

**JAKUB STARCZEWSKI**

dr inż., ORCID 0000-0003-1924-4657, Politechnika Krakowska, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-115 Kraków, e-mail: starczewski.jakub@onet.pl

# Wybrane zagadnienia kształtowania systemu dystrybucji ładunków z wykorzystaniem rowerów towarowych wewnątrz aglomeracji miejskiej<sup>1</sup>

**Streszczenie:** Artykuł podejmuje problematykę poprawy efektywności dostaw ładunków w zabytkowych centrach dużych miast i aglomeracji przy wykorzystaniu rowerów towarowych. Stanowi on opis wybranych zagadnień wchodzących w zakres rozprawy doktorskiej autora [1]. W artykule zaprezentowano model matematyczny systemu dostaw, w ramach którego zidentyfikowane zostały następujące elementy: kryterium oceny efektywności systemu, model popytu na dostawę ładunków, metody trasowania pojazdów oraz metody wyboru lokalizacji punktów przeładunkowych. Wszystkie elementy zostały scharakteryzowane w późniejszych częściach tekstu. Zapropionowano podejście do ewaluacji systemów dostaw ładunków poprzez identyfikację wskaźnika oceny efektywności uwzględniającego wymiar ekonomiczny procesu technologicznego oraz założenia strategii zrównoważonego rozwoju. Sformalizowano sposób obliczenia poszczególnych składowych wskaźnika oceny efektywności. Część badawcza obejmuje charakterystykę dwóch eksperymentów symulacyjnych przeprowadzonych za pomocą specjalnie stworzonego oprogramowania. Pierwszy z nich zrealizowano przy wykorzystaniu zaproponowanej metody analizy statystycznej wskaźnika oceny efektywności oraz heurystycznej metody środka ciężkości. Dotyczył on wyznaczenia lokalizacji punktu przeładunkowego na potrzeby rowerowego systemu dystrybucji. Drugi natomiast polegał na ocenie trzech metod marszrutyzacji (algorytmu oszczędzania Clarke'a–Wrighta, symulowanego wyżarzania i algorytmu genetycznego) w kontekście wartości przyjętego wskaźnika oceny efektywności. Jego przebieg odbywał się zgodnie z opracowanym planem eksperymentu pełno-czynnikowego, uwzględniającego zmienność popytu na przewozy ładunków. Całość zakończono wnioskami płynącymi z zaprezentowanej pracy badawczej, a także zaproponowano dalsze kierunki badań i rozwoju tematyki.

**Słowa kluczowe:** rower towarowy, system dystrybucji ładunków, logistyka miejska, marszrutyzacja pojazdów, problem lokalizacji.

## Wprowadzenie

Miejski transport ładunków ujmowany jest w literaturze jako: dynamiczny, złożony system generujący trudne w koordynacji, duże potoki ruchu, którego charakter podyktowany jest nie tylko różnorodnymi czynnikami definiującymi popyt na przewozy, ale także zróżnicowaniem wymagań jego uczestników oraz unikalnej specyfiki otoczenia [2]. W zdecydowanej większości (w ujęciu uwarunkowań krajów europejskich) bazuje on na transporcie kołowym wykorzystującym silniki wysokoprężne. Z tego względu Unia Europejska podjęła kroki zmierzające do zmiany obecnego stanu. W konsekwencji wyznaczono długoterminowe cele dotyczące między innymi wolnego od emisji CO<sub>2</sub> transportu miejskiego do roku 2030 w dużych miastach oraz średniej emisji CO<sub>2</sub> dla nowych samochodów dostawczych sprzedawanych w Unii Europejskiej. Stanowią one kierunek,

w którym miejski transport towarów powinien się rozwijać. Równocześnie zagadnienie dystrybucji towarów w mieście wiąże się bezpośrednio z problematyką dostaw ostatniego kilometra (ostatniej mili), która w literaturze naukowej uznawana jest za najbardziej kosztochłonna i problematyczny etap procesu przewozowego. Koszty te generowane są na kilku płaszczyznach, przez następujące czynniki:

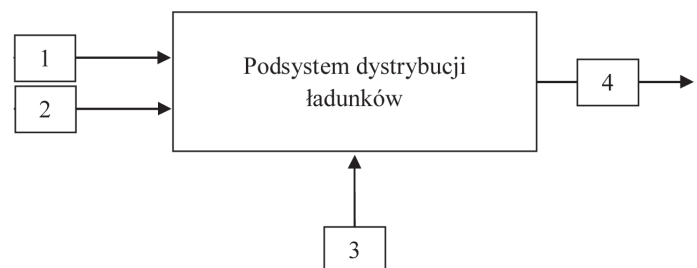
- ograniczenia przestrzenne,
- ograniczenia funkcjonalne,
- ograniczenia administracyjne, w tym czasowe.

