

Antoni KORCYL*

OPTYMALIZACJA TRANSPORTU SUBSTANCJI NIEBEZPIECZNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM PRZEPUSTOWOŚCI TRAS I PRAWDOPODOBIENSTWA WYSTĄPIENIA AWARII PODCZAS TRANSPORTU

Streszczenie:

W artykule zaproponowano model matematyczny problemu optymalizacji transportu ładunków niebezpiecznych uwzględniający możliwość oraz przepustowość tras transportu niebezpiecznych substancji. W modelu uwzględniono także prawdopodobieństwo wystąpienia awarii w miejscu składowania lub wypadku na trasie transportu substancji niebezpiecznej. Decyzje o transporcie niebezpiecznych substancji, uruchomieniu miejsc przetwarzania i utylizowania substancji oraz miejsc składowania substancji, które nie zostaną poddane utylizacji, zależą od miejsc, w których są one generowane, topologii ich możliwego transportu oraz technicznych możliwości ich dalszego zagospodarowania uwzględniającego przepustowość tras oraz prawdopodobieństwo wystąpienia awarii późniejszych kosztów z tym związanych.

Słowa kluczowe: transport substancji niebezpiecznych, lokalizacja, przepustowość tras, prawdopodobieństwo awarii, składowanie

1. WSTĘP

Masowa produkcja oparta jest na wykorzystaniu różnorodnych substancji organicznych i związków chemicznych. Substancje te są wykorzystywane dla potrzeb komunalnych, rolnych, opieki zdrowotnej i w budownictwie powodując generowanie bardzo dużej ilości odpadów, które wprowadzane są do środowiska w postaci stałej, ciekłej i gazowej. Wprowadzanie tych substancji do środowiska jest mniej lub bardziej kontrolowane zarówno przez producentów jak i finalnych konsumentów. Substancja staje się odpadem, gdy nie ma możliwości na ponowne jej wykorzystanie (recykling), lub wykorzystanie jej naturalnych właściwości do innych produktów.

2. SUBSTANCJE NIEBEZPIECZNE I ICH TRANSPORT

W celu ochrony przed szkodliwym wpływem substancji niebezpiecznych na zdrowie ludzi lub na środowisko, wprowadzono szereg przepisów, określających zasady postępowania z nimi niemal na każdym etapie produkcji, wykorzystania czy zagospodarowania pozostałości.

Substancje niebezpieczne wg rozporządzenia Ministra Zdrowia możemy podzielić na następujące substancje i preparaty:

- o właściwościach wybuchowych;
- o właściwościach utleniających;
- skrajnie łatwopalne;
- wysoce łatwopalne;
- łatwopalne;
- bardzo toksyczne;

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Zarządzania

- toksyczne;
- szkodliwe;
- żrące;
- drażniące;
- uczulające;
- rakotwórcze;
- mutagenne;
- działające szkodliwie na rozrodczość;
- niebezpieczne dla środowiska.

Produkcowanie i stosowania substancji niebezpiecznych pociąga za sobą konieczność ich przemieszczania. Zagadnienia bezpiecznego transportu drogowego towarów/materiałów niebezpiecznych reguluje w Europie "Umowa Europejska" dotycząca przewozu drogowego towarów niebezpiecznych (ADR). Umowa ADR jest nowelizowana co dwa lata w roku nieparzystym. Od 1 stycznia danego roku obowiązuje nieobligatoryjnie (można stosować wersję poprzednią konwencji), od 1 lipca obowiązuje zawsze obligatoryjnie. Aktualnie obowiązująca wersja Umowy ADR to wersja 2011 – która obowiązuje obligatoryjnie od 1 lipca 2011. Umowa wraz z załącznikami określa stosunki prawne między uczestniczącymi państwami i przepisy regulujące w szerokim zakresie warunki przewozu poszczególnych materiałów niebezpiecznych w międzynarodowym transporcie samochodowym. Umowa obowiązuje w 46 krajach Europy

W Polsce 24 października 2011 w Dzienniku Ustaw, nr 227, poz. 1367 została opublikowana Ustawa z dnia 19 sierpnia 2011 r. o przewozie towarów niebezpiecznych, która wchodzi w życie dnia 1 stycznia 2012 r.

Zasady gospodarki odpadami niebezpiecznymi polegają na:

- zapobieganiu i minimalizacji powstawania odpadów niebezpiecznych (przede wszystkim należy zapobiegać powstawaniu odpadów, dążyć do ograniczenia ich ilości i uciążliwości czy szkodliwości),
- odzysku i unieszkodliwianiu odpadów niebezpiecznych (odpady powinny być w pierwszej kolejności poddane odzyskowi lub unieszkodliwianiu w miejscu ich powstawania),
- bezpiecznym dla zdrowia i środowiska składowaniu oraz magazynowaniu odpadów niebezpiecznych (składowanie odpadów na składowiskach powinno być działaniem ostatecznym, stosowanym jedynie wtedy, gdy nie ma innych możliwości ich wykorzystania)

Działania w tym zakresie reguluje w Polsce ustawa dotycząca ochrony środowiska i gospodarki odpadami z 27 kwietnia 2001 r.

