

KUBEK Daniel¹
WIĘCEK Paweł²

Wielokryterialna optymalizacja dostaw w sieci logistycznej z uwzględnieniem aspektów logistyki zwrotnej

WSTĘP

Celem niniejszego artykułu jest zaproponowanie wielokryterialnego podejścia do problemu optymalizacji dostaw w sieci logistycznej z uwzględnieniem aspektów logistyki zwrotnej. Podstawowym elementem w pracy jest próba rozszerzenia podejmowanego zagadnienia o element integrujący zarówno aktywności logistyki typu *forward*, jak i *reverse*. Dotychczas wiele prac naukowych było poświęconych problematyce optymalizacji sieci logistycznych, niemniej jednak problem zintegrowanych sieci logistycznych nie został wystarczająco doceniony. W artykule wyeksponowano wielokryterialny model decyzyjny opisujący rozpatrywane zagadnienie, które następnie zweryfikowano w oparciu o przykład obliczeniowy.

1. PLANOWANIE ZINTEGROWANYCH SIECI LOGISTYCZNYCH

Tradycyjna sieć dostaw jest zazwyczaj postrzegana, jako system logistyczny, którego wejście stanowią dostawy surowców lub półproduktów niezbędnych w procesie produkcji, natomiast wyjście procesy dystrybucji wyrobów gotowych do odbiorców końcowych. Za podstawową determinantę warunkującą efektywność sieci w sensie ekonomicznym oraz jakości realizowanych usług uznaje się odpowiednie podejście do problemów decyzyjnych na każdym poziomie zarządzania: strategicznym, taktycznym i operacyjnym. Według Z.J. Sehen kluczowym elementem decyzyjnym, który w znaczący sposób wpływa na wydajność, odporność oraz łączny poziom kosztów logistycznych w sieci dostaw jest jej struktura [9]. Levi i Kaminsky wskazują, iż strategiczny problem, projektowania sieci oddziałuje na efektywność pozostałych realizowanych w niej zadań [10]. Decyduje ona o pewnych cechach charakterystycznych jak lokalizacja, wielkość, ilość, oraz typ magazynów, terminali przeładunkowych, centrów dystrybucji, itd. Opisuje również strukturę powiązań i relacji zachodzących pomiędzy tymi elementami (przepływ środków finansowych, towarów, informacji).

Temat optymalnego kształtowania struktury sieci logistycznych celem minimalizacji kosztów przepływu towarów był od dawna szeroko rozpatrywany w literaturze. W obecnej sytuacji gwałtownego rozwoju ekonomicznego i postępu technicznego rynek jest znacznie bardziej konkurencyjny i dynamiczny niż dotychczas, wymagając od przedsiębiorstw realizacji usług na coraz wyższym poziomie. Nasilający się proces globalizacji, masowa konsumpcja oraz będące konsekwencją tego problemy środowiskowe sprawiają, iż problemy optymalizacji sieci dostaw wymagają nowego spojrzenia [12]. Obciążenia środowiska w postaci nieracjonalnego zużycia energii, ograniczonych zasobów naturalnych, wzmagającego się drogowego ruchu towarowego oraz rosnąca liczba odpadów skłoniły władze wielu krajów na świecie, a także Wspólnotę Europejską do opracowania rozwiązań prawnych, mających na celu wymuszenie na firmach uczestniczących w łańcuchu dostaw stosowanie rozwiązań proekologicznych na różnych poziomach swojej działalności [3][6]. W związku z tym zwiększa się zainteresowanie przedsiębiorstw losom swoich wyrobów po zakończeniu okresu ich eksploatacji. Poza obowiązkiem prawnym do powtórnego wykorzystania zasobów w trosce o ochronę środowiska, producenci coraz częściej dostrzegają potencjalne profity ekonomiczne z odzysku i ponownego wykorzystania materiałów. Takie podejście korzystnie oddziałuje między innymi na obniżenie energochłonności produkcji, zmniejszenie nakładów kapitałowych na pozyskiwanie surowców pierwotnych itp. [5]. Przykładowo każda tona

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Zarządzania w Budownictwie i Transporcie, mail. dkubek@pk.edu.pl

² Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Zarządzania w Budownictwie i Transporcie, mail. pwiecek@pk.edu.pl

