

ZARZĄDZANIE DOSTAWAMI OSTATNIEGO KILOMETRA REALIZOWANYMI Z WYKORZYSTANIEM ROWERÓW TOWAROWYCH

Stanisław IWAN

Streszczenie: Współczesny miejski transport towarowy zdominowany jest przez przewozy realizowane za pomocą pojazdów o napędach tradycyjnych, co generuje wiele negatywnych skutków dla środowiska miejskiego. Biorąc pod uwagę wymagania Unii Europejskiej w zakresie ograniczania negatywnego oddziaływania transportu na środowisko, zastosowanie transportu rowerowego wydaje się być interesującą alternatywą. W opracowaniu omówiono tę formę realizacji dostaw w kontekście realizacji dostaw ostatniego kilometra. Wskazano kluczowe ograniczenia oraz sposoby pokonywania owych barier.

Słowa kluczowe: logistyka miejska, miejski transport towarowy, dostawy ostatniego kilometra, transport rowerowy, środowisko miejskie, transport zrównoważony

1. Wprowadzenie

Współczesny miejski transport towarowy zdominowany jest przez przewozy realizowane za pomocą pojazdów o napędach tradycyjnych, co generuje wiele negatywnych skutków dla środowiska miejskiego. W ciągu godziny jeden samochód zamienia w spaliny 6000 litrów tlenu, tymczasem dla porównania, w ciągu godziny średniej wielkości drzewo liściaste wytwarza 1200 litrów tlenu [1]. Dziesięć kilometrów przejechanych samochodem osobowym to emisja do atmosfery 2 kg CO₂ [2]. Poza emisją dwutlenku węgla wzrost liczby samochodów prowadzi do wzrostu emisji tlenków azotu, oraz drobnego pyłu zanieczyszczającego powietrze w wyniku ścierania się okładzin hamulcowych, opon oraz nawierzchni jezdni. W województwie zachodniopomorskim z dróg wojewódzkich emituje się rocznie 49 457 Mg tlenku węgla, 14 113 Mg tlenków azotu, 45 Mg dwutlenku siarki [3]. Redukcja zanieczyszczeń generowanych przez transport towarowy w miastach jest możliwa dzięki zastosowaniu pojazdów o napędach alternatywnych (m.in. gazowym, wykorzystującym Liquified Petroleum Gas – LPG lub Compressed Natural Gas – CNG, opartym na stosowaniu biopaliw, wodorowym, gdzie spalanie wodoru odbywa się w komorze klasycznego silnika tłokowego lub też wykorzystywane są ogniwa paliwowe generujące energię w wyniku utleniania paliwa stale dostarczanego z zewnątrz, hybrydowym, polegającym na połączeniu tradycyjnego silnika z silnikiem elektrycznym oraz elektrycznym) a także alternatywnych form organizacji przewozów towarowych, takich jak wprowadzanie stref ograniczonego dostępu, wdrażanie dedykowanych zatoczek rozładunkowych, uruchamianie miejskich centrów konsolidacyjnych i wiele innych [4 - 7].

W ostatnich latach coraz częściej zwraca się uwagę na możliwości tkwiące w transporcie szynowym (np. tramwaje towarowe oraz wykorzystanie do przewozu ładunków metra), żegludzie śródlądowej oraz transporcie rowerowym, jako formie realizacji dostaw [8 - 12]. W sposób szczególny zostało to wyartykułowane w raporcie przygotowanym na potrzeby Komisji Europejskiej przez MDS Transmodal Limited we współpracy z Centro di ricerca per il Trasporto e la Logistica [13]. Wśród wspomnianych form organizacji dostaw najmniej

wymagający w kontekście przystosowania infrastruktury i zapewnienia właściwych warunków funkcjonowania jest transport rowerowy.

2. Funkcjonowanie miejskiego transportu towarowego w ujęciu systemowym

Jednym z kluczowych czynników wpływających na złożoność miejskiego transportu towarowego jest fragmentacja przewozów, wynikająca zarówno z wolumenu i struktury asortymentowej dostaw, jak również zróżnicowanych okien czasowych (ang. *time windows*) ich realizacji, czy dyslokacji przestrzennej punktów odbioru. Jak pokazały badania przeprowadzone w Hanowerze, zdecydowana większość przewozów (aż 42%), realizowanych na potrzeby handlu detalicznego dokonywana jest z wykorzystaniem niedużych pojazdów dostawczych (do 1,8 t), a jedynie 17% dostaw odbywa się w tym sektorze z wykorzystaniem pojazdów wielkotonażowych, powyżej 15 t i dotyczy to zaopatrywania dużych obiektów sklepowych [14]. Badania przeprowadzone w ramach projektu GRASS w Szczecinie wykazały, że 86% dostaw w mieście realizowanych jest przez samochody o ładowności do 3,5 tony, 12% realizowane jest przez pojazdy o ładowności od 3,5 t do 12 t, a jedynie 2 % dostaw realizowanych jest pojazdami o ładowności powyżej 12 t [15].

W ujęciu systemowym miejski transport towarowy stanowi zbiór takich składowych, jak [16]:

- operacje przewozowe;
- punkty składowania i sprzedaży, procesy związane z towarami oraz rodzaje wykonywanych przemieszczeń;
- rodzaje i wyposażenie związane z obsługą przepływów fizycznych;
- lokalizacja i zarządzanie podstawowymi strukturami niezbędnymi dla realizacji przepływów fizycznych, włączając w to procesy magazynowe dóbr przychodzących i wysyłanych;
- działania logistycznych systemów informacyjnych.

