistyka zbiórki odpadów jest ściśle powiązana z tradycyjnym ujęciem łańcucha dostaw i uczestniczy w kreowaniu wartości produktów końcowych. Michniewska zwraca uwagę, iż szczególnie w Polsce pojęcie *reverse logistics* jest stosunkowo mało rozpoznane. Pojawiają się również problemy z polskim tłumaczeniem. Tak często używana nazwa „logistyka zwrotna” ma dla wielu autorów pejoratywny wydźwięk i kojarzy się z efektem niepożądanym, odwrotnym do zamierzonego, którym jest dostarczenie produktu. Według autorki pojęcia „zwrot,” „użyłacja,” „recyrkulacja” nie uosabiają pozytywnego aspektu tej koncepcji logistyki, której głównym celem jest „działanie w celu „odzyskania” wartości tkwiącej w danym produkcie bądź opakowaniu, także wartości w postaci zadowolenia klienta” [Michniewska 2006, s. 29-30].

Drugim często spotykanym określeniem dotyczącym wykorzystania logistyki w problemach ekologicznych są angielskie terminy *green logistics*, *ecologicalistics*, w polskim tłumaczeniu oznaczające ekologicystykę kładącą nacisk głównie na niwelowanie negatywnego wpływu odpadów na środowisko naturalne i poszukiwanie

optymalnych rozwiązań logistycznych w tym względzie [Słowiński 2008, s. 115]. Za takie działania możemy uznać projektowanie opakowań minimalizujących użyte surowce, wykorzystanie rozwiązań transportowych redukujących zanieczyszczenie, recykling opakowań. W tym znaczeniu ekologistyka ma charakter bardziej zapobiegawczy. Logistyka odzysku skierowana jest już w większym stopniu na obsługę zaistniałych zdarzeń lub/oraz niwelowanie negatywnych skutków działalności człowieka.

3. Przedstawienie problemu oraz cel badań

W Europie coraz częściej wykorzystuje się odpady do produkcji materiałów i energii, a recykling stał się nowoczesnym sposobem pozyskiwania dóbr i wykorzystywania ich do tworzenia nowych produktów. To, co udało się w wielu krajach zachodniej Europy, próbuje również wdrożyć Polska. Ustawa o odpadach, która obowiązuje od lipca 2013 roku, całkowicie przedefiniowała system gospodarki odpadami. Zobowiązuje ona do selektywnej zbiórki odpadów komunalnych i nakłada na gminy szereg nowych obowiązków, takich jak pokrywanie kosztów:

- odbierania, transportu, zbierania, odzysku i unieszkodliwiania odpadów komunalnych,
- tworzenia i utrzymania punktów selektywnego zbierania odpadów komunalnych,
- obsługi administracyjnej systemu, usług dodatkowych (m.in. rola edukacyjna).