zaoszczędzonego szkła pozwala oszczędzić 1,2 tony piasku, sody, wapienia. Każda tona papieru z makulatury może zaoszczędzić 26,5 tyś. litrów wody, 1,5 tyś. litrów ropy. Szacuje się, iż roczna wartość wyrzucanych na polskie wysypiska opakowań z tworzyw sztucznych, szkła i tektury wynosi około 500 mln złotych. W przypadku zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego istnieje obawa, iż firmy będą ponosić wysokie kary finansowe z tytułu niewywiązania się z obowiązku recyklingu [4]. Wspomniane przesłanki sprawiają, iż gospodarowanie tego typu materiałami coraz częściej znajduje się w gestii logistyki. Ma to swoje odbicie w rozwijającej się logistyce zwrotnej lub inaczej w tzw. logistyce rewersyjnej [13]. Według The European Working Group on Reverse Logistics logistyka rewersyjna jest definiowana, jako proces planowania, realizowania, kontrolowania przepływu „wstecz” strumieni surowców, zapasów, opakowań, zużytych wyrobów końcowych od punktu produkcji, dystrybucji lub końcowego użytkownika, do punktu odzysku, recyklingu lub właściwej utylizacji. Należy nadmienić, iż w kręgu jej zainteresowań znajdują się tylko te strumienie materiałów lub produktów, z których istnieje potencjalna wartość do odzyskania i ponowna możliwość ich użycia w pewnym stopniu. Do tej grupy można zaliczyć wszelkiego typu opakowania, produkty uszkodzone, przeznaczone do naprawy, wycofane z użytku bądź zbędne i zalegające w magazynach w skutek sezonowości lub zmian preferencji nabywców, w szczególności nieprzydatny sprzęt elektryczny i elektroniczny. W celu podniesienia efektywności zbierania tego typu materiałów i ich późniejszego wykorzystania coraz częściej w literaturze proponowane jest tworzenie zintegrowanych sieci logistycznych. W ramach takich sieci, poprzez ścisłą kooperację przedsiębiorstw logistycznych oraz wymianę informacji istnieje potencjał do lepszej koordynacji procesów transportu, dostawy oraz odbioru produktów [11]. Tego typu sieć realizuje w sobie dodatkowo zadania logistyki rewersyjnej (dostawa produktów gotowych i zbiórka materiałów podlegających zwrotowi przy użyciu minimalnej liczby pojazdów, wykorzystanie przestrzeni magazynowych oraz infrastruktury w centrach dystrybucji do sortowania oraz konsolidacji strumienia zwrotów, skoordynowana organizacja transportu do centrów recyklingu, lokalizacja dodatkowych punktów zbierania materiałów). Podejście takie prowadzi do utworzenia systemu zamkniętego znanego w światowej literaturze pod pojęciem ang. closed loop supply chain. Tworzenie indywidualnych i niezależnych systemów logistyki rewersyjnej powoduje zwiększenie kosztów infrastrukturalnych oraz niską efektywność zbierania materiałów, ograniczając tym samym potencjalne zyski ze zwróconych produktów [14]. Dlatego coraz bardziej zasadny staje się trend jednoczesnej optymalizacji przepływów towarowych „forward” i „reverse” w ramach jednej spójnej zintegrowanej sieci o optymalnej strukturze [1],[7],[8].

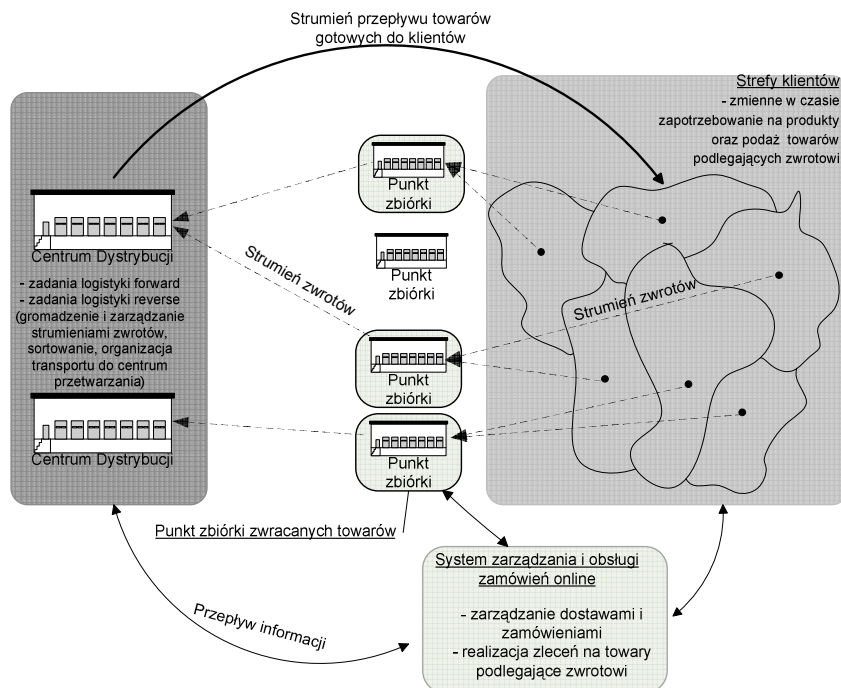
2. PROPOZYCJA MODELU OPTYMALNEJ SIECI DOSTAW Z UWZGLĘDNIENIEM CZYNNIKA LOGISTYKI REWERSYJNEJ

Wspomniane powyżej przesłanki świadczą, iż połączenie zadań logistyki w tradycyjnym ujęciu i rewersyjnej jest podstawą nowoczesnych systemów logistycznych. Tego typu podejście wydaje się być szczególnie uzasadnione w obszarach silnie zurbanizowanych, gdzie dynamicznie zmieniający się popyt na towary oraz wysoki poziom zatłoczenia mogą w znaczący sposób wpłynąć na wydajność procesu dostawy a także zbiórki surowców wtórnych. Dlatego też, bardzo ważnym elementem przy projektowaniu zintegrowanych sieci logistycznych jest uwzględnienie wielu czynników (kryteriów) mających wpływ na jej późniejsze funkcjonowanie.

Podejmowany w artykule problem ma na celu skonfigurowanie powiązań pomiędzy elementami miejskiej sieci dystrybucji takimi jak centra dystrybucji towarów, punkty zbiórki materiałów zwracanych, strefy klientów w sposób, który minimalizuje łączne koszty transportu produktów z centrów dystrybucji do klientów oraz towarów zebranych w punktach zbiórki do centrów dystrybucji, gdzie mogą być realizowane wspomniane wcześniej pewne zadania logistyki zwrotnej. Autorzy przyjęli założenie, iż jako strumień zwrotów będą rozważane głównie wszelkiego typu opakowania, sprzęt elektroniczny oraz tekstylia. Strefa klientów rozumiana jest, jako zbiór podmiotów gospodarczych zlokalizowanych na pewnym obszarze. Dodatkowymi uwzględnionymi kryteriami są minimalizacja czasu jazdy pomiędzy elementami sieci oraz maksymalizacja poziomu obsługi klienta.