Może on zatem zostać opisany jako [17]:

$$S_{CGT} = (U, G_{n,m}, V, I_{n,m}, Z_{m,v}, R_{p,q}, R'_{e,p}) \quad (1)$$

gdzie:

- S_{CGT} – system miejskiego transportu dostawczego;
- U – zbiór interesariuszy (użytkowników systemu), taki, że $U = \{U_R, U_K, U_P, U_A\}$, w którym:
 - U_R – rezydenci,
 - U_K – kontrahenci,
 - U_P – przewoźnicy,
 - U_A – administracja;
- $G_{n,m}$ – wielkość zapotrzebowania na dobra zgłaszana przez n -tego odbiorcę u m -tego dostawcy, gdzie $n, m \in U$;
- V – zbiór środków transportu (pojazdów dostawczych);
- $I_{n,m}$ – informacje pomiędzy interesariuszem n oraz m , gdzie $n, m \in U$;
- $Z_{m,v}$ – zadania przewozowe realizowane przez dostawcę m , środkiem transportu v ;
- $R_{p,q}$ – zbiór relacji w obrębie systemu, gdzie $p, q \in \{U, G_{n,m}, V, I_{n,m}, O_{m,v}\}$
- $R'_{e,p}$ – zbiór relacji z elementem e otoczenia E , gdzie $e \in E$ oraz $p \in$

$$\{U, G_{n,m}, V, I_{n,m}, O_{m,v}\}.$$

W przedstawionym systemie dominującą rolę pełnią elementarne operacje przewozowe $o_{i,j,v}$ związane z realizacją dostaw dla wszystkich odbiorców obsługiwanych przez dany środek transportu v w ramach określonego zadania przewozowego $Z_{m,v}$, takie że [17]:

$$Z_{m,v} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{i,j} o_{i,j,v}, \quad (2)$$

przy warunkach ograniczających:

$$\sum_{i=1}^n o_{i,j,v} = 1, \forall j \in N, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n o_{i,j,v} = 1, \forall j \in N, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} o_{i,j,v} \leq |S| - 1, \forall S \subset N (S \neq \emptyset, S \neq N), 2 \leq |S| \leq n, \quad (5)$$

gdzie:

- N – zbiór węzłów grafu, w którym węzeł n reprezentuje dostawcę m , a pozostałe węzły wszystkich odbiorców dla danego zadania przewozowego $Z_{m,v}$,
- $t_{i,j}$ – czas przejazdu odcinka (i,j) , będący wagą łuku pomiędzy węzłami i oraz j grafu,
- $o_{i,j,v} = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli trasa zawiera odcinek } (i,j), \\ 0 & \text{w przeciwnym wypadku.} \end{cases}$

Dla tak opisanego systemu przestrzeń stanów będzie przestrzenią trójwymiarową, opisaną współrzędnymi [17]:

- T – reprezentującą okna czasowe realizacji zadań przewozowych $Z_{m,v}$;
- D – określającą liczbę operacji przewozowych $o_{i,j,v}$, składających się na zadanie przewozowe $Z_{m,v}$;
- C – reprezentującą procentowe wykorzystanie przestrzeni ładunkowej środków transportu.

Zatem każde zadanie przewozowe $Z_{m,v}$ jest pewnym stanem reprezentowanym przez wektor:

$$\vec{v} = [t_{b,v} - t_{a,v}, d_v, c_v] \quad (6)$$

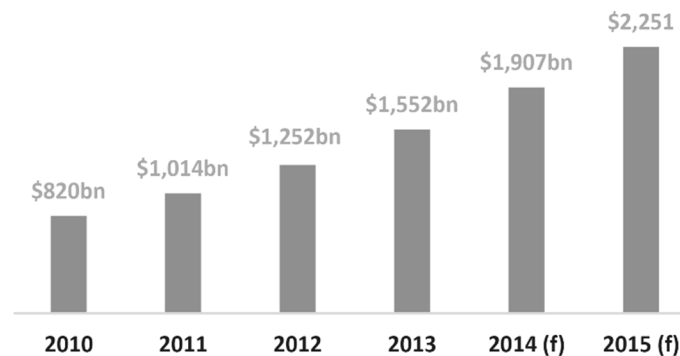
gdzie:

- $t_{b,v}$ – godzina zakończenia realizacji zadania przewozowego przez środek

- transportu v (koniec okna czasowego);
- $t_{a,v}$ – godzina rozpoczęcia realizacji zadania przewozowego przez środek transportu v (początek okna czasowego);
- d_v – liczba operacji przewozowych realizowanych przez środek transportu v w ramach danego zadania przewozowego;
- c_v – wyrażony procentowo stopień wykorzystania przestrzeni ładunkowej środka transportu v .

3. Istota dostaw ostatniego kilometra

Istotnym elementem funkcjonowania miejskiego transportu towarowego jest realizacja dostaw stosunkowo niewielkich wolumenów dóbr do odbiorców końcowych. Bardzo często dotyczy to tzw. dostaw ostatniego kilometra. Należy dodać, że określenie „last mile delivery” jest często tłumaczone dosłownie jako „dostawy ostatniej mili”, z uwagi jednak na stosowany w Polsce system metryczny bardziej zasadne jest stosowanie tłumaczenia „dostawy ostatniego kilometra”, które pojawia się m.in. w „Przewodniku po dobrych praktykach w towarowym transporcie miejskim”, opracowanym w ramach projektu BESTUFS [18]. Dostawy tego typu odnoszą się do logistycznego elementu procesu w ramach transakcji e-commerce (zarówno na rynku B2C, jak również C2C), realizacji zamówień pocztowych, sprzedaży bezpośredniej oraz dostaw z punktów sprzedaży detalicznej [18]. Odgrywają szczególne znaczenie w dobie stałego wzrostu znaczenia handlu elektronicznego (rys. 1).