Dobłą alternatywą dla dostaw ładunków spalinowymi środkami transportu może okazać się system dystrybucji wykorzystujący rowery towarowe. Pomimo iż nie jest to rozwiązanie nowe, to przy ówczesnym rozwoju napędów elektrycznych oraz dzięki badaniom symulacyjnym technologia ta może być nowatorska.

## Model symulacyjny systemu dostaw

Zgodnie z ogólną teorią systemów należy traktować podsystem dystrybucji ładunków jako element większego bytu. W założonym podejściu można przedstawić obiekt rozważań wraz z elementami nań oddziałującymi w postaci schematu blokowego, jak na rysunku 1.

Dla tak zobrazowanego systemu elementy 1 i 2 stanowią reprezentację zbioru zmiennych należących do grupy parametrów sterujących, natomiast 3 to reprezentacja parametrów określających wpływ środowiska zewnętrznego. Wynika z tego założenie mówiące, że poprzez odpowiedni wybór tras przejazdu pojazdów oraz lokalizacji punktu przeładunkowego (w systemie obsługi rowerami towarowymi) można maksymalizować funkcję kryterium efektywności odnoszącą się odwrotnie proporcjonalnie do kosztów przewozu. Całość zakłada wpływ środowiska



Rys. 1. Schemat ideowy modelu systemu dystrybucji ładunków i powiązanych z nim parametrów. Oznaczenia na rysunku 1: 1 – wyznaczanie tras przejazdu pojazdów, 2 – wybór lokalizacji punktu przeładunkowego, 3 – popyt na przewozy ładunków, 4 – wskaźnik efektywności.

Źródło: opracowanie własne

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2023.

zewnątrznego wyrażonego przez parametr popytu na przewozy, którym nie da się sterować. W tak zagregowanym modelu nie uwzględnia się innych determinant, mogących stanowić odrębną analizę w przyszłości.

Zgodnie z powyższym model matematyczny systemu dostaw  $M_{SD}$  w postaci ogólnej można przedstawić jako zbiór elementów:

$$M_{SD} = \langle \Omega, D, \Phi \rangle \quad (1)$$

gdzie:

- $\Omega$  – model sieci transportowej,
- $D$  – model popytu na przewozy ładunków,
- $\Phi$  – model systemu obsługującego.

Zaproponowane podejście jest spójne z wcześniejszymi pracami badawczymi autora ([3], [4], [5]), w których można odnaleźć postać matematyczną poszczególnych elementów oraz ich szczegółowy opis.

### Kryterium oceny efektywności systemu dostaw ładunków w ujęciu założeń zrównoważonego rozwoju transportu

Dotychczasowy stan badań naukowych w zakresie ewaluacji systemów logistycznych zawiera wiele wartościowych pozycji. Niestety brak jednolitego podejścia sprawił, że istnieje ogromna liczba wskaźników służących do szeroko pojętej charakteryzacji, często opisujących bardzo zbliżone zjawiska, jednak na przykład w różnych jednostkach – wykluczając tym samym możliwość porównania systemów pomiędzy sobą, bez zastosowania obliczeń szacunkowych lub przybliżeń. Chcąc, aby opisywane w opracowaniu podejście do problemu znalazło odzwierciedlenie w rzeczywistych systemach transportowych oraz mogło stanowić narzędzie do poprawy konkurencyjności na rynku usług, zakłada się ewaluację systemu głównie pod względem ekonomicznym. Równocześnie nie można zapomnieć o wyższości wymiaru ekologicznego w pryzmacie długomyślności nad tym czysto ekonomicznym (doraźnym), czego potwierdzeniem są założenia zrównoważonego rozwoju transportu. Wnioskować można, że te dwa, czasem sprzeczne aspekty należy co najmniej przeciwstawić w formie adekwatnego wskaźnika oceny.

W związku z powyższym w doborze kryterium efektywności stanowiącego podstawę do uzasadnienia funkcjonowania systemu dostaw uwzględnia się aspekty środowiskowy oraz ekonomiczny jako dwa najważniejsze w kontekście transportu ładunków. Kryterium efektywności  $K_e$  definiuje się zatem w następujący sposób:

$$K_e = \sum_{i=1}^{N_z} \frac{P_i - [K_{oi}(t_{zi}) + K_{Si}(W_i)]}{W_i} \rightarrow \max \quad (2)$$

gdzie:

- $K_e$  – wartość wskaźnika oceny efektywności [PLN/tkm],
- $N_z$  – łączna liczba obsługanych zleceń,
- $P_i$  – przychody brutto pozyskane w wyniku realizacji i-tego zlecenia transportowego [PLN],

$K_{oi}(t_{zi})$  – suma kosztów operacyjnych wynikających z czasu zaangażowania środka transportu do realizacji i-tego zlecenia transportowego [PLN],

$K_{Si}(W_i)$  – suma kosztów środowiskowych wygenerowanych wskutek wykonania pracy przewozowej na poczet i-tego zlecenia transportowego [PLN],

$W_i$  – wykonana praca przewozowa dla i-tego zadania przewozowego [tkm].