Jest on wyrażony, jako maksymalny dopuszczalny promień odległości pomiędzy punktem zbiórki, a obsługiwany klientami. Jeśli jakaś strefa klienta z poza założonego promienia zostanie przypisana do danego punktu zbiórki, to poziom obsługi spada.

Rysunek 1 w ogólny sposób ilustruje typy relacji i przepływów towarowych pomiędzy elementami sieci. Przedstawiony w dalszej części artykułu model decyzyjny opisujący podejmowane zagadnienie sieci dostaw uwzględnia również jej elastyczność. Struktura powiązań między elementami może ulegać zmianie w zależności od zmieniającego się popytu na dostawy, podaży zwracanych artykułów oraz warunków ruchowych w mieście, według przyjętego wcześniej horyzontu czasowego. Takie podejście ma na celu zagwarantowanie szybkiej reakcji systemu logistycznego na dynamiczne zmiany rynku oraz działanie zewnętrznych czynników losowych.



Rys. 1 Proponowana struktura powiązań w ramach sieci logistycznej

1.1. Matematyczne sformułowanie problemu

Przedstawiony w artykule wielokryterialny problem optymalizacji sieci dostaw został sformułowany w postaci mieszanego programowania całkowitoliczbowego:

Zbiory:

- i: indeks stref klientów $i \in I$
- j: indeks punktów zbiórki $j \in J$
- k: indeks centrów dystrybucji $k \in K$
- t: indeks horyzontu czasu $t \in T$

Parametry modelu:

- p_i^t podaż i-tej strefy klienta w okresie czasu t (towary zbierane w ramach logistyki reweryjnej)
- d_i^t zapotrzebowanie na dostawę towaru i-tej strefy klienta w okresie czasu t (towary rozwożone)
- O_{ij} odległość między i-tą strefą klienta a j-tym punktem zbiórki
- P_{jk} odległość pomiędzy j-tym punktem zbiórki a k-tym centrum dystrybucji
- R_{ik} odległość pomiędzy i-tą strefą klienta a k-tym centrum dystrybucji
- Tx_{ij} czas jazdy pomiędzy i-tą strefą klienta a j-tym punktem zbiórki
- Ty_{jk} czas jazdy pomiędzy j-tym punktem zbiórki a k-tym centrum dystrybucji

Tz_{ik} czas jazdy pomiędzy i-tą strefą klienta a k-tym centrum dystrybucji

m^t liczba czynnych punktów zbiórki w okresie czasu t

l maksymalna dopuszczalna odległość pomiędzy i-tą strefą klienta a j-tym punktem zbiórki

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } O_{ij} \leq l \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

cap_j przepustowość j-tego centrum zbiórki

C jednostkowy koszt tonu - kilometra

M duża liczba całkowita

Zmienne decyzyjne:

$X_{ij}^t = \{0,1\}$ wskazuje przydział i-tej strefy klienta do j-tego punktu zbiórki w okresie czasu t

$Y_{jk}^t = \{0,1\}$ wskazuje przydział j-tego punktu zbiórki do k-tego centrum dystrybucji w okresie czasu t

$Z_{ik}^t = \{0,1\}$ wskazuje przydział i-tej strefy klientat do k-tego punktu dystybuacji w okresie czasu t

$W_j^t = \{0,1\}$ wskazuje czy punkt zbiórki towaru jest zamknięty/ otwarty w okresie czasu t

$Q_{ij}^t \in \mathfrak{R}^+ \cap \{0\}$ wskazuje wielkość przepływu zwrotnego towarów pomiędzy i-tą strefą klienta a j-tym punktem zbiórki

Model problemu:

$$\min f_1 = \sum_t \left[\sum_j \sum_i Q_{ij}^t \cdot O_{ij} + \sum_k \sum_j Y_{jk}^t \cdot P_{jk} \cdot \left(\sum_i Q_{ij}^t \right) + \sum_k \sum_i Z_{ik}^t \cdot R_{ik} \cdot d_i^t \right] \cdot C \quad (1)$$

$$\min f_2 = \sum_t \left[\sum_j \sum_i X_{ij}^t \cdot Tx_{ij} + \sum_k \sum_j Y_{jk}^t \cdot Ty_{jk} + \sum_k \sum_i Z_{ik}^t \cdot Tz_{ik} \right] \quad (2)$$

$$\max f_3 = \sum_t \left[\frac{\sum_j \sum_i e_{ij} \cdot p_i^t \cdot X_{ij}^t}{\sum_i p_i^t} \right] \quad (3)$$

$$\sum_j X_{ij}^t \leq 1, \quad \forall i \in I \wedge \forall t \in T \quad (4)$$

$$W_j^t \leq \sum_i X_{ij}^t \leq M \cdot W_j^t, \quad \forall j \in J \wedge \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_k Y_{jk}^t = W_j^t, \quad \forall j \in J \wedge \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_j W_j^t \leq m^t, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_j X_{ij}^t \cdot Q_{ij}^t = p_i^t, \quad \forall i \in I \wedge \forall t \in T \quad (8)$$

$$cap_j \cdot W_j^t \geq \sum_i Q_{ij}^t, \quad \forall j \in J \wedge \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_k Z_{ik}^t = 1 \quad \forall i \in I \wedge \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_i Y_{ik}^t \geq 1 \quad \forall k \in K \wedge \forall t \in T \quad (11)$$

$$X_{ij}^t, Y_{jk}^t, Z_{ik}^t, W_j^t, V_k^t \in \{0,1\} \wedge Q_{ij}^t \in \mathfrak{R}^+ \cap \{0\}, \forall i \in I \wedge \forall j \in J \wedge \forall k \in K \wedge \forall t \in T \quad (12)$$