Rys. 1. Wzrost sprzedaży w handlu elektronicznym w ramach rynku B2C od roku 2010.
Źródło: [19].

Dostawy ostatniego kilometra są jednymi z głównych efektorów wzmoczonego ruchu pojazdów dostawczych w całym obszarze miasta, ale cechuje je znaczne obniżanie racjonalnego funkcjonowania całego systemu transportowego z uwagi na duży stopień fragmentacji oraz niejednokrotnie niski zakres wykorzystania przestrzeni ładunkowej pojazdów [17]. Mogą być realizowane bezpośrednio do domów klientów lub też za pośrednictwem [18]:

- skrzynki doręczeń, przytwierdzonych na stałe do ściany na zewnątrz domu klienta, do których dostęp możliwy jest za pomocą klucza lub kodu elektronicznego, klient może być informowany o dostawie pocztą elektroniczną lub telefonem komórkowym, używane są głównie do paczek ale mogą być również wykorzystywane do dostarczania żywności jeśli posiadają kontrolę temperatury;

- pojemników dostawczych, będących własnością detalisty lub firmy doręczającej, ładowanych w magazynie dystrybucyjnym, a następnie tymczasowo przytwierdzonych w domu klienta w bezpiecznym miejscu za pomocą urządzenia zamykającego przymocowanego do ściany, pojemniki puste lub zawierające zwrócone towary są zabierane przez dostawcę podczas osobnego przejazdu lub jako część kolejnej dostawy;
- systemów dostępowych, upoważniających dostawcę do wstępu na zamknięty teren celem realizacji dostawy, klucz może być umieszczony w urządzeniu przytwierdzonym w miejscu dostępnym dla realizatora dostawy, kierowca po wprowadzeniu kodu do zabezpieczonego urządzenia uzyskuje dostęp do klucza, którym otwiera daną lokalizację, gdzie zostawia towar;
- punktów odbioru, bazujących na lokalizacjach innych niż dom klienta (np. najbliższa poczta, sklep lub stacja benzynowa), najczęściej charakteryzujących się długimi godzinami otwarcia; towary dostarczane są przez detalistów lub ich przewoźników, a klient jest informowany o możliwości odbioru swojego zamówienia z punktu odbioru, może on umówić się z obsługą punktu odbioru na dostarczenie towaru do domu, rezultatem tej idei jest zmniejszenie liczby obsługiwanych lokalizacji oraz zminimalizowana liczba przesyłek niedoręczonych;
- banków odbioru, które są zestawami skrzynek odbioru, pełniącymi podobną rolę co punkty odbioru, lecz nie zlokalizowanymi w zabudowaniach klientów, ale usytuowanymi w blokach, miejscach pracy, na parkingach, stacjach kolejowych itp.; aby zoptymalizować ich wykorzystanie, klienci nie są na stałe przypisani do konkretnego banku, posiadają zabezpieczenia w formie kluczy elektronicznych ze zmiennym kodem, tak aby dany bank mógł być użyty przez różnych klientów w różne dni, mogą być przypisane do jednego lub wykorzystywane przez wielu dostawców, klienci są zwykle powiadamiani o swojej dostawie za pomocą wiadomości, która zawiera numer skrzynki, lokalizację i kod otwarcia, tylko klient może odebrać z banku swoją przesyłkę, realizując w ten sposób ostatni odcinek dostawy, niemniej jednak banki są tak położone by nadłożenie drogi przez klienta było jak najkrótsze; przykładem tego typu rozwiązań są paczkomaty firmy InPost.

3. Zastosowanie rowerów towarowych do realizacji dostaw ostatniego kilometra w miastach

3.1. Funkcjonowanie dostaw w miastach w oparciu o transport rowerowy

Podstawą funkcjonowania miejskiego rowerowego transportu towarowego jest wykorzystanie rowerów towarowych lub rowerów z dodatkowym napędem elektrycznym do realizacji dostaw stosunkowo niewielkich wolumenów dóbr do odbiorców końcowych.

Zastosowanie rowerów towarowych do realizacji dostaw w miastach stało się w ostatnich latach jednym z ciekawszych rozwiązań, o czym świadczy pojawienie się przedsięwzięć ukierunkowanych bezpośrednio na te właśnie aspekty, wśród których na szczególną uwagę zasługują projekty CycleLogistics (www.cyclelogistics.eu) oraz Pro-E-Bike (www.pro-e-bike.org). Mimo, że koncepcja ta nie jest nowa, to jednak dopiero w ostatnich latach nabrała ona charakteru działań zorganizowanych i stała się istotnym elementem systemu realizacji dostaw w kilku miastach europejskich [20]. Niewątpliwie prym w tym zakresie wiedzie Holandia oraz Dania, co w dużej mierze wynika z rozwiniętej w tych krajach „kultury rowerowej” i powszechnego wykorzystywania tej formy transportu na obszarach miast.