### Przychody

Przychody należy rozumieć jako przyływ aktywów do przedsiębiorstwa, będący konsekwencją wykonania danego zlecenia transportowego, bez uwzględnienia poniesionych kosztów. W praktyce biznesowej istnieje kilka schematów pobierania opłaty za realizację przewozu. Stawka może być odniesiona do liczby sztuk przesyłki, masy, gabarytów, odległości przewozu lub kombinacji wcześniej wymienionych – na przykład masa/gabaryt (tj. objętość). Z uwagi na stosunkowo małe zróżnicowanie wagowe ładunków w realizacji zadań przewozowych rowerami towarowymi, zdecydowano o obliczeniu należności za wykonanie usługi przewozowej za pomocą wzoru (3):

$$P_i = N_{Pi} \cdot C_{Pi} \quad (3)$$

gdzie:

$N_{Pi}$  – liczba paczek/przesyłek przewiezionych w ramach i-tego zlecenia przewozowego [szt.],

$C_{Pi}$  – stawka stanowiąca cenę za przewóz jednej sztuki przesyłki w ramach i-tego zlecenia przewozowego [PLN/szt.].

### Koszty operacyjne

W ogólnym rozumieniu pojęcie kosztu definiowane jest jako: „wyrażone w jednostkach pieniężnych zużycie fizyczne i naturalne rzeczowych składników majątku trwałego i usług oraz pracy ludzkiej w celu uzyskania zamierzonych przez jednostkę efektów, w danym okresie analitycznym” [5]. Struktura kosztów w przedsiębiorstwie transportowym może być różna w zależności od podejścia badacza. W literaturze istnieje wiele klasyfikacji kosztów przedsiębiorstwa, które w odmiennych badaniach przeplatają się ze sobą, przyjmując zarazem różne definicje. Niemniej jednak w odniesieniu do ustawy o rachunkowości [7] wyszczególnia się koszty działalności operacyjnej jako te, które ponosi dane przedsiębiorstwo w celu sprzedaży usług i/lub produktów, czyli stanowiące wynik działalności statutowej (takie podejście jest zgodne z literaturą przedmiotu [6]). W skład niektórych klasyfikacji wchodzi również elementy niezwiązane bezpośrednio z procesem transportowym, a na przykład z realizacją inwestycji, jednakże ich uwzględnienie w procesie symulacji może niepotrzebnie przyczynić się do fałszowania wyników badań. Zgodnie z powyższym wyszczególniono następujące pozycje kosztowe działalności operacyjnej, mające bezpośredni związek z procesem realizacji przewozu [na podstawie 6]:

- koszty zużycia środków trwałych,
- koszty zużycia energii i materiałów eksploatacyjnych,

- koszty usług obcych,
- podatki i opłaty,
- wynagrodzenia pracowników oraz inne świadczenia,
- pozostałe koszty (np. delegacje).

Istotnym jest to, iż poszczególne pozycje kosztowe mogą zależeć głównie od czasu lub bezpośrednio od przebiegu, co powoduje konieczność zastosowania „wspólnego mianownika” w dogłębnej analizie działalności firmy [8]. Na potrzeby artykułu posłużono się rozważaniami zawartymi w źródle [9], które stanowią podstawę do agregacji metody wyznaczenia kosztów przewozu rowerem towarowym za pomocą czasu zaangażowania pojazdu w proces technologiczny (wzór 4), w odniesieniu do stawki za jedną godzinę pracy urządzenia. Czas zaangażowania  $t_Z$ , o którym mowa, oblicza się w następujący sposób:

$$t_{Zi} = \frac{N_{Pi} \cdot t_{Ni}}{60} + \frac{L_i}{V_i} + \frac{N_{Pi} \cdot t_{Wi}}{60} \quad (4)$$

gdzie:

- $t_{Zi}$  – czas zaangażowania pojazdu w i-te zadanie przewozowe wyrażony w [h],
- $L_i$  – odległość przewozu ładunku w ramach realizacji i-tego zadania przewozowego [km],
- $V_i$  – prędkość techniczna w ramach realizacji i-tego zadania przewozowego [km/h],
- $t_{Ni}$  – czas naładunku jednej sztuki przesyłki dla i-tego zadania przewozowego [min],
- $t_{Wi}$  – czas wyładunku jednej sztuki przesyłki dla i-tego zadania przewozowego [min].