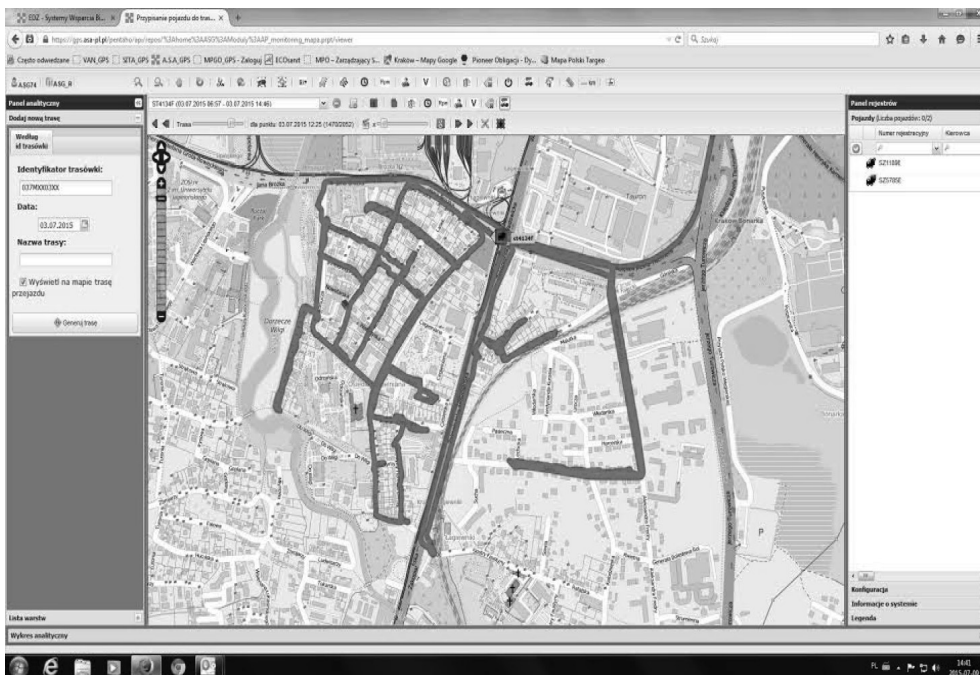
Miejskie Przedsiębiorstwo Oczyszczania w Krakowie to firma, która w branży istnieje od 1906 roku. Od roku 1993 funkcjonuje jako spółka z o.o., ze 100-procentowym udziałem gminy. Nowe ustawodawstwo wprowadzone na terenie całego kraju wymusiło na gminie Kraków przejęcie odpowiedzialności za system utrzymania czystości i porządku w granicach administracyjnych całego miasta. 11 lipca 2013 roku radni powierzyli MPO obowiązki:

- zarządzania systemem odbioru i zagospodarowania odpadów komunalnych w Krakowie,
- utrzymania czystości i porządku na drogach publicznych,
- eksploatacji instalacji przetwarzania odpadów komunalnych i punktów selektywnego zbierania odpadów komunalnych.

Chcąc wypełniać wymienione obowiązki, Miejskie Przedsiębiorstwo Oczyszczania Miasta w Krakowie w drodze przetargu wybrało trzy firmy, które odpowiedzialne są za wywóz i zbiórkę odpadów. Gmina Kraków, powierzając odpowiedzialność za system gospodarki odpadami MPO, zobowiązała spółkę do wypełniania roli kontrolnej nad gospodarką odpadami komunalnymi, w tym również nadzoru nad realizacją zadań zleconych podmiotom odbierającym odpady komunalne od właścicieli nieruchomości [Hanczar, Pisiewicz 2015, s. 204-216].

Kontrole zlecone przez MPO wykazały wiele uchybień w procesach zbiórki odpadów przeprowadzanych przez firmy wywozowe. Dotyczyły one głównie niedo-

trzymywania założonych terminów odbierania odpadów oraz braku przewidywalności i przejrzystości realizowanych tras. Mieszkańcy i zarządcy nieruchomości mają z góry podany harmonogram odbioru odpadów, stąd też jakiegokolwiek zmiany w terminach są zgłaszane jako błędy w funkcjonowaniu systemu. Zauważono również, iż trasy realizowane przez firmy wywozowe, mimo wielu mechanizmów kontrolnych, takich jak np. odczyty GPS, są trudne do weryfikacji (rys. 1). Kontrola wykazała, iż często kierowcy są w zupełnie innych miejscach, niż to wynika z harmonogramu. Brakuje również spójnego systemu planowania, który podpowiadałby, do których lokalizacji w odpowiedniej kolejności ma się udać brygada wywożąca odpady. Brak procesu planowania powoduje, że kierowca ma pełną dowolność w układaniu przejazdów, co często wywołuje nadużycia i przyczynia się do wykonywania zleceń dodatkowych, nieobjętych umową z Miejskim Przedsiębiorstwem Oczyszczania w Krakowie.



Rys. 1. Odczyt z nadajnika GPS zamontowanego na ciężarówce firmy zajmującej się wywozem odpadów

Źródło: na podstawie danych MPO Kraków.