3. MODEL MATEMATYCZNY PROBLEMU

Racjonalne gospodarowanie substancjami szkodliwymi i odpadami jest bardzo ważnym problemem decyzyjnym, przed którym stają władze samorządowe, regionalne bądź państwowe. Władze regionalne muszą się zmierzyć z problemem „zagospodarowaniem” odpadów komunalnych, szkodliwych i trujących. Władze regionalne stają przed problemem dużo bardziej skomplikowanym, związanym już nie tylko z samorządowym aspektem gospodarowaniem i utylizowaniem odpadów powstałych na terenie jurysdykcji samorządu (poziom gminy), z którym muszą sobie radzić menedżerowie oraz instytucje powołane do nadzorowania i egzekwowania prawnych uregulowań w tym zakresie. Stosowanie

różnorodnych metod wspomagających podejmowanie decyzji w tym zakresie można znaleźć w literaturze [1,6,9]. Coraz większa ilość niezbędnych informacji oraz regulacje prawne powodują, że podejmowanie decyzji w takim otoczeniu wymaga używania narzędzi wspomagających taki proces. Stosowanie nowoczesnych modeli matematycznych staje się koniecznością. W literaturze znanych jest wiele modeli matematycznych i ich aplikacji dla zrównoważonego zarządzania i utylizacji odpadów [2,3,4,7,8].

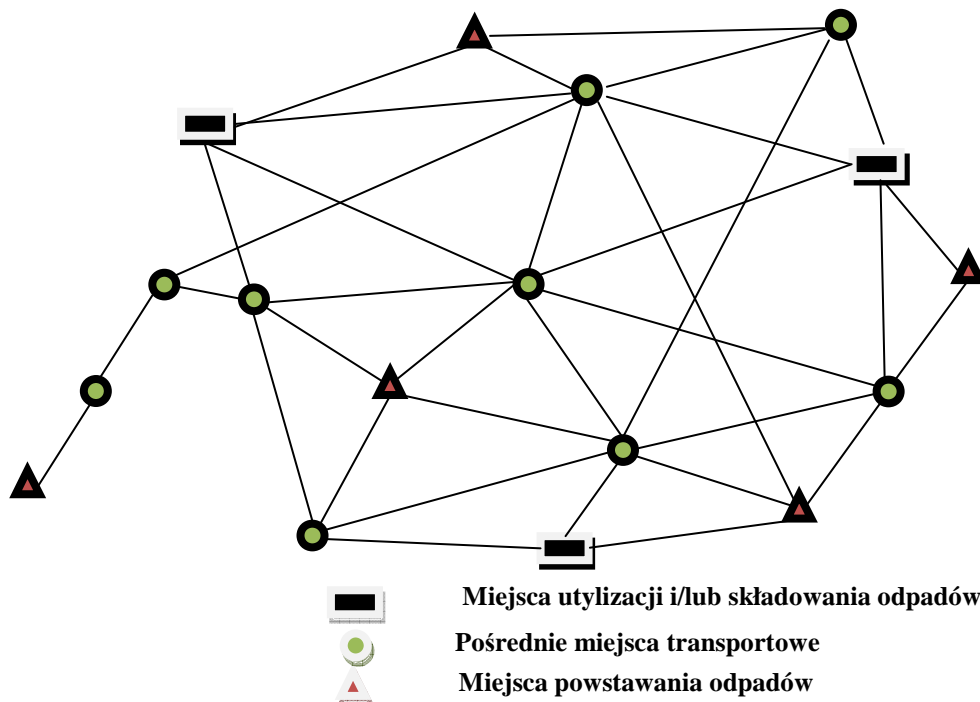
Niebezpieczne odpady generowane problemie optymalizacji transportu ładunków są w miejscach i ($i \in I$). Odpady te są transportowane poprzez punkty pośrednie j ($j \in J$) do miejsc, w których mogą zostać poddane utylizacji k ($k \in K$). Odpady, które ze względu na swoją specyfikę nie mogą zostać poddane utylizacji zostają złożone na składowisku o znanym jednostkowym koszcie składowania. Jednostkowy koszt utylizacji odpadów w każdym z miejsc przetwarzania, utylizowania lub składowania k jest znany, a także jednostkowy koszt składowania odpadów, które nie zostały poddane utylizacji lub są pozostałością po utylizacji. Także jednostkowy koszt uruchomienia zakładu utylizacji odpadów jest znany.