W przedstawionym podejściu świadomie pominięto całościowe koszty łańcucha dostaw związane na przykład z potrzebą modernizacji obecnego systemu celem wprowadzenia odmiennej technologii przewozu (gdy mowa o modernizacji istniejącego systemu tradycyjnego) lub kosztów części procesu logistycznego realizowanej przez inne (niż rower) środki transportu. Również aspekt wynagrodzenia kierowcy został pominięty ze względu na brak możliwości uogólnienia zarobków w sposób rzetelny, oparty na rzeczywistych danych. Pominięto równocześnie koszty stałe przedsiębiorstwa, które powinny wchodzić w skład całościowej analizy istniejącego systemu. Zważając na powyższe, w opracowaniu wzięto pod uwagę następujące koszty związane z przewozem:

- koszt zamrożenia kapitału w skutek zakupu pojazdu,
- koszt zużycia energii i materiałów eksploatacyjnych,
- koszt zużycia pojazdów,
- koszty środowiskowe.

Poniżej zaprezentowano sposób ich szacowania, który nawiązuje do wcześniejszych badań naukowych autora [9]

#### Koszty zamrożenia kapitału związane z zakupem pojazdu

Koszty zamrożenia kapitału związane z zakupem pojazdu  $K_K$  obliczono na podstawie poniższego wzoru (5). Założono zakup pojazdów ze środków własnych oraz comiesięczne odpisy amortyzacyjne – amortyzacja metodą liniową.

$$K_K = \frac{W_P \cdot \alpha_K}{12} \cdot \min \left\{ \left[ \frac{12}{\alpha_A} \right]; N_E \cdot 12 \right\} \cdot \left( 1 - \min \left\{ \left[ \frac{12}{\alpha_A} \right] - 1; N_E \cdot 12 - 1 \right\} \cdot \frac{\alpha_A}{2 \cdot 12} \right) \cdot \frac{t_Z}{N_E \cdot t_R} \quad (5)$$

gdzie:

- $K_K$  – koszt zamrożenia kapitału związany z zakupem pojazdu [PLN],
- $W_P$  – wartość początkowa pojazdu wykorzystywanego do realizacji przewozu w [PLN],
- $\alpha_K$  – roczny koszt zamrożenia kapitału w [%/rok],
- $\alpha_A$  – roczna stawka amortyzacji dla danego pojazdu w [%/rok],
- $t_R$  – przeciętny roczny czas zaangażowania pojazdu w [dni/rok],
- $N_E$  – liczba lat eksploatacji pojazdu wyrażona w latach.

#### Koszty zużycia energii i materiałów eksploatacyjnych

Na koszty zużycia energii i materiałów eksploatacyjnych  $K_{EiM}$  składają się: koszty energii zużytej przez człowieka  $K_{EL}$ , koszty energii zużytej przez maszynę  $K_{EM}$  oraz koszty materiałów eksploatacyjnych  $K_M$  – wzór (6):

$$K_{EiM} = K_{EL} + K_{EM} + K_M \quad (6)$$

gdzie:

- $K_{EiM}$  – koszt zużycia energii i materiałów eksploatacyjnych [PLN],
- $K_{EL}$  – koszt energii zużytej przez człowieka [PLN],
- $K_{EM}$  – koszty energii zużytej przez maszynę [PLN],
- $K_M$  – koszt materiałów eksploatacyjnych [PLN].

#### Koszty energii zużytej przez człowieka

W celu obliczenia energii zużytej przez człowieka do wykonania zadania przewozowego posłużono się metodologią Harrisa i Benedicta [10]. W pierwszej kolejności obliczono Podstawową Przemianę Materii (ang.: Basal Metabolic Rate) – tj. minimalną liczbę kalorii potrzebnych do utrzymania funkcji życiowych przez danego osobnika w czasie jednej doby. PPM –  $Z_{LP}$  oblicza się na podstawie wzorów (7) lub (8) w zależności od płci:

$$Z_{LP}(m) = 66,4730 + 13,7516 \cdot W(m) + 5,033 \cdot H(m) - 6,7550 \cdot A(m) \quad (7)$$

oraz:

$$Z_{LP}(k) = 655,0955 + 9,5634 \cdot W(k) + 1,8496 \cdot H(k) - 4,6756 \cdot A(k) \quad (8)$$

gdzie:

- $Z_{LP}(m)$  i  $Z_{LP}(k)$  – Podstawowa Przemiana Materii odpowiednio dla mężczyzn i kobiet [kcal],
- $W(m)$  i  $W(k)$  – waga osoby odpowiednio dla mężczyzn i kobiet w [kg],
- $H(m)$  i  $H(k)$  – wzrost osoby odpowiednio dla mężczyzn i kobiet w [cm],
- $A(m)$  i  $A(k)$  – wiek osoby odpowiednio dla mężczyzn i kobiet w [lata].