Mimo to również inne kraje zaczynają z coraz większym zainteresowaniem zwracać uwagę na rowerowy miejski transport dostawczy. Oprócz wspomnianych krajów, rozwiązania tego typu funkcjonują już z powodzeniem Austrii, Bułgarii, Włoszech, Rumunii, czy Wielkiej Brytanii [20].

Początkowo rowerzyści z plecakiem spełniali potrzebę szybkiej realizacji dostaw małych paczek i było to rozwiązanie komplementarne w stosunku do usług kurierskich, realizowanych przez większe pojazdy. Miało to szczególne znaczenie w przypadku występowania efektu kongestii. Obecnie jednak, wraz ze wzrostem zapotrzebowania na dostawy w miastach, kluczowe znaczenie zaczynają odgrywać wyspecjalizowane rowery o odpowiednio większej nośności (ang. *cargo bikes*), które mogą być wykorzystywane również w innych segmentach rynku niż jedynie realizacja typowych usług kurierskich. Niewątpliwie czynnikiem sprzyjającym popularyzacji tej formy organizacji dostaw jest rozwój pojazdów do tego przystosowanych (rys. 2). Wyposażenie rowerów towarowych dodatkowo w silniki elektryczne poprawia zasięg, ładowność i szybkość tego typu usług dostawczych [21]. Wiele ciekawych przykładów rozwiązań technicznych w tym zakresie zebrano w ramach projektu CycleLogistics [22].



Rys. 2. Przykład roweru towarowego firmy Bakfiets Company. Źródło: [23].

Zainteresowanie tą formą realizacji dostaw rośnie, czego dowodem są rezultaty projektu Jak wykazały badania przeprowadzone w 38 firmach europejskich, stosujących rowery towarowe, ta forma realizacji dostaw wykorzystywana jest w odniesieniu do 25% wszystkich dóbr dostarczanych na terenach miast, w tym aż w 50% w odniesieniu do lekkich przesyłek [21].

3.2. Trudności w realizacji dostaw w miastach przy wykorzystaniu rowerów towarowych

Organizacja dostaw w oparciu o wykorzystywanie rowerów towarowych naraża na kilka istotnych kłopotów, związanych zarówno z konstrukcją stosowanych pojazdów, jak i ograniczeń wynikających ze sposobu ich napędzania, jakim jest w tym wypadku zwykle siła ludzkich mięśni.

Zasadniczą trudnością natury konstrukcyjnej jest stosunkowo nieduża przestrzeń ładunkowa pojazdów oraz ograniczony tonaż możliwych do transportowania ładunków. Wynika to zarówno z rozmiarów rowerów towarowych, jak również z ograniczeń wynikających ze specyfiki źródła napędu – ludzkich mięśni. Jak wykazały badania

przeprowadzone w ramach projektu CycleLogistics ładowność rowerów towarowych waha się zwykle w granicach 80 – 200 kg, w szczególnych przypadkach wzrasta do około 400kg [24]. Ograniczenia pojemnościowe sprawiają, że zwiększa się jeszcze bardziej fragmentacja przewozów, wynikająca z możliwości realizacji dostawy do tylko jednego odbiorcy w ramach pojedynczego zadania przewozowego.

Oprócz ograniczeń technicznych, innym podstawowym problemem związanym z wykorzystywaniem rowerów towarowych jest ograniczony dystans wahający się w granicach od 4 do 50 km [21]. Badania przeprowadzone w ramach projektu CycleLogistics wykazały, że średni dzienny dystans, realizowany przez rowery towarowe o napędzie elektrycznym przy łącznym ciężarze ładunku na poziomie 60 kg, wahała się w granicach od 20 do 40 km, a w przypadku pojazdów trzykołowych o maksymalnej ładowności 250 kg wynosi około 20 km [25].

Zastosowanie rowerów towarowych do realizacji dostaw w miastach nie wymaga natomiast poważniejszych zmian dostosowawczych w zakresie infrastruktury ani wprowadzania rozwiniętych rozwiązań technicznych. Z uwagi na znaczną podatność tej formy transportu na warunki pogodowe oraz szczególne znaczenie czynnika ludzkiego (człowiek jest tutaj nie tylko operatorem, ale również najczęściej stanowi źródło napędu dla pojazdu) szczególnie istotna jest natomiast właściwa organizacja realizacji dostaw, w tym odpowiednie zaplanowanie sieci logistycznej oraz właściwy sposób zarządzania przewozami.

4. Problemy optymalizacji dostaw realizowanych z wykorzystaniem rowerów towarowych

Specyfika przewozów towarowych, realizowanych w obrębie przestrzeni miejskiej wynika z występującej często mnogości elementarnych operacji przewozowych, składających się na pojedyncze zadanie przewozowe. Szczególne znaczenie nabiera to w odniesieniu do realizacji dostaw dóbr w ramach handlu niesklepowego oraz w odniesieniu do małych sklepów, gdzie przewozy oparte są zwykle nie na modelu nadawca-odbiorca, ale na modelu:

nadawca-odbiorca₁-odbiorca₂-...-odbiorca_n.