Celem podjętej analizy było określenie potencjału optymalizacyjnego oraz wskazanie korzyści wynikających z przeprowadzenia zmian, a także wytypowanie ograniczeń, które mogą wpływać na zastosowanie narzędzi optymalizacyjnych.

4. Model decyzyjny

Autorzy za kryterium optymalizacyjne przyjęli minimalizację długości drogi, jaką pokonuje samochód odbierający odpady z miejsc gromadzenia odpadów podczas wybranych dni tygodnia.

Podstawową grupę metod rozwiązywania problemów komiwojażera (*travelling salesman problem* – TSP) stanowi aplikacja klasycznej metody *branch and bound*, która została opracowana przez Littla i innych [Little i in. 1963, s. 972-989].

Mimo że na tym etapie badań nie było konieczności uwzględniania dodatkowych ograniczeń prócz tych, które zawiera klasyczne zadanie TSP, autorzy proponowali dwa podejścia. Jedno z nich uwzględnia bardzo częste ograniczenie, jakie napotykają firmy wywożące odpady, takie jak przedziały czasowe, w których może być realizowany odbiór nieczystości.

Ze względu na przyszłe wymagania, takie jak uwzględnienie okien czasowych, pierwszy model został zaprezentowany za pomocą wzorów (1)–(6) (tab. 1). Podejście to wykorzystuje dwie grupy zmiennych decyzyjnych. Pierwsza z nich to $x(i, j)$, która przyjmuje wartość 1, jeśli krawędź i, j jest w rozwiązaniu. Druga to zmienna s_i oznacza czas przybycia do punktu i . Symbolem V oznaczono zbiór wszystkich węzłów, natomiast A to określony na nim zbiór połączeń. Dodatkowo zostały wykorzystane następujące parametry: c_{ij} – oznaczający długość połączenia i, j ; t_{ij} – oznaczający czas przejazdu między i, j ; R_j – początek okna czasowego dla punktu j ; D_j – koniec okna czasowego dla punktu j ; M_{ij} – oznaczający dowolnie dużą wartość dodatnią (przy czym w celu przyspieszenia uzyskania rozwiązania wartość ta powinna być wyznaczona jako $M_{ij} = D_i - R_j + t_{ij}$).

Tabela 1. Model optymalizacji tras

$\min \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}$		(1)
$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1$	dla każdego $i \in V$	(2)
$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1$	dla każdego $j \in V$	(3)
$s_i + t_{ij} - (1 - x_{ij})M_{ij} \leq s_j$	dla każdego $(i, j \neq 1) \in A$	(4)
$R_j \leq s_j \leq D_j$	dla każdego $j \in V$	(5)
$x_{ij} \in \{0,1\}$	dla każdego $(i, j) \in A$	(6)
$s_i \geq 0$	dla każdego $i \in V$	(7)

Źródło: opracowanie własne.

Ograniczenia (2) i (3) służą zapewnieniu, że pojazd przejedzie przez każdy punkt. Najważniejsze jest w tym sformułowaniu ograniczenie (4), które z jednej strony za-

pewnia ciągłość trasy, z drugiej ma zagwarantować spójność wartości zmiennej s_j , tj. jeśli po odwiedzeniu punktu i odwiedzany jest punkt j , to s_j musi być większe od s_i o co najmniej czas przejazdu między tymi punktami. Kolejne ograniczenie (5) zapewnia, że każdy punkt zostanie odwiedzony w zadanym oknie czasowym. Ograniczenia (6) i (7) to ograniczenia brzegowe. Powyższe sformułowanie w akceptowalnym czasie pozwalało rozwiązywać zadania dla około 30 punktów, stąd podejście to zostanie użyte wyłącznie, gdy dane lokalizacji do odwiedzenia będą zagregowane. Natomiast w przypadku większych zadań niezbędne jest zastosowanie algorytmu przybliżonego.