Znane są jednostkowe koszty transportu pomiędzy poszczególnymi wierzchołkami systemu transportowego. Ze względu na to, że transportowane odpady są niebezpieczne, nie każda trasa lub jej fragment jest możliwy do wykorzystania przy ustalaniu marszrutu transportu. Możliwość transportu poszczególnych typów odpadów opisuje odpowiedni parametr α .

Przetwarzanie lub utylizacja odpadów dostarczonych do odpowiednich miejsc może się odbywać za pomocą technologii do tego przeznaczonych. Nie w każdym miejscu można przetwarzać każdy rodzaj odpadów, o czym decyduje parametr β określający dostępność technologii p dla utylizacji odpadów typu o w miejscu k .

Ze względu na to, że mamy do czynienia z transportem, przetwarzaniem i składowaniem substancji niebezpiecznych, w każdym momencie może dojść do awarii lub wypadku, którego skutki mogą być bardzo groźne dla zdrowia, życia ludzi i zwierząt jak i do skażenia środowiska. Konieczne jest zatem wyznaczenie prawdopodobieństwa wystąpienia takiego wypadku lub awarii, które także powinno mieć wpływ na podejmowanie decyzji o transporcie, przetwarzaniu czy składowaniu odpadów w poszczególnych miejscach i trasach. Prawdopodobieństwa takie są wyznaczane na podstawie danych historycznych nie tylko dotyczących rozpatrywanego regionu, na którym się odbywa transport czy utylizacja niebezpiecznych odpadów.

Miejsca przetwarzania odpadów są przygotowane do utylizacji określonych odpadów. W niektórych przypadkach utylizacja tych odpadów może być zrealizowana w 100% tak, że nie pozostają pozostałości niemożliwe do dalszego przetworzenia lub wykorzystania, które muszą być składowane i ponoszone za to składowanie są koszty. W większości przypadków utylizacja odpadów ponosi za sobą koszty związane z składowaniem części nieprzetworzonych związków w miejscu utylizacji lub składowisku pozostałości procesów utylizacji szkodliwych substancji. Przykładowy graf przepływów odpadów w sieci transportowej przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Graf przepływów w sieci transportowej

Sformułowanie problemu minimalizacji kosztów uruchomienia zakładów utylizacji i składowania odpadów oraz transportu niebezpiecznych substancji uwzględniającego prawdopodobieństwo wystąpienia awarii oraz przepustowość tras transportowych wymaga przyjęcia następującej notacji indeksów, parametrów i zmiennych decyzyjnych:

INDEKSY:

i	$i \in I$ - zbiór miejsc powstawania odpadów
j	$j \in J$ - zbiór punktów pośrednich na trasie transportu odpadów
k	$k \in K$ - zbiór miejsc utylizacji i składowani odpadów
o	$o \in O$ zbiór typów odpadów
p	$p \in P$ zbiór technologii do utylizacji odpadów

PARAMETRY:

C_{pk}^s	koszt jednostkowy uruchomienia zakładu utylizacji odpadów w miejscu k z technologią p
C_{opk}^s	koszt jednostkowy utylizacji odpadu o za pomocą technologii p w miejscu utylizacji k
C_{opk}^{so}	jednostkowy koszt składowania(przechowywania) pozostałości z utylizacji odpadu o za pomocą technologii p w miejscu k
C_{oij}^t	jednostkowy koszt transportu odpadów typu o pomiędzy wierzchołkami $i - j$
G_{oi}	ilość odpadów typu o powstających w wierzchołku i

T_{opk}	ilość odpadów typu o powstających w procesie technologicznym p w wierzchołku k
P_{oij}	prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku podczas transportu odpadu typu o na trasie transportu pomiędzy wierzchołkami $i-j$
P_{opk}^p	prawdopodobieństwo wystąpienia awarii (wypadku) w miejscu przetwarzania/składowania k odpadu typu o podczas procesu technologicznego p
P_{opk}^s	prawdopodobieństwo wystąpienia awarii (wypadku) w miejscu składowania k nieprzetworzonych odpadów typu o po procesie technologicznym p
Z_{oij}	przepustowość trasy pomiędzy wierzchołkami $i-j$ podczas transportu odpadu typu o
α_{oij}	parametr dostępności odcinka trasy pomiędzy wierzchołkami $i-j$ dla transportu odpadu typu o
β_{opk}	parametr dostępności technologii p w miejscu (wierzchołku) k dla utylizacji odpadu typu o
γ_{op}	współczynnik pozostałości z przetwarzania odpadów typu o związanych z technologią p (procentowa ilość odpadów typu o powstających w procesie technologicznym p)
KC	koszt całkowity