Na kolejnym etapie dokonano obliczeń Całkowitej Przemiany Materii (Total Energy Expenditure) –  $Z_{LC}$  definiowanej jako liczbę kalorii pokrywającą całkowite, dobowe zapotrzebowanie energetyczne organizmu z uwzględnieniem jego aktywności fizycznej, posługując się wzorem (9):

$$Z_{LC}(m, k) = a \cdot Z_{LP}(m, k) \quad (9)$$

gdzie:

$Z_{LC}(m, k)$  – Całkowita Przemiana Materii dla mężczyzn i kobiet [kcal],

$a$  – współczynnik aktywności określany według założeń (na podstawie: [9]):

$a \in (1,2 ; 1,3)$  – dla osoby chorej, leżącej w łóżku,

$a = 1,4$  – dla niskiej aktywności fizycznej,

$a = 1,6$  – dla umiarkowanej aktywności fizycznej,

$a = 1,75$  – dla wysokiej aktywności fizycznej,

$a = 2$  – dla bardzo wysokiej aktywności fizycznej,

$a \in (2,2 ; 2,4)$  – dla zawodowej aktywności sportowej.

Ostatecznie  $K_{EL}$  obliczono na podstawie wzoru (10):

$$K_{EL} = \frac{c_L \cdot Z_{LC} \cdot t_Z}{24} \quad (10)$$

gdzie:

$c_L$  – jednostkowa cena kcal energii w [zł/kcal].

### Koszty energii zużytej przez maszynę

Koszty energii zużytej przez maszynę  $K_{EM}$  oblicza się w następujący sposób (11):

$$K_{EM} = \frac{c_M \cdot Z_M \cdot L}{100} = \frac{c_M \cdot Z_M \cdot V \cdot t_Z}{100} \quad (11)$$

gdzie:

$c_M$  – jednostkowa cena paliwa do napędu pojazdu w [zł/l],

$Z_M$  – średnie zużycie paliwa przez pojazd w [l/100 km].

### Koszty materiałów eksploatacyjnych

W wielu źródłach literaturowych (między innymi: [11]) koszty materiałów eksploatacyjnych pojazdów spalinowych liczone są jako pewien procent zużycia paliwa (ok. 20%). Dodatkowo często wyróżnia się osobny czynnik, jakim jest zużycie opon, co ogólnikowo stanowi około 5% zużycia paliwa.

W przypadku realizacji zadania przewozowego z wykorzystaniem roweru towarowego bez wspomaganie elektrycznego, odniesienie kosztów zużytych materiałów eksploatacyjnych do zerowej konsumpcji paliwa spalonego przez maszynę, powodowałoby błędy merytoryczne. Z innej zaś strony problematyczne jest wykazanie odpowiedniej zależności takich kosztów w stosunku na przykład do przebiegu pojazdu, ze względu na brak badań eksploatacyjnych rowerów towarowych i dostępności wyników w literaturze naukowej (nie odnaleziono rzetelnych publikacji). Z tego względu dokonano uproszczenia polegającego na przyjęciu współczynnika procentowego i odniesieniu kosztów mate-

riałów eksploatacyjnych do wartości pojazdu. Przyjęty współczynnik (14,85%) odpowiada co do wielkości wyników, stosowanym w literaturze przybliżeniom odnoszącym się do zużytego paliwa. Należy jednak zaznaczyć, iż dokładna wartość współczynnika powinna zostać opracowana drogą doświadczalną dla rzeczywistego obiektu oraz rzeczywistych warunków eksploatacji. Podany, przyjęty współczynnik przybliża poziom kosztów materiałów eksploatacyjnych do znanych z innych publikacji naukowych.

W związku z powyższym koszty materiałów eksploatacyjnych  $K_M$  obliczono w następujący sposób (12):

$$K_M = \frac{14,85\% \cdot [W_P - W_K]}{N_E \cdot t_R} \cdot t_Z \quad (12)$$

gdzie:

$W_K$  – wartość końcowa pojazdu wykorzystywanego do przewozu, wyrażona w [PLN].

### Koszty zużycia pojazdu

Zgodnie z zaproponowanym podejściem w źródle [6] koszt zużycia pojazdów w czasie  $K_A$  jest liczony jako koszt amortyzacji pojazdu metodą liniową za pomocą wzoru (13):

$$K_A = [W_P - W_K] \cdot \frac{t_Z}{t_R \cdot N_E} \quad (13)$$

gdzie:

$K_A$  – koszt zużycia pojazdu wykorzystywanego do przewozu [PLN].

### Koszty operacyjne procesu transportowego

Sumaryczne koszty operacyjne procesu transportowego zdefiniowano jako sumę powyższych składowych, opisaną za pomocą wzoru (14):

$$K_O = K_K + K_{EIM} + K_M + K_A \quad (14)$$

gdzie:

$K_O$  – koszty operacyjne procesu transportowego [PLN].