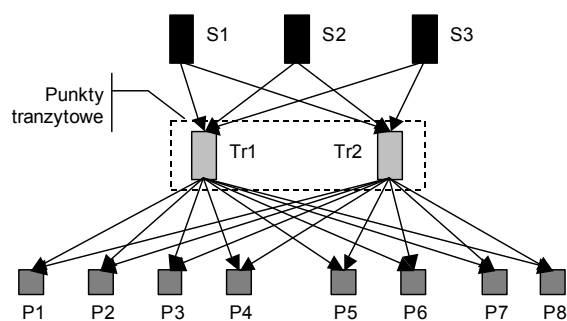
Zatem każde zadanie przewozowe stanowi cykl Hamiltona dla grafu składającego się z $n+1$ węzłów, gdzie n określa liczbę odbiorców. Wyrażane jest w związku z tym łącznym czasem jego realizacji, wynikającym z liczby i konfiguracji operacji elementarnych. W takim razie pożądanym jest aby:

$$Z_{m,v} \rightarrow \min, \quad (7)$$

co odpowiada rozwiązaniu klasycznego problemu komiwojażera.

W odniesieniu do realizacji dostaw z wykorzystaniem rowerów towarowych dodatkowe problemy wynikają ze wspomnianych ograniczeń w zakresie ładowności i pokonywanego dystansu. Rozwiązaniem tego może być zastosowanie punktów tranzytowych, do których ładunki dostarczane są za pomocą pojazdów o większej ładowności (głównie ciężarówek, ale też możliwe jest zastosowanie transportu szynowego lub wodnego śródlądowego). Dopiero z tych punktów ładunki przewożone są do końcowych odbiorców z wykorzystaniem

rowerów towarowych. W przypadku zastosowania więcej niż jednego węzła tranzytowego, sieć logistyczna będzie miała postać przedstawioną na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowa struktura sieci logistycznej w miejskim rowerowym transporcie towarowym dla dwóch węzłów tranzytowych. Źródło: opracowanie własne

Węzły tranzytowe mogą być zlokalizowane na obszarze miasta na stałe lub też mieć charakter punktów mobilnych. Takie właśnie rozwiązanie zaproponowała firma TNT w ramach projektu Straightsol [26]. System nazwany TNT Mobile Depots był testowany w Brukseli (rys. 4).

TNT Mobile Depot jest rodzajem przyczepy lub pojazdu ciężarowego wyposażonym w typowe urządzenia stosowane w punktach załadunkowych, takie jak doki załadunkowe, punkty etykietowania, systemy wprowadzania danych itp. Ich przestrzeń, choć niewielka, podzielona jest na powierzchnię biurową oraz powierzchnię do operacji załadunku, rozładunku i sortowania [27]. Koncepcja ich wykorzystania sprowadza się do codziennego załadunku w głównym magazynie firmy, a następnie dostarczeniu do centralnej części miasta, możliwie najbliższej odbiorców końcowych. Stamtąd elektrycznie napędzane rowery trzykołowe realizują operacje dostaw ostatniego kilometra [28]. W ramach testów przeprowadzonych w Brukseli, każdego dnia z magazynu TNT Express w Brucargo pojazdy dojeżdżały do parkingu w Parc du Cinquantenaire [27].



Rys. 4. Rozwiązanie TNT Mobile Depot testowane w Brukseli. Źródło: [26]

W tego typu rozwiązaniu kluczowe znaczenie ma optymalizacja lokalizacji mobilnego punktu tranzytowego. Dla pojedynczego punktu problem ten nie nastęca większych trudności obliczeniowych, a jedną z popularniejszych i skutecznych metod pozwalających na rozwiązywanie tego zadania jest metoda środka ciężkości. W metodzie tej na badany obszar nakładany jest układ współrzędnych, a optymalne rozwiązanie liczone jest jako:

$$C_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^I r_i e_i d_i + \sum_{j=1}^J R_j E_j S_j}{\sum_{i=1}^I r_i d_i + \sum_{j=1}^J R_j S_j}, \quad (8)$$

gdzie:

- $C_{x,y}$ – środek ciężkości o współrzędnych x, y ;
- r_i – stawka przewozowa dla przewozu towarów pomiędzy punktem tranzytowym, a odbiorcą i ;
- R_j – stawka przewozowa dla przewozu towarów pomiędzy dostawcą j , a punktem tranzytowym;
- e_i – odległość euklidesowa pomiędzy punktem tranzytowym, a odbiorcą i ;
- E_j – odległość euklidesowa pomiędzy dostawcą j , a punktem tranzytowym;
- d_i – wolumen wagowy popytu odbiorcy i ;
- S_j – wolumen wagowy podaży dostawcy j ;
- I – liczba odbiorców;
- J – liczba dostawców.

Znacznie bardziej złożone jest poszukiwanie optymalnej lokalizacji dla więcej niż jednego punktu tranzytowego (jak w przykładzie zaprezentowanym na rysunku 3). Dla każdego z lokalizowanych punktów tranzytowych należy nie tylko wskazać najbardziej optymalne położenie, ale dodatkowo ustalić, które punkty sieci reprezentujące odbiorców będą z danym punktem tranzytowym powiązane. Wzajemna zależność pomiędzy tymi dwoma elementami (lokalizacją punktu, a powiązaniem go z odbiorcami) sprawia, że bardzo trudno znaleźć rozwiązanie zadowolające (optymalne dla całej sieci lub bliskie optimum). W ramach przedstawionego problemu konieczne jest bowiem znalezienie odpowiedzi na dwa zasadnicze pytania:

- gdzie zlokalizować poszczególne punkty tranzytowe?
- w jaki sposób rozłożyć obsługę określonych odbiorców przez poszczególne punkty tranzytowe?