Funkcja kryterium (1) minimalizuje całkowite koszty transportu przepływu towarowego wewnątrz sieci. Założono, że jednostkowy koszt jest identyczny dla obu typów towarów, jednak możliwe jest ich zróżnicowanie poprzez wprowadzenie dodatkowego kosztu jednostkowego. Funkcja (2) minimalizuje całkowity czas jazdy pomiędzy elementami sieci. Kryterium (3) reprezentuje poziom satysfakcji klientów z obsługi i jest on maksymalizowany. Ograniczenia (4) i (5) zapewniają, iż każda strefa klienta może być obsłużona wyłącznie przez jeden aktywny w danym okresie punkt zbiórki. Ograniczenie (6) gwarantuje, że każdy punkt zbiórki jest obsługiwany dokładnie przez jedno centrum dystrybucji. Nierówność (7) definiuje maksymalną liczbę m^t otwartych punktów zbiórki w okresie czasu t . Możliwa jest sytuacja, że rozwiązanie optymalne nie będzie wymagało pracy wszystkich punktów zbiórki. Równanie (8) zakłada, iż ilość towarów zebranych w punktach zbiórki jest równa łącznej podaży stref klientów. Ograniczenie (9) wskazuje maksymalną przepustowość każdego z punktów zbiórki. Zależność (10) zapewnia, że każdy popyt ze strony klientów jest obsłużony dokładnie jedno centrum dystrybucyjne. Ograniczenie (11) gwarantuje, że każde centrum dystrybucji zostanie uwzględnione w rozwiązaniu. Można to ograniczenie pominąć, wtedy model będzie przedstawiał sytuację, w której nie wszystkie centra dystrybucji muszą być wykorzystane. Ostatnie ograniczenie zapewnia naturę zmiennych.

Zaprezentowany model został rozwiązany metodą wielokryterialnego programowania celowego z wielokrotną alternatywą (ang. Multi-choice Goal Programming). Metoda ta została przedstawiona w [2] i rozszerza ona klasyczne programowanie celowe. Zaletą takiego podejścia jest uwzględnienie faktu, iż cele wskazane przez decydenta mogą nie zostać osiągnięte dokładnie, lecz z pewną dewiacją. Jest to szczególnie ważne przy wielokryterialnej optymalizacji, gdzie otrzymane wartości poszczególnych kryteriów są kompromisem, nie zawsze pokrywającym się z oczekiwaniami decydenta (celami). Problem sprowadza się do minimalizacji odchyleń od wyznaczonego przez decydenta celu dla każdego z kryteriów.

Zaproponowana rozszerzona metoda programowania celowego daje dodatkową zaletę - decydent może określić dla każdego kryterium kilka celów (tzw. aspiracji decydenta), z których jedno musi zostać osiągnięte. Dla przykładu decydent może stwierdzić: "Wartość funkcji kryterialnej powinna być nie mniejsze niż 100, dobrze, jeśli wyniesie 120, a najlepiej, jeśli będzie równa 150". Tak przedstawionego problemu nie można rozwiązać przy pomocy klasycznego programowania celowego.

Matematyczne sformułowanie programowania celowego z wielokrotną alternatywą przedstawia się następująco (bardziej szczegółowy opis zawarty jest w [2]):

$$\min \sum_{i=1}^n w_i |f_i(X) - g_{i1} \text{ lub } g_{i2} \text{ lub } \dots \text{ lub } g_{im}| \quad (13)$$

$$X \in F, \text{ gdzie } F \text{ jest zbiorem dopuszczalnym} \quad (14)$$

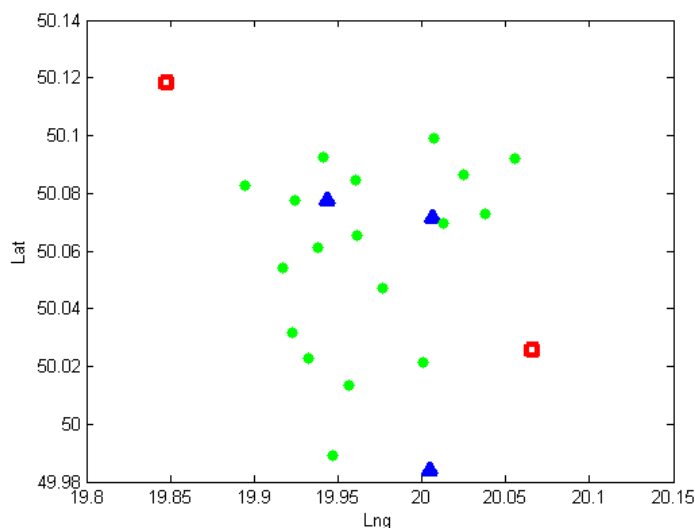
Problem sprowadza się do minimalizacji różnicy pomiędzy wartością i -tej funkcji kryterialnej, a j -tą aspiracją i -tego celu (13). Różnica ta może mieć wartość dodatnią (nad wykonanie) lub ujemną (nie do wykonanie) i -tego kryterium. Każde kryterium ma przypisaną wagę w_i . Takie sformułowanie problemu pozwala na badanie przestrzeni dopuszczalnych rozwiązań dla zakresu, który jest tworzony przez poziomy aspiracji decydenta, co w rzeczywistych problemach może być odzwierciedlone przez niepewność/niedokładność danych. Na przykład założenie, że dana funkcja kryterialna powinna osiągnąć pewną, dokładną wartość (cel), jest nierzeczywiste, ponieważ wartość ta musiałaby być wyznaczona przez dokładne dane, nieobarczone żadnym błędem, czy nie precyzją. Wskazanie dwóch i więcej alternatyw dla celu funkcji kryterialnej, tworzy wspomniany zakres, dla którego szukane jest rozwiązanie. Takie rozwiązanie cechuje się mniejszym konserwatyżmem.