### Koszty środowiskowe

Na podstawie wcześniejszych badań [9] definiuje się zewnętrzne koszty transportu (lub inaczej koszty środowiskowe) jako: *wyrażone w pieniądzu negatywne skutki zewnętrzne przemieszczania ludzi i dóbr, które nie mają odzwierciedlenia w cenie samego procesu* [12]. Ich lista jest stosunkowo długa, a jej składniki mogą być trudne do oszacowania. Z przeglądu literatury wynika, że w obliczeniach kosztów środowiskowych występuje duży margines błędu, a nawet zdarzyć się może brak zgodności wyników pomiędzy podobnymi badaniami. W przytoczonym podejściu powiela się metodykę zastosowaną w [9], w której, na podstawie prac europejskich oraz polskich badaczy, dokonano oszacowania całościowych kosztów zewnętrznych dla danego środka transportu oraz miejsca jego użycia (tzn. Polski), z uwzględnieniem następujących składników:

- koszty niedoboru infrastruktury,
- koszty wypadków,
- koszty zanieczyszczenia powietrza i koszty opieki medycznej,

- koszty zanieczyszczenia powietrza i strat bioróżnorodności,
- koszty hałasu,
- koszty zmian klimatycznych,
- koszty defragmentacji terenu i zmian w krajobrazie.

Obliczeń kosztów środowiskowych  $K_{Si}$  dokonano na podstawie wzoru (15).

$$K_{Si} = W_i \cdot c_{Si} \quad (15)$$

gdzie:

- $K_{Si}$  – koszt środowiskowy obliczony dla pojazdu wykorzystywanego do przewozu w ramach i-tego zlecenia przewozowego [PLN],
- $c_{Si}$  – jednostkowy koszt środowiskowy dla i-tego przewozu w odniesieniu do wykonanej pracy przewozowej w danym kraju [zł/tkm].

Zaproponowane podejście obliczeń kosztów procesu transportowego, dopasowanego do systemu obsługi popytu za pomocą rowerów towarowych, zawiera wiele uproszczeń, które wynikają bezpośrednio z braku dostępności badań eksploatacyjnych tej technologii przewozu. Niemniej jednak bazuje ono na sprawdzonych metodach zaadaptowanych z pokrewnych dziedzin transportu, a szczegółowa weryfikacja powinna stanowić podstawę dalszej analizy tematu w przyszłości. Warto również wspomnieć, że założenia modelowania symulacyjnego dopuszczają agregację modeli w takim stopniu, aby nie zniekształcały one znacząco opisywanej rzeczywistości. Z przeprowadzonego przeglądu zagadnienia wynika, że ta praktyka posiada odzwierciedlenie w fizycznych systemach, a otrzymane w ten sposób wyniki badań są na akceptowalnym poziomie.

### Wyznaczenie lokalizacji punktu przeładunkowego

Artykuł obejmuje w swoim zakresie identyfikację metody wyznaczania lokalizacji punktu przeładunkowego. Po przeprowadzeniu analizy źródeł literaturowych, z których wynikało, że dla danej tematyki występuje ograniczony zbiór pozycji naukowych, a także zauważając podobieństwa w innych gałęziach transportu (np. w transporcie intermodalnym) oraz problematyce lokalizacji obiektu (FLP), zaproponowano wybór metody bazującej na analizie statystycznej osiągniętych wyników, tj. zdefiniowanego wcześniej wskaźnika oceny efektywności. W rezultacie przeprowadzono eksperyment symulacyjny procesu dostawy ładunków na obszarze ścisłego (historycznego) centrum Krakowa. Eksperyment został zaimplementowany w postaci modelu sieci transportowej i obejmował następujące czynności:

- wyodrębnienie zbioru potencjalnych lokalizacji na danym terenie (6 lokalizacji) – w przedstawionym podejściu brano pod uwagę zbiór rzeczywistych, możliwych lokalizacji obiektów celem maksymalnego uprządkowania opracowania;
- badania terenowe obejmujące spis podmiotów gospodarczych (729 obiektów),