Przyjmując założenie, że jeden odbiorca może być powiązany jedynie z jednym punktem tranzytowym (co z uwagi na wspomniane wcześniej ograniczenia pojawia się niejednokrotnie w przypadku dostaw ostatniego kilometra, realizowanych z wykorzystaniem transportu rowerowego) przestrzeń rozwiązań wynosi:

$$\frac{(x_{\max} \cdot y_{\max})!}{((x_{\max} \cdot y_{\max}) - n)!} \cdot n^P \quad (9)$$

gdzie:

- x_{max} – wartość maksymalna współrzędnej x w zbiorze wartości określających współrzędne lokalizacji odbiorców;
- y_{max} – wartość maksymalna współrzędnej y w zbiorze wartości określających współrzędne lokalizacji odbiorców;
- P – liczba odbiorców;
- n – liczba punktów tranzytowych.

Dla powyższego problemu konieczne jest takie zaplanowanie lokalizacji punktów tranzytowych i takie powiązanie odbiorców z nimi, aby łączne koszty dostaw były możliwie najmniejsze (10).

$$\sum_{i=1}^I e_i + \sum_{n=1}^N E_n \rightarrow \min, \quad (10)$$

gdzie:

- e_i – euklidesowa odległość pomiędzy i -tym odbiorcą, a powiązaniem z nim punktem tranzytowym;
- E_n – euklidesowa odległość pomiędzy n -tym punktem tranzytowym, a dostawcą.

Dla problemu przedstawionego powyżej brak jest metod zapewniających znalezienie rozwiązania optymalnego w rozsądnym czasie. Z tego względu warto posłużyć się metodami heurystycznymi. W [29] do rozwiązywania powyższego problemu zaproponowano zastosowanie algorytmów genetycznych.

Przy uwzględnieniu całkowitoliczbowej reprezentacji wartości, wykorzystano chromosom o strukturze obejmującej dwie grupy genów:

- geny określające współrzędne lokalizacji i -tego punktu tranzytowego;
- geny określające powiązanie danego odbiorcy z określonym punktem tranzytowym.

Przeprowadzono łącznie sześć eksperymentów dla odpowiednio 2, 3 oraz 4 węzłów tranzytowych przy założeniu zróżnicowanej liczby odbiorców (była ona związana z topologią analizowanych sieci) – tab. 1. W ramach każdego eksperymentu zrealizowano po sześć kalkulacji, przy zastosowaniu różnych operatorów selekcji i krzyżowania – tab. 2.

Tab. 1. Charakterystyka przeprowadzonych eksperymentów.

Numer eksperymentu (NE)	Liczba punktów tranzytowych	Liczba odbiorców
1	2	10
2	2	20
3	3	9
4	3	21
5	4	12
6	4	20

Źródło: opracowanie własne na podstawie [29].

Tab. 2. Dobór operatorów selekcji i krzyżowania do poszczególnych kalkulacji w ramach przeprowadzonych eksperymentów.

Numer kalkulacji (NK)	Typ selekcji	Typ krzyżowania
1	turniejowa	jedn punktowe
2	proporcjonalna	jedn punktowe
3	turniejowa	dwupunktowe
4	proporcjonalna	dwupunktowe
5	turniejowa	jednolite
6	proporcjonalna	jednolite

Zródło: opracowanie własne na podstawie [29].

W ramach każdego eksperymentu i każdej kalkulacji algorytm został uruchomiony pięciokrotnie, co dało łącznie 180 rezultatów. Łączne ich zestawienie zawarto w tabeli 3.

Przeprowadzone testy wykazały, że algorytmy genetyczne wykazują znaczną skuteczność w przypadku niewielkiej liczbie węzłów tranzytowych. Dla sieci składającej się z dwóch węzłów oraz 10 odbiorców odchylenie najlepszego znalezione przez algorytm genetyczny rozwiązania w stosunku do rozwiązania optymalnego wynosiło jedynie 0,03%, a dla sieci z 20 odbiorcami uzyskano rozwiązanie optymalne. Najsłabsze rezultaty uzyskano natomiast dla sieci składającej się z czterech węzłów tranzytowych i 20 odbiorców. W tym przypadku odchylenie wynosiło aż 15,08%. Mimo to algorytmy genetyczne wydają się być ciekawą propozycją.

5. Wnioski

Realizacja dostaw ostatniego kilometra w oparciu o wykorzystywanie rowerów towarowych wydaje się być ciekawą propozycją dla współczesnych miast. Z jednej strony pozwala ograniczyć występowanie efektu kongestii, z drugiej zaś w znaczny sposób przyczynia się do redukcji negatywnego wpływu systemu transportowego na środowisko miejskie. O jego skuteczności decyduje jednak właściwa organizacja przewozów, która w świetle ograniczeń wynikających z zastosowania siły ludzkich mięśni jako głównego napędu wymaga zarówno wdrażania odpowiednich rozwiązań technicznych, jak i optymalizowania sieci logistycznej w sposób uwzględniający zarówno znacznie mniejszy zasięg, jak i nośność pojazdów w porównaniu z tradycyjnymi systemami realizacji dostaw.