2.1. Przykład obliczeniowy

Charakterystyka przedstawionego modelu optymalizacji sieci dostaw wraz z zaproponowaną wielokryterialną metodą optymalizacji, została przedstawiona na podstawie przykładu. W przykładzie przyjęto następujące założenia:

- Liczba stref klientów wynosi $I = 18$;
- Liczba punktów zbiórki wynosi $J = 3$;
- Liczba centrów dystrybucji wynosi $K = 2$;

- Liczba horyzontów czasowych przyjęto $T = 4$. Liczba ta może reprezentować charakterystykę zmienności ruchu na przestrzeni jednego tygodnia, np. zmiany prędkości na odcinkach sieci. Pierwszy okres może reprezentować początek tygodnia, drugi środek, trzeci koniec, gdzie średnie prędkości są najmniejsze, a czwarty dzień wolny od pracy np. sobotę, gdzie popyt i podaż mogą być najmniejsze, a prędkości większe niż w pozostałych dniach tygodnia.
- Każdej strefie przypisano losowo wybrany popyt z zakresu [100,1000] kg oraz losowo wybraną podaż z zakresu [13,160] kg dla okresu $t = 2$. Dla pozostałych okresów losowo wybrano wartości +/-50% na podstawie okresu $t = 2$, zgodnie z założeniami z poprzedniego podpunktu, np. w czwartym okresie popyt jest najmniejszy,
- Lokalizacje wszystkich elementów systemu wybrano losowo dla współrzędnych geograficznych z zakresu: szerokość geograficzna [49.96 50.15] oraz długość geograficzne [19.8 20.1],
- Macierze odległości pomiędzy elementami systemu obliczono, jako odległości Euklidesowe,
- Koszty O, P, R przyjęto, jako średnie czasy podróży, wyrażonych godzinach, pomiędzy wszystkimi elementami sieci. Do obliczenia przyjęto losowe prędkości z zakresu [30,70] km/h;
- Przepustowości wszystkich punktów przyjęto tak, aby każdy z nich mógł w obsłużyć całą podaż systemu,
- Promień obsługi przyjęto, jako $l = 10$ km.
Lokalizację wszystkich elementów sieci przedstawia Rys. 2.



Rys. 2 Lokalizacje stref klientów (zielone punkty), punktów zbiórki (niebieskie trójkąty) oraz centrów dystrybucji (czerwone kwadraty)

Dla tak sformułowanego problemu, autorzy wykonali symulację, gdzie, jako cele dla aspiracji 1 dla poszczególnych kryteriów w programowaniu celowym, przyjęto wartości optymalizacji zaprezentowanego problemu, dla pojedynczych kryteriów (Tabela 1).

Tab. 1. Wartości celów oraz aspiracji dla kryteriów problemu

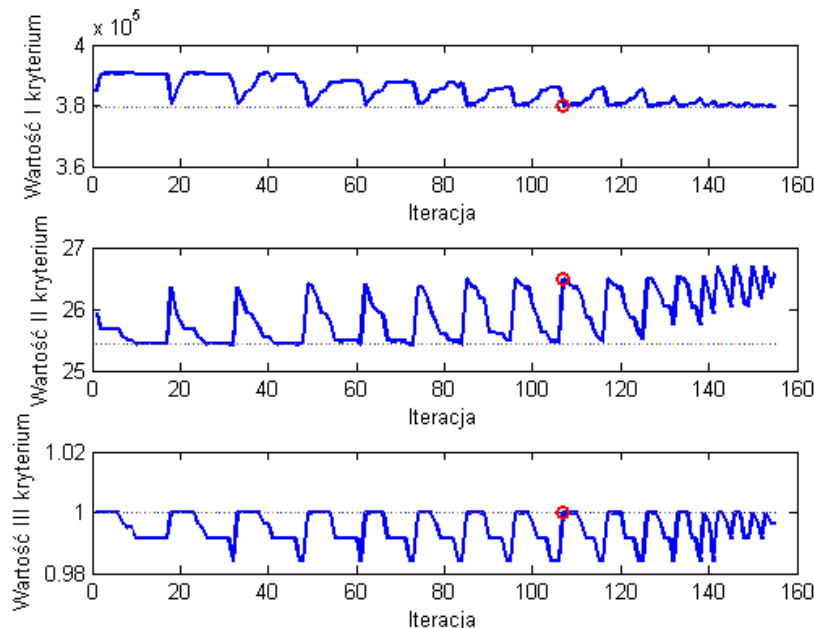
	Kryterium I	Kryterium II	Kryterium III
Aspiracja 1	379 537,63	25,42	1,00
Aspiracja 2	360 560,75	24,15	1,00

Wartości dla aspiracji 2 (oprócz kryterium III) przyjęto, jako 95% aspiracji 1. Ma to na celu uzyskanie lepszych wartości dla poszczególnych kryteriów w analizie wielokryterialnej, niż w przypadku problemu jednokryterialnego. Pozostawienie wartości aspiracji 2 dla trzeciego kryterium ma na celu zapewnienie 100% satysfakcji obsługiwanych stref klientów.