- wykonanie 100 cykli obliczeniowych dla każdego z wariantów lokalizacji, każdorazowo składających się z generacji popytu w formie zamówień o określonej (w drodze losowania) wadze oraz marszrutyzacji za pomocą zaimplementowanej metody algorytmów genetycznych;
- obliczenie dla uzyskanego zbioru tras, średniej pracy przewozowej oraz wartości przyjętego wskaźnika oceny efektywności.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano ranking najlepszych wariantów i zestawiono go z innym, otrzymanym w konsekwencji zastosowania popularnej metody środka ciężkości. W tym celu dokonano wyznaczenia punktu centralnego dla zidentyfikowanego zbioru podmiotów gospodarczych, któremu odpowiadają następujące koordynaty GPS: 50.0617 oraz 19.9385. Najlepszym z dostępnych rozwiązań, stanowiących zarazem zbiór dopuszczalnych lokalizacji, powinno być to, którego odległość od wyznaczonego środka ciężkości będzie najmniejsza. Z uwagi na fakt, że w zastosowanym modelu przewidziano ruch pojazdów odbywający się po trasach reprezentowanych jako zmodyfikowane odległości euklidesowe, dokonano ich pomiaru zarówno w linii prostej, jak i zgodnie z przebiegiem sieci dróg. Porównanie metod miało na celu weryfikację poglądu, że uwzględniona zmienność popytu na przewozy jest istotna w kwestii wyznaczania lokalizacji, a zaproponowana metoda wykorzystująca analizę statystyczną wskaźnika efektywności może wskazywać lepsze rozwiązania niż metoda środka ciężkości (czego dowiedziono). Jednocześnie warto podkreślić, że pozwala ona nie tylko na wyznaczenie lokalizacji punktu przeładunkowego, ale także innych obiektów, niekoniecznie związanych z funkcjonowaniem systemu obsługi rowerami towarowymi. Jako przykład można wskazać takie obiekty jak stacje ładowania pojazdów elektrycznych lub punkty odbioru/nadania przesyłek kurierskich.

Równocześnie, wnioskując na podstawie wyników eksperymentu przeprowadzonego dla studium przypadku Krakowa, dowiedziono, że odpowiedni wybór lokalizacji punktu przeładunkowego dokonany ze zbioru możliwych wariantów może powodować w skrajnym przypadku poprawę efektywności systemu na poziomie 21,5% (499,21 zł/tkm w najgorszym wariancie i 635,94 zł/tkm w najlepszym).

### Wybór metody trasowania pojazdów

Szczególną uwagę poświęcono kwestii wyznaczania tras pojazdów, jako elementu mogącego poprawić wyniki działalności systemu. Dokonano wyboru trzech metod, które stanowiły reprezentację/przykład odrębnych grup podejść do problemu. Analizie poddano metody Clarke'a–Wrighta, symulowanego wyżarzania oraz algorytmów genetycznych. Ze względu na złożoność studium przypadku celowo pominięto grupę metod dokładnych. Przy tak wielu odbiorcach, czas potrzebny na dokonanie obliczeń byłby nieadekwatnie długi w stosunku do potencjalnie lepszych, otrzymanych wyników, co jednocześnie wyklucza ich użycie w praktycznych implementacjach. W konsekwencji przeprowadzonych badań dokonano szczegółowej analizy wybranych metod, wybierając

przy tym najlepszą z nich w odniesieniu do otrzymanych wyników wskaźnika oceny efektywności. Wyboru dokonano w konsekwencji przeprowadzenia eksperymentu symulacyjnego procesu dostawy, bazującego na opisywanym studium przypadku historycznego centrum Krakowa oraz wyznaczonej wcześniej (zwycięskiej) lokalizacji punktu przeładunkowego. W kolejnym kroku, poprzez zróżnicowanie prawdopodobieństwa pojawienia się zlecenia dla poszczególnych podgrup klientów oraz późniejsze losowanie masy jednej sztuki przesyłki, uzyskano efekt zróżnicowania wielkości popytu na przewozy oraz odzwierciedlono jego zmienność w czasie. Następnie wykonano eksperyment pełnoczynnikowy zawierający 81 serii, dla których wyznaczono trasy dostawy za pomocą trzech wspomnianych metod marszrutyzacji. W każdej serii wykonano 100 uruchomień dla poszczególnych algorytmów, uwzględniając przyjęte parametry dotyczące masy jednej sztuki przesyłki oraz ładowności środka transportu. W końcowym etapie dokonano obliczenia średniej wartości wskaźnika oceny efektywności.