Obserwując aktualne tendencje w krajach Unii Europejskiej należy spodziewać się stałego wzrostu zainteresowania rowerowym transportem dostawczym a tym samym coraz liczniejszych koncepcji umożliwiających poprawę jego efektywności. Przedstawiona propozycja wykorzystania algorytmów genetycznych wpisuje się w ten trend. Przytoczone wyniki eksperymentów stanowią rezultaty pierwszego, wstępnego etapu prac. Obecnie przegotowywana jest implementacja praktyczna na potrzeby omówionego rozwiązania firmy TNT – TNT Mobile Depot. Uzyskane rezultaty pozwalają sądzić, że zastosowanie zaproponowanego podejścia do optymalizowania lokalizacji węzłów tranzytowych sieci logistycznej dla dostaw ostatniego kilometra realizowanych w oparciu o wykorzystanie transportu rowerowego jest obiecujące.

Tab. 3. Rezultaty przeprowadzonych obliczeń.

NE	NK	Uruchomienie 1		Uruchomienie 2		Uruchomienie 3		Uruchomienie 4		Uruchomienie 5		Wartość optym.
		Wynik	Odchyl.	Wynik	Odchyl.	Wynik	Odchyl.	Wynik	Odchyl.	Wynik	Odchyl.	
1	1	235.6	1.07%	233.9	0.35%	236.8	1.59%	233.2	0.06%	233.2	0.03%	233.1
1	2	243.2	4.34%	244.2	4.75%	233.7	0.28%	234.7	0.70%	241.7	3.70%	233.1
1	3	253.4	8.71%	241.2	3.50%	235.4	1.01%	243.1	4.29%	233.2	0.03%	233.1
1	4	236.1	1.29%	245.4	5.27%	235.5	1.04%	234.0	0.40%	251.1	7.73%	233.1
1	5	233.7	0.28%	235.1	0.87%	233.3	0.08%	233.2	0.03%	233.7	0.28%	233.1
1	6	236.5	1.48%	234.3	0.53%	234.1	0.43%	237.2	1.75%	233.2	0.06%	233.1
2	1	454.4	0.74%	455.6	1.00%	458.2	1.57%	458.4	1.63%	465.0	3.07%	451.1
2	2	462.4	2.50%	460.2	2.02%	456.9	1.28%	602.1	33.46%	454.5	0.76%	451.1
2	3	522.3	15.78%	560.0	24.15%	451.1	0.00%	507.1	12.42%	453.3	0.49%	451.1
2	4	460.8	2.16%	455.7	1.03%	482.5	6.96%	463.9	2.84%	508.0	12.60%	451.1
2	5	451.2	0.03%	454.1	0.67%	451.1	0.00%	453.3	0.48%	454.8	0.83%	451.1
2	6	456.0	1.08%	457.7	1.46%	455.4	0.95%	457.6	1.45%	483.1	7.10%	451.1
3	1	270.3	2.17%	265.1	0.21%	299.0	13.02%	270.2	2.10%	269.0	1.68%	264.6
3	2	266.3	0.65%	266.4	0.67%	291.4	10.15%	343.0	29.63%	275.2	4.03%	264.6
3	3	264.9	0.10%	269.6	1.90%	265.9	0.48%	265.3	0.28%	274.9	3.89%	264.6
3	4	266.7	0.81%	269.9	2.01%	273.4	3.34%	267.7	1.19%	358.8	35.61%	264.6
3	5	265.0	0.17%	385.1	45.53%	386.6	46.10%	273.9	3.53%	270.2	2.13%	264.6
3	6	276.2	4.38%	341.7	29.13%	315.1	19.10%	279.7	5.73%	332.7	25.73%	264.6
4	1	751.9	45.92%	803.1	55.87%	655.4	27.20%	616.0	19.56%	604.9	17.39%	515.2
4	2	689.7	33.85%	742.9	44.17%	686.5	33.23%	660.9	28.26%	766.5	48.76%	515.2
4	3	533.6	3.56%	711.8	38.15%	528.4	2.56%	629.4	22.14%	902.1	75.08%	515.2
4	4	616.0	19.55%	944.2	83.25%	818.9	58.94%	690.7	34.04%	664.9	29.05%	515.2
4	5	757.2	46.95%	645.4	25.27%	516.8	0.29%	836.0	62.25%	593.4	15.16%	515.2
4	6	518.7	0.67%	556.5	8.00%	527.9	2.45%	704.4	36.70%	782.0	51.76%	515.2
5	1	423.5	32.36%	338.9	5.92%	375.1	17.23%	399.6	24.90%	467.5	46.10%	320.0
5	2	409.5	28.00%	456.1	42.54%	431.4	34.83%	464.6	45.19%	420.1	31.29%	320.0
5	3	503.0	57.19%	466.6	45.83%	431.6	34.88%	332.8	4.01%	447.0	39.69%	320.0
5	4	352.3	10.11%	425.9	33.10%	491.1	53.50%	460.9	44.05%	411.0	28.44%	320.0
5	5	412.9	29.04%	378.2	18.21%	412.7	28.97%	427.6	33.63%	382.0	19.38%	320.0
5	6	422.5	32.04%	431.3	34.80%	427.9	33.72%	477.8	49.32%	513.3	60.43%	320.0
6	1	752.3	70.94%	694.0	57.71%	599.4	36.22%	747.0	69.74%	678.2	54.12%	440.1
6	2	561.9	27.68%	696.9	58.36%	629.9	43.13%	721.8	64.03%	734.1	66.82%	440.1
6	3	652.8	48.34%	735.0	67.01%	585.8	33.13%	512.0	16.34%	670.1	52.28%	440.1
6	4	674.8	53.33%	645.7	46.73%	640.5	45.55%	548.5	24.65%	657.4	49.39%	440.1
6	5	596.5	35.55%	659.9	49.96%	528.9	20.19%	654.2	48.65%	703.8	59.93%	440.1
6	6	506.4	15.08%	754.1	71.35%	550.8	25.16%	577.1	31.14%	661.7	50.36%	440.1

– najlepsze rozwiązanie dla analizowanej sieci

Źródło: opracowanie własne na podstawie [29].