Istotnym elementem analizy wielokryterialnej programowania celowego jest dobór wag do kryteriów. W związku z tym, że dla każdego rozważanego studium przypadku należy indywidualnie dobrać odpowiednie wartości tych parametrów, autorzy wykonali obliczenia dla przestrzeni

możliwych ich wartości. W analizie, zbiór ten, określono w zakresie od 5% do 100% z odstępem 5%, przy czym suma wszystkich 3 wag musi wynosić 100%. Wyniki takiego przeglądu przedstawia Rys. 3. W sumie przegląd odnosił się do 155 przypadków, które spełniają powyższe kryteria. Linia przerywana oznacza cel, jaki powinno osiągnąć każde kryterium (dla aspiracji 1).

Jak można zauważyć wartość funkcji dla I kryterium (minimalizacja pracy przewozowej) maleje, gdy wartość kryterium II (minimalizacja czasu) rośnie. Jest to bardzo dobry przykład ukazujący kompromis, jaki trzeba ponieść, jeśli w problemie rozważa się więcej niż jedno kryterium - minimalizacja jednego kryterium odbywa się kosztem wzrostu innych kryteriów (w przypadku minimalizacji). W niektórych przypadkach, dobór wartości wag kryteriów powodował, że poziom obsługi był mniejszy, niż 1, co oznacza, że nie wszystkie strefy klientów zostałyby obsłużone, przy założeniu maksymalnego promienia, tu 10 km.



Rys. 3. Analiza wartości kryteriów w zależności od wag w wielokryterialnym programowaniu celowym

W związku z tym, że poziom obsługi powinien być na poziomie 100%, autorzy brali pod uwagę tylko te przypadki gdzie kryterium III było równe 1. Na czerwono zaznaczono optymalny przypadek wartości wag, jakie należałoby wziąć pod uwagę (wg autorów). Wartość ta została wyznaczona, jako znormalizowana minimalna wartość odchylenia od aspiracji 1 dla wszystkich kryteriów. Wartości tych wag wynoszą odpowiednio $w_1 = 0.7$, $w_2 = 0.15$ oraz $w_3 = 0,15$.

Dla takich wartości wag problem optymalizacji sieci logistycznej przy użyciu programowania celowego z alternatywnymi celami został rozwiązany przy pomocy oprogramowania ILOG CPLEX. Wyniki optymalizacji dla powyższych założeń (wariant optymalny) oraz dla dodatkowych czterech wariantów (w celach porównawczych) przedstawia Tabela 2.

Tab. 2. Wyniki optymalizacji sieci dostawa dla poszczególnych wariantów

Wagi	Wariant														
	Optymalny			Minimalny przewóz			Minimalny czas			Maksymalny poziom obsługi			Minimalny przewóz oraz czas		
	0,70	0,15	0,15	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0,5	0,5	0
Kryterium I [t-km]	379870,93			379537,63			393322,36			581247,61			385399,10		
Kryterium II [godz.]	26,50			27,38			25,42			38,75			25,51		
Kryterium III [-]	1,000			0,977			0,889			1,000			0,984		

W celu porównania efektów uzyskanych przez zaproponowaną wielokryterialną metodę tabela powyżej przedstawia wartości funkcji kryterialnych dla wariantów symulacji:

- Wariant optymalny - optymalizacja wielokryterialna dla wag wybranych w wyniku poprzedniej analizy,
- Wariant minimalny przewóz - optymalizacja jednokryterialna, celem jest minimalizacja pracy przewozowej całej sieci,
- Wariant minimalny czas - optymalizacja jednokryterialna, celem jest minimalizacja czasów przejazdów pomiędzy elementami całej sieci,
- Wariant maksymalny poziom obsługi - optymalizacja jednokryterialna, celem jest maksymalizacja poziomu obsługi całej sieci. Wariant ten nie bierze pod uwagę innych kryteriów, więc rozwiązanie przedstawia pierwsze dopuszczalne rozwiązanie znalezione przez program optymalizujący. Stąd takie wysokie wartości dla kryteriów I oraz II.
- Wariant minimalny przewóz i czas - optymalizacja bi-kryterialna, której celami są minimalizacja pracy przewozowej oraz minimalizacja czasów przejazdów pomiędzy elementami całej sieci. Wariant ten został wzięty pod uwagę, ponieważ właśnie te dwa kryteria są najczęściej wybieranymi kryteriami w problematyce przydziału.