Z otrzymanych wyników można wnioskować, iż wybór metody wyznaczania trasy jest w stanie poprawić efektywność systemu dostaw. W skrajnym przypadku możliwe było osiągnięcie 51,7-procentowej poprawy procesu transportowego, co w przełożeniu daje różnicę 594,42 zł/tkm, dzięki zastosowaniu efektywnej metody trasowania pojazdów (zwycięską metodą okazał się algorytm oszczędzania Clarke'a–Wrighta). Co więcej, zwiększenie zysku płynącego z wyboru efektywnej metody trasowania pojazdów jest tym większe, im sumarycznie większe jest prawdopodobieństwo pojawienia się zlecenia dla poszczególnych grup klientów. Biorąc pod uwagę powyższe, należy przypuszczać, iż dla stosunkowo niewielkich przepływów dóbr w systemie wybór metody trasowania nie wpływa znacząco na poprawę efektywności funkcjonowania, a co więcej na znaczeniu zyskuje argument czasu wyznaczenia samej trasy (czasu obliczeń) i związanych z tym hipotetycznych korzyści.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono dedykowane narzędzie w postaci modelu symulacyjnego systemu dystrybucji ładunków, wykorzystującego rowery towarowe. Model ten uwzględnia losowość parametrów procesu dostawy i stochastyczny charakter popytu. Za jego pomocą możliwe było przeprowadzenie badań symulacyjnych, zaimplementowanych w formie dedykowanego oprogramowania i późniejszej ewaluacji procesu z wykorzystaniem przyjętego kryterium oceny efektywności. W ten sposób powstało kompleksowe narzędzie praktyczne, które może zostać wykorzystane w celu optymalizacji funkcjonowania istniejących systemów transportowych, modelowania skutków modernizacji lub jej planowania. Uniwersalność przedstawionego podejścia daje możliwość adaptacji dla innych środków transportu.

Zaproponowane kryterium oceny efektywności uwzględnia zastosowaną technologię transportową oraz postulat strategii zrównoważonego rozwoju. Posiada ono zarówno podłoże ekonomiczne (w jego skład wchodzi liczne pozycje kosztowe zależne od przebiegu) i jednocześnie środowiskowe

(uwzględniając koszty zewnętrzne procesu). Jego struktura pozwala na wykorzystanie nie tylko do ewaluacji systemów stosujących rowery towarowe, ale również tych, stosujących inne technologie przewozu. Nie bez znaczenia pozostaje jego wymiar praktyczny, który może zostać doceniony przez mniejsze podmioty gospodarcze, skupiające działalność swojej firmy przede wszystkim na zysku finansowym i optymalizacji kosztowej. Wzbogacenie wskaźnika oceny o pozycje kosztów środowiskowych daje możliwość analizy wpływu działalności systemu na środowisko naturalne. Jest to działanie podkreślające twierdzenie, że kwestia ochrony środowiska oraz dbanie o jakość życia przyszłych pokoleń są niemniej ważne niż zyski ekonomiczne osiągane przez przedsiębiorstwo „teraz”, pomimo iż to właśnie poziom rentowności systemu stanowi uzasadnienie jego funkcjonowania.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów wskazują, że dla rozpatrywanego studium przypadku możliwa jest poprawa efektywności systemu dystrybucji ładunków poprzez odpowiedni wybór lokalizacji punktu przeładunkowego oraz wyboru efektywnej metody marszrutyzacji. Jako kierunek dalszych badań należy wskazać rozwój metody wyznaczania lokalizacji punktu przeładunkowego w kierunku uwzględnienia większej liczby parametrów popytu oraz kontynuację poszukiwania efektywnej metody wyznaczania tras przejazdu.

### Literatura

1. Starczewski J., *Kształtowanie systemu dystrybucji ładunków z wykorzystaniem rowerów towarowych wewnątrz aglomeracji miejskiej*, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Łądowej, Kraków 2022.
2. Behrends S., *Urban freight transport sustainability. The interaction of urban freight and intermodal transport*, Chalmers University of Technology, Göteborg 2011.
3. Naumov V., Starczewski J., *Approach to simulations of goods deliveries with the use of cargo bicycles*, AIP Conference Proceedings, AIP Publishing 2019.
4. Naumov V., Starczewski J., *Choosing the Localisation of Loading Points for the Cargo Bicycles System in the Krakow Old Town*, Reliability and Statistics in Transportation and Communication, Springer 2019.
5. Naumov V., Starczewski J., Szarata A., *Wybór lokalizacji punktu przeładunkowego na potrzeby rowerowego systemu dostaw ładunków*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej 120, Warszawa 2018.
6. Wasiak M., Jacyna-Golda I., *Transport drogowy w łańcuchach dostaw. Wyznaczanie kosztów*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2016.
7. *Ustawa z dnia 29 września 1994 r. o rachunkowości*, Warszawa 2021.
8. Włodarski G., *Koszty w transporcie drogowym*, Wydawnictwo Społecznej Akademii Nauk, Łódź 2014.
9. Starczewski J., *Analysis of Transport Process' Costs with Use Various Technologies in Terms of Last Mile Delivery Problem*, International Scientific Conference Transport of the 21st Century, Springer 2019.
10. Harris J., Benedict F., *A biometric study of human basal metabolism*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1918.
11. Bogdanowicz S., *Czas i koszty eksploatacji zespolonych ładunkowych środków transportowych: cz.1 i cz.2*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
12. Pawłowska B., *Koszty zewnętrzne transportu w Polsce*, Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, Warsaw University of Life Sciences – SGGW Press 2018.