Drugie podejście to wykorzystanie metody 2-optymalnej. Polega ona na iteracyjnej poprawie rozwiązania dopuszczalnego. W klasycznej wersji tej metody w jednej iteracji modyfikuje się trasę poprzez wymianę dwóch krawędzi na dwie nowe. Przy tym wymiana jest akceptowana tylko wtedy, gdy prowadzi ona do skrócenia trasy. Złożoność obliczeniowa realizacji metody 2-optymalnej jest ograniczona wielomianem stopnia drugiego tj. $O(n^2)$. Algorytm ten nie umożliwia uwzględniania okien czasowych. Ponieważ ograniczenie to nie było wymagane na aktualnym etapie prac, w analizowanym przykładzie wykorzystano metodę 2-optymalną, dla której system znajduje rozwiązanie w czasie rzeczywistym (czasy rozwiązania nie przekraczały 2 sekund). Szybkość znajdowania rozwiązania zbliżonego do optymalnego na tym etapie badań miała dla decydenta (MPO Kraków) kluczowe znaczenie.

5. Wyniki badań

Analizie poddano dwie trasy brygady numer 1 (piątkową oraz poniedziałkową). W pierwszym kroku (I wariant) przeprowadzono kalkulację trasy przesłanej do realizacji przez planistę. Wariant ten to spis lokalizacji, które dana brygada powinna odwiedzić, uporządkowany jest w sposób alfabetyczny. Trudno mówić w tym wypadku o planie, a jedynie o pewnym wykazie nieruchomości.

Drugi wariant badawczy to próba odzwierciedlenia rzeczywistej trasy realizowanej przez brygadę numer 1 w dniach 3.07.2015 oraz 6.07.2015. Uzyskany wynik to naniesienie lokalizacji nieruchomości będących wypadkową kolejności wskazań GPS. Kalkulacja odległości i czasu przejazdu następuje przy wykorzystaniu narzędzia informatycznego łączącego się z mapą Google.

Ostatnim etapem analizy (wariant III) jest próba optymalizacji trasy przy wykorzystaniu narzędzia informatycznego stworzonego przez autorów. Do obliczeń przyjęto średnią prędkość pojazdu 9 km/h i 45 sekund na obsługę pojedynczego punktu wywozowego – parametry te są wynikiem analizy odczytu nadajników GPS dla kilku brygad wywozowych.

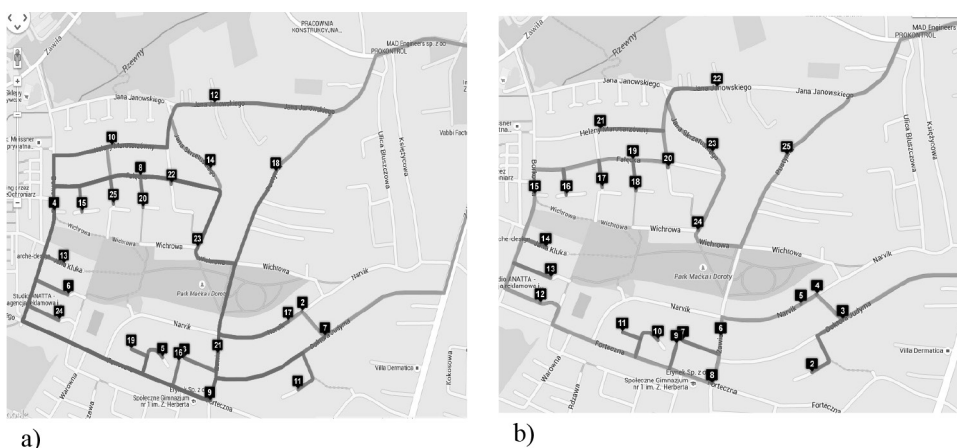
Podstawowym kryterium optymalizacji jest długość trasy. W zależności od potrzeb określonych w czasie dalszych prac badawczych, postać kryterium może być modyfikowana. Stosując mechanizm szukający rozwiązań zbliżonych do optymalnych, przyjęto uproszczenie, które zakłada agregację punktów w trasie. Pierwotnie droga realizowana przez brygadę 1 w poniedziałek miała 232 lokalizacje odbioru.