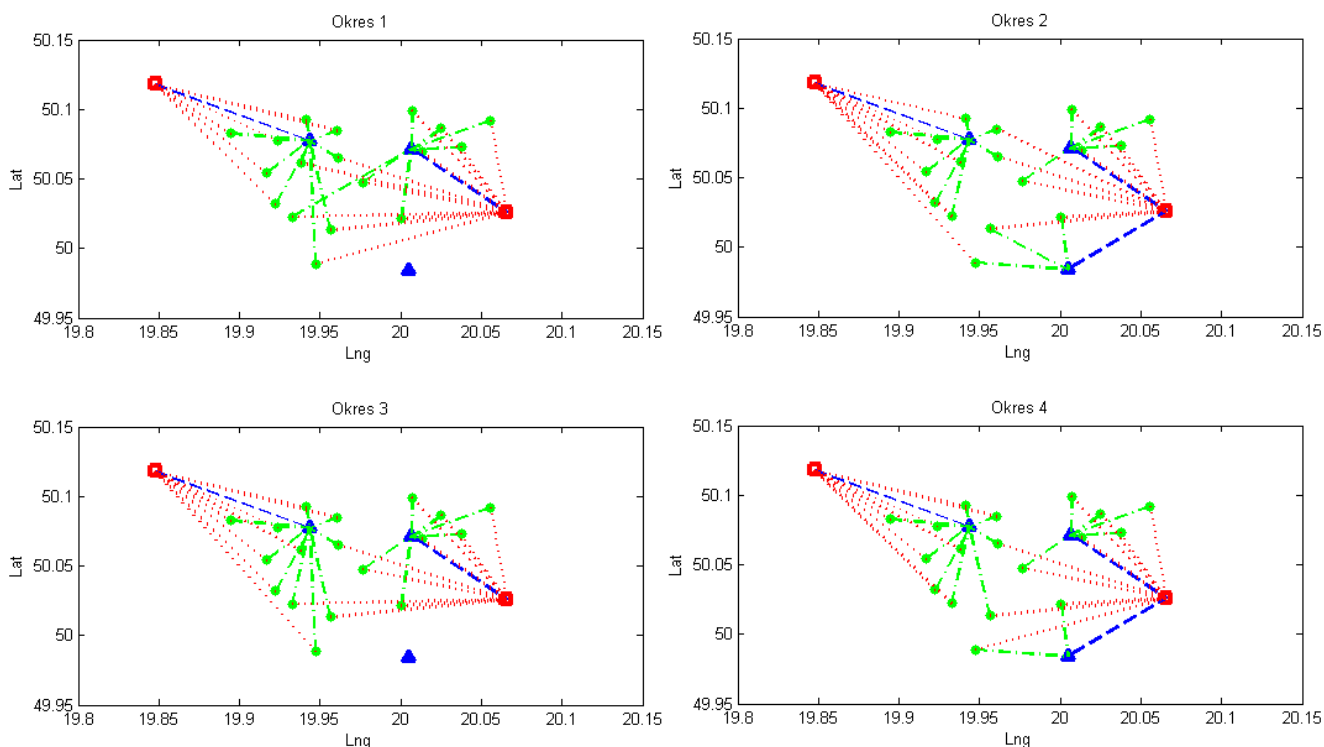
Dodatkowo w Tab. 3. przedstawiono spadki/wzrosty wartości poszczególnych funkcji kryterialnych w stosunku do wariantu optymalnego dla pozostałych wariantów.

Tab. 3. Spadek/wzrost wartości funkcji kryterialnych w stosunku do wariantu optymalnego dla pozostałych wariantów

	Minimalny przewóz	Minimalny czas	Maksymalny poziom obsługi	Minimalny przewóz oraz czas
Kryterium I	-0,09%	3,54%	53,01%	1,46%
Kryterium II	3,36%	-4,05%	46,24%	-3,71%
Kryterium III	-2,30%	-11,08%	0,00%	-1,60%

Z powyższych tabeli można zaobserwować jeden główny wniosek - stosowanie modeli jednokryterialnych, może prowadzić do rozwiązań, gdzie poziom obsługi klientów może być mniejszy niż 100%. Nawet przy stosowaniu razem bardzo popularnych kryteriów tj. minimalizacja czasu oraz pracy przewozowej, może generować ten sam efekt. W analizowanym przypadku można również zauważyć, że wariantach gdzie poziom obsługi jest mniejszy niż 100%, praca przewozowa rośnie. Jest to dość logiczny wniosek, ponieważ brak ograniczenia związanego z maksymalnym promieniem obsługi, sprawi, że strefy klientów zostaną przypisane do dalszych punktów zbiórki, powodując wzrost pracy przewozowej.

Kolejną zaletą proponowanego modelu jest uwzględnienie dynamizmu, jaki może wystąpić w popycie czy w kosztach pomiędzy elementami sieci. Dynamizm ten wpływa na optymalne powiązania w strukturze sieci logistycznej i można go zaobserwować na Rys. 4. Przedstawia on rozwiązanie dla wariantu optymalnego. Przerywana, kropkowana, czerwona linia określa przypisanie stref klientów do centrów dystrybucji, przerywana zielona linia typu kreska - kropka przedstawia przypisanie stref klientów do punktów zbiórki, a linia przerywana niebieska przedstawia przypisanie punktów zbiórki do centrów dystrybucji. W analizowanym problemie występują trzy typy powiązań elementów sieci, w których zmiana parametrów modelu dla każdego horyzontu powoduje różnice we wszystkich tych powiązaniach. Dla przykładu w okresie 1 oraz 3 optymalne rozwiązanie, wskazuje, że jeden z punktów zbiórki powinien być nieczynny.



Rys. 4 Połączenia pomiędzy elementami analizowanej sieci dla czterech horyzontów czasowych.

WNIOSKI

Efekty przeprowadzonych badań i symulacji pokazują, iż struktura powiązań pomiędzy elementami sieci dostaw może być elastyczna, co umożliwi szybkie dopasowanie do aktualnych trendów na rynku oraz losowych czynników zewnętrznych oddziałujących na sieć. Zaproponowane w artykule podejście pokazuje podstawę integracji zadań w ramach logistyki typu *forward* i *reverse* celem zwiększenia wydajności realizacji postulowanych celów UE w zakresie bardziej racjonalnego zużycia zasobów oraz idei zrównoważonego rozwoju. Na podstawie przykładu obliczeniowego można stwierdzić, iż wielokryterialne podejście do rozwiązania omawianego problemu jest w pełni uzasadnione i właściwe. W rzeczywistości, bowiem na podjętą decyzję przez decydenta ma wpływ szereg czynników w różnym stopniu. Umiejętne zweryfikowanie kryteriów, stopnia ich realizacji a także metody rozwiązywania może w znaczący sposób przesądzić, o jakości osiągniętego rezultatu. Zastosowana do rozwiązania przykładu rozszerzona wielokryterialna metoda programowania celowego w dość reprezentatywny sposób odzwierciedla rzeczywistość poprzez umożliwienie decydentowi doboru kilku pożądaných celów w zakresie danego kryterium. Idea zintegrowanych sieci dostaw w aspekcie nowoczesnych systemów logistycznych wymaga wielokryterialnego podejścia do rozwiązywania problemów decyzyjnych, celem osiągnięcia przez przedsiębiorstwa wielowymiarowych korzyści. Dlatego podejmowana w pracy problematyka wymaga dalszego rozszerzenia. Przyszłe badania będą miały na celu przeprowadzenie studium przypadków w oparciu o dane rzeczywiste celem zweryfikowania modelu w warunkach istniejących.