Literatura

1. www.green-cars.pl, data pobrania 2.01.2015 r.
2. ec.europa.eu, data pobrania 2.01.2015 r.
3. www.wios.szczecin.pl, data pobrania 2.01.2015 r.
4. Buczaj M., Wykorzystanie alternatywnych źródeł zasilania pojazdów w świetle norm i dyrektyw UE na przykładzie Polski. Motrol. Motorization and Power Industry in Agriculture, nr 6. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Lublin, 2006

5. Maj M., Nowoczesne systemy zasilania pojazdów samochodowych gazem propanbutan (LPG) oraz sprężonym metanem (CNG). Biuletyn Informacyjny ITS, nr 3 (45), Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa, 2011.
6. Rogall H., *Ekonomia zrównoważonego rozwoju. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Zysk i s-ka, Poznań, 2010.
7. Szmidt E., Przegląd alternatywnych paliw i napędów stosowanych w motoryzacji. Biuletyn Informacyjny ITS, nr 3 (45). Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2011.
8. Taniguchi E., Nemoto T., *Intermodal Freight Transport in Urban Areas in Japan* [in:] red. R. Konings, H. Priemus, P. Nijkamp, *The Future of Intermodal Freight Transport: Operations, Design and Policy*, Tom 3: *Transport Economics, Management, and Policy*, Edward Elgar Publishing, 2008.
9. Hallock S., Wilson D., *Urban Freight Transport: The Short Sea Shipping alternative for Melbourne*, 32nd Australasian Transport Research Forum, 2009.
10. Issenmann J., Delaître L., Danard J., De Barbeyrac C., *Integrating Goods in Public Transport: the Case of Paris*, 12th WCTR, July 11-15, 2010 – Lisbon, Portugal, 2010.
11. Regue R., Bristow A. L., *Exploring Scenarios for the Introduction of Freight Trams in Barcelona*, TRB, 2012.
12. Kikutaa J., Itoa T., Tomiyamab I., Yamamoto S., Yamada T., *New Subway-Integrated City Logistics System*, *Procedia. Social and Behavioral Sciences*. Vol. 39, Elsevier, 2012.
13. European Commission, *Study on Urban Freight Transport, Final Report by MDS Transmodal Limited in association with Centro di ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL)*, Brussels, 2012.
14. Sustrate V., *Economic Transport in the Hanover Area [w:] Freight Transport and the City*, OECD, 1999.
15. Kijewska K., Johansen B. G., Tønnessen I., Eidhammer O., *Results of the analysis – the inception report, GRASS Project deliverable D3.2.1*, (grassproject.eu, data pobrania 15.01.2015 r.).
16. Carvalho J.M.C. de, *Systems Theory, Complexity and Supply Organizational Models to Erich City Logistics: an Approach*, [w:] E. Taniguchi, R.G. Thomson, *Logistics Systems for Sustainable Cities*. Cities, Elsevier, 2004.
17. Iwan S., *Wdrażanie dobrych praktyk w obszarze transportu dostawczego w miastach*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin, 2013.
18. Allen J., Thorne G., Browne M., BESTUFS. *Przewodnik po dobrych praktykach w towarowym transporcie miejskim* (www.bestufs.net, data pobrania 15.01.2015 r.).
19. *Global B2C E-commerce Report 2014* (www.adigital.org, data pobrania 10.01.2015 r.).
20. Basterfield S., *D2.1 Short History of Cargo Cycling – lessons to be learnt from present and future Overview of the use of bicycles for goods delivery in selected EU countries* (www.cyclelogistics.eu, data pobrania 15.01.2015 r.).
21. Lenz B., Riehle E., *Bikes for Urban Freight?-Experience for the European case*, TRB 92nd Annual Meeting, Washington, 2013.
22. www.cyclelogistics.eu, data pobrania 2.01.2015 r.
23. bakfiets.nl, data pobrania 2.01.2015 r.
24. Reiter K., *D7.1 A set of updated IEE Common performance indicators including their baseline and assumptions for extrapolation* (www.cyclelogistics.eu, data pobrania 16.01.2015 r.).

25. Wood G., D2.4 Feasibility study; screening of communal and small trade services (www.cyclelogistics.eu, data pobrania 16.01.2015 r.).
26. www.strightsol.eu, data pobrania 16.01.2015 r.
27. www.tnt.com, data pobrania 16.01.2015 r.
28. STRAIGHTSOL Deliverable 3.1. Description and set up of demonstrations. STRAIGHTSOL - STRAtegies and measures for smarter urban freIGHT SOLutions (www.strightsol.eu, data pobrania 16.01.2015 r.).
29. Iwan S., Thompson R. G., Macharis C., Application of genetic algorithms in optimizing the logistics network in an urban bicycle delivery system, TRB 94th Annual Meeting, Washington, 2015.

Dr Stanisław IWAN
Instytut Zarządzania Transportem
Akademia Morska w Szczecinie
70-507 Szczecin, ul. Pobożnego 11
tel./fax: (0-91) 480 96 75
e-mail: s.iwan@am.szczecin.pl