Aby zmniejszyć liczbę operacji obliczeniowych, przyjęto założenie, iż do optymalizacji brane są dwa najdalej położone numery na danej ulicy, co w badanym wypadku będzie wymuszało na kierowcy odwiedzenie wszystkich lokalizacji. Jeśli brygada numer 1 3.07.2015 r. (piątek) wykonywałaby pracę zgodnie z planem zaprezentowanym w zleceniu, to długość trasy wyniosłaby 62 km. Przewidywany czas samego przejazdu (nieuwzględniający nieplanowanych przestojów oraz innych utrudnień w ruchu) wynosi 9 godzin i 47 min.

Tabela 2. Porównanie długości tras trzech rozważanych wariantów z dnia 3.07.2015

Rozważane warianty badań	Długość trasy
Trasa przesłana przez planistów do realizacji	62 km
Trasa zrealizowana przez brygadę zgodnie z odczytem GPS	46 km
Trasa zaproponowana przez autorów po optymalizacji	35 km

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 2. Porównanie tras przejazdu: a) trasa wykonana przez brygadę nr 1 dnia 3.07.2015; b) trasa zaproponowana przez autorów

Źródło: opracowanie własne.

Obliczając długość trasy zgodnie z faktycznymi wskazaniem GPS, obserwujemy, iż brygada realizująca trasę porusza się zgodnie z własnym doświadczeniem i nie korzysta ze wskazań przesłanych przez planistę. Dzięki takiemu postępowaniu rzeczywista droga w dniu 03.07.2015 wyniosła około 46 km (czas estymowany – około 8 godzin pracy). Po zastosowaniu mechanizmu optymalizującego długość drogi zmalała do 35 km (patrz tab. 1), a przewidywany czas przejazdu wyniósł 6 godzin i 48 min (bez nieplanowanych przestojów oraz innych utrudnień w ruchu).

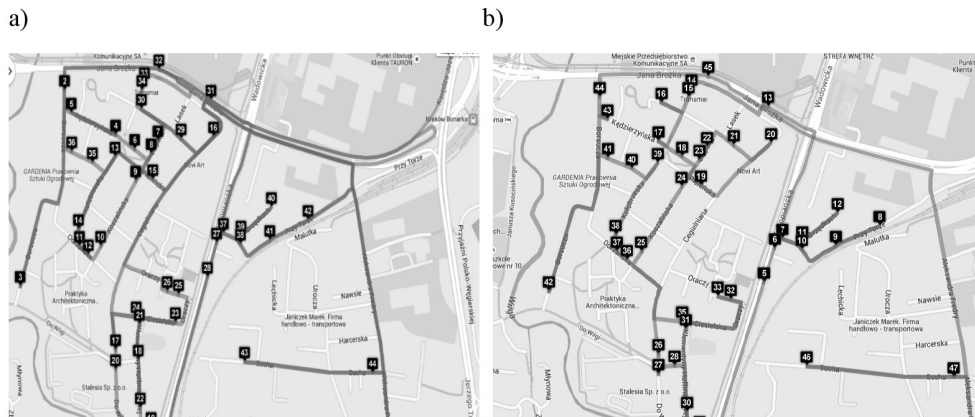
Różnica między planem a drogą wyznaczoną przez autorów to aż 27 km. Optymalizowana trasa jest krótsza o około 43% od planu przedstawionego przez planistów brygadzie wywozowej. Różnica między rzeczywiście realizowaną trasą a rozwiązaniem zaproponowanym przez autorów jest mniejsza; wynosi 11 km. Trasa według wariantu III jest krótsza od realizacji o około 24%.