Streszczenie

Celem niniejszego artykułu jest propozycja wielokryterialnego podejścia do optymalizacji sieci logistycznej z uwzględnieniem aspektów logistyki zwrotnej. Podstawą omawianej problematyki w pracy jest próba dokonania integracji zadań logistyki typu *forward* oraz logistyki zwrotnej. Problem optymalizacji struktury sieci logistycznej był podejmowany niejednokrotnie w literaturze, niemniej jednak problematyka zintegrowanych sieci logistycznych nie jest w dalszym ciągu wystarczająco doceniona. Istniejące międzynarodowe regulacje prawne w ramach ochrony środowiska, coraz większa świadomość ekologiczna społeczeństw a także wizja możliwych korzyści dla firm uczestniczących w sieci dostaw stanowią kluczowy element, który w naturalny sposób wymusza wzajemną integrację zadań tradycyjnej logistyki oraz zwrotnej.

W celu zapewnienia wymaganego poziomu efektywności i niezawodności systemu, problem projektowania struktury sieci logistyki typu forward oraz reverse nie może być rozpatrywany oddzielnie. Sformułowany w artykule model decyzyjny ma na celu minimalizowanie łącznych kosztów transportu wewnątrz sieci, całkowitego czasu jazdy oraz maksymalizację poziomu obsługi klienta. Model uwzględnia również niepewność w stosunku do popytu oraz podaży towarów a także zmienność warunków ruchu, według przyjętego horyzontu czasowego. Rozpatrywany problem został zweryfikowany w oparciu o przykład obliczeniowy. Przedstawiony problem optymalizacyjny został rozwiązany z wykorzystaniem rozszerzonej metody programowania celowego.

Multi criteria optimization of supply in logistic network, considering aspects of reverse logistics

Abstract

The purpose of this article is to propose multi – criteria wide approach to optimization of supply in logistics network, taking into account issues of reverse logistics. The basis of the considered in the work topic is extension of that problem respecting the need for the integration of forward and reverse logistics activities. So far there were many researches addressing the problem of logistics network design both forward and reverse. However the issue of integrated logistics networks is still underestimated. Currently the existing international legal requirements, pressures for environment protection and economic benefits for stakeholders are the key factors, which naturally forcing the need of integration of the forward and reverse logistics networks. Furthermore the flows under reverse and forward logistics activities are interrelated. In order to provide required level of performance and reliability of the whole system, the design of forward and reverse networks can't be considered separately. Instead the establishing of integrated flexible logistics networks is highly recommended. Formulated in this paper decision model takes into consideration the object of minimizing the total transportation cost, total traveled time and maximizing customer level of service, respecting the uncertainty of supply and demand for goods delivered and returned at planning time horizon. The issue was examined by numerical illustrative example. To solve the problem a goal programming method has been used.

BIBLIOGRAFIA

1. Blunberg D., Introduction to Management of Reverse Logistics and Closed Loop Supply Chain Processes, CRC Press 2005
2. Chang C.T., Multi-choice goal programming, Omega, Vol. 35, Issue 4, August 2007, Pages 389-396,
3. European Environment Agency, "Consumption and the environment", Publications Office of the European Union, Copenhagen, 2010
4. <http://www.bankier.pl/wiadomosc/Zuzyty-sprzet-na-wage-zlota1576893.html>; [dostęp 01.02.2014]
5. Jurasz F., Gospodarka surowcami wtórnymi, PWN, Warszawa 1989, s30 – 31.
6. Krzyzanowski, Kuna-Dibbert, Schneider, "Health Effects of Transport related Air Pollution", WHO Regional Office for Europe, Denmark 2005
7. Li S., Wang N., He Z., Che A., Ma Y., "Design of a Multiobjective Reverse Logistics Network Considering the Cost and Service Level", [in:] Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2012
8. Salema, M., Barbosa-Povoa, A., Novais, A., Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: a generic modelling formulation. European Journal of Operational Research 203, 2010, s 336–349.
9. Shen ZJ. Integrated supply chain design models :a survey and future research directions. Journal of Industrial and Management Optimization 2007;3 (1):1–27
10. Simchi-Levi D., Kaminsky P., Managing the supply chain: the definitive guide for the business professional. Boston:IrwinMcGraw-Hill;2004.
11. Sonia R. Cardoso, Ana Paula F.D. Barbosa-Povoa, Susana Relvas, Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty., European Journal of Operational Research 226, 2013, s 436–451
12. Srivastava, S., 2007. Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. International Journal of Management Reviews 9 (1), 53–80.

13. Szołtysek J., Logistyka zwrotna, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2009
14. Uster, H., Easwaran, G., Akcali, E., Cetinkaya, S., Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. *Naval Research Logistics* 54, 2007, s 890–907.