Dla trasy poniedziałkowej (6.03.2015) różnica między planem a drogą zaproponowaną przez autorów to aż 17 km (patrz tab. 3). Trasa według wariantu III jest krótsza od zaprezentowanego planu o około 36,9%.

Tabela 3. Porównanie długości tras trzech rozważanych wariantów z dnia 6.07.2015

Rozważane warianty badań	Długość trasy
Trasa przesłana przez planistów do realizacji	46 km
Trasa zrealizowana przez brygadę zgodnie z odczytem GPS	34 km
Trasa zaproponowana przez autorów po optymalizacji	29 km

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3. Porównanie tras przejazdu: a) trasa wykonana przez brygadę nr 1 dnia 6.07.2015; b) trasa zaproponowana przez autorów

Źródło: opracowanie własne.

Różnica między rzeczywiście realizowaną trasą a wariantem zaproponowanym przez autorów jest mniejsza; wynosi 5 km. Trasa według wariantu III jest krótsza o około 14,7 % od realizacji. Przy założonych parametrach czasowych optymalizacja pozwoliła zaoszczędzić około 1h 54 min względem planu oraz około 33 min względem realnego wykonania.

6. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała, iż zastosowanie prostych metod optymalizacji pozwala uzyskać znaczne skrócenie długości tras zbiórki odpadów komunalnych. Dalsze badania skupiają się na identyfikowaniu ograniczeń, które mogą wpływać na mechanizm optymalizacyjny. Konieczna jest szczegółowa analiza tzw. okien czasowych, czyli pór dnia, w których należy dokonywać odbioru odpadów dla wybranych lokalizacji. Przedstawiony przez autorów model 1 uwzględnia okna czasowe odbioru odpadów, jednakże w rzeczywistości firmie trudno było je na tym etapie badań wskazać. Plan przedstawiony kierowcom pozwala na lepsze kontrolowanie wykonywanej pracy, gdyż umożliwi im pełniejsze ustalenie, w jakiej lokalizacji powinni znaleźć się pracownicy w wybranym okresie czasowym. Dowolność w realizacji tras, jaką zostawia kierowcom planista, powoduje duże odchylenia czasu rzeczywistego przejazdu od rozwiązania optymalnego. Pozostawienie układania tras w gestii kierowcy może powodować liczne uchybienia polegające na dokładaniu punktów, które nie powinny być wliczane w dany przejazd.

Literatura

- Dale S., Rogers Ronald S., Tibben-Lembke, 1998, *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, Reverse Logistics Executive Council, Nevada.
- Fleischmann M., 2000, *Quantitative models for Reverse Logistics*, Springer-Verlag, Berlin.
- Hanczar P., Pisiewicz D., 2015, *Rozwiązania ICT wspomagające zbiórkę odpadów komunalnych*, Zeszyty Naukowe UE w Katowicach, Katowice.
- Kivinen P., 2002, *Value Added Logistical Support Service. Part 2. Outsourcing process of spare Part Logistics in Metal Industry*, Research Report 138, Lappeenranta University of Technology, Department of Industrial Engineering and Management.
- Little J.D.C, Murty K.G., Sweeney D.W., Karel C., 1963, *An algorithm for the traveling salesman problem*, Operations Research, no. 11, s. 972-989.
- Mason S., 2002, *Backwards Progress*, IIE Solutions, s. 42-46.
- Michniewska K., 2006, *Nowe trendy w logistyce: logistyka odzysku a ekologia*, Logistyka, nr 1, s. 29-30.
- Pohlen T.L., Farris II M., 1992, *Reverse logistics in plastic recycling*, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, no. 22(7), s. 35-47.
- Schary Ph., Skjott-Larsen T., 2002, *Zarządzanie globalnym łańcuchem podaży*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Słowiński B., 2008, *Wprowadzenie do logistyki*, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- Stock J.R., 1992, *Reverse Logistics*, Council of Logistics Management, Oak Brook.