ZMIENNE DECYZYJNE

X_{oij}	ilość odpadów typu o przewożonych pomiędzy wierzchołkami $i-j$
Y_{pk}	zmienna decyzyjna = 1 jeżeli oczyszczanie lub likwidacja związana z technologią p odbywa się w miejscu k (w wierzchołku k), =0 inaczej

Model matematyczny problemu optymalizacji transportu ładunków niebezpiecznych uwzględniający możliwości przetwarzania odpadów w miejscach, w których jest zainstalowana odpowiednia technologia oraz istnieją możliwości składowania pozostałości po procesie utylizacji lub przy braku takiej możliwości składowanie odpadu uwzględniający prawdopodobieństwo wystąpienia awarii/wypadku podczas transportu oraz przepustowość tras przedstawia się następująco:

Funkcja celu minimalizuje całkowity koszt uruchomienia zakładów, w których może nastąpić utylizacja odpadów niebezpiecznych, koszty składowania w tych miejscach pozostałości po utylizacji bądź odpadów niepodlegających utylizacji a możliwych do składowania w tym miejscu, a także kosztów transportu niebezpiecznych substancji od miejsca ich powstawania do miejsca utylizacji lub składowania poprzez punkty pośrednie. W funkcji celu uwzględniono prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku podczas transportu lub awarii(wypadku) podczas utylizacji lub składowania

$$\begin{aligned}
 MIN Z = & \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (C_{pk}^s Y_{pk}) + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{o \in O} \left[\frac{1}{1 - P_{opk}^p} (T_{opk} C_{opk}^s) \right] + \\
 & \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{o \in O} \left[\frac{1}{1 - P_{opk}^s} (\gamma_{opk} T_{opk} C_{opk}^{so}) \right] + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{o \in O} \left[\frac{1}{1 - P_{oij}} (X_{oij} C_{oij}^t) \right]
 \end{aligned}$$

Przy ograniczeniach

$$\sum_{j \in J} [\alpha_{oij} X_{oij} - \alpha_{oji} X_{oji}] + \sum_{k \in K} [\alpha_{oik} X_{oik} - \alpha_{oki} X_{oki}] = G_{oi} \quad \forall i, o \quad (1)$$

Ograniczenia (1) dotyczy miejsc gdzie generowane są niebezpieczne odpady. Ograniczenie to zapewnia, że ilość powstałych odpadów musi być dalej transportowana do wierzchołków pośrednich lub bezpośrednio do miejsc utylizacji tych odpadów albo miejsca ich składowania, jeżeli istnieje taka możliwość utylizacji lub składowania.

$$\sum_{i \in I} [\alpha_{oij} X_{oij} - \alpha_{oji} X_{oji}] + \sum_{k \in K} [\alpha_{oik} X_{oik} - \alpha_{oki} X_{oki}] = 0 \quad \forall j, o \quad (2)$$

Ograniczenie (2) dotyczy wierzchołków pośrednich. W wierzchołkach pośredniczących w transporcie niebezpiecznych substancji ilość wpływających substancji do j -tego wierzchołka musi być równa ilości substancji wypływających z tego wierzchołka do wierzchołków pośrednich lub wierzchołków generowania odpadów (istnieje taka możliwość, gdy inny rodzaj odpadów jest transferowany przez dany wierzchołek) lub do wierzchołków, w których odpady zostaną poddane utylizacji lub składowaniu w postaci nieprzetworzonej, gdy składowisko umożliwi takie działanie

$$\sum_{o \in O} \left[\sum_{i \in I} [\alpha_{oki} X_{oki} - \alpha_{oik} X_{oik}] + \sum_{j \in J} [\alpha_{okj} X_{okj} - \alpha_{ojk} X_{ojk}] + T_{opk} \right] = 0 \quad \forall k, p \quad (3)$$

$$T_{wpk} - V_{pk} \beta_{opk} \leq 0 \quad \forall o, k, p \quad (4)$$

Ograniczenie (3) oraz (4) zapewniają, że ilość odpadów, które dotrą do k -tego wierzchołka (miejsca utylizacji lub składowania) zostaną przetworzone, jeżeli możliwości techniczne przetwarzania lub składowania pozwolą na to.

$$\sum_{w \in W} [T_{wpk}] \leq V_{pk} \quad \forall k, p \quad (5)$$

$$\sum_{o \in O} \left[\sum_{i \in I} [X_{oki} - X_{oik}] + \sum_{j \in J} [X_{okj} - X_{ojk}] - \gamma_{op} T_{opk} \right] = 0 \quad \forall k, p \quad (6)$$

Ograniczenia (5) i (6) związane są z możliwościami przetwarzania odpadów w miejscu k lub pojemnością składowiska odpadów nieprzetworzonych oraz ilości generowanych w wyniku przetwarzania odpadów, które już nie będą mogły być wykorzystane

$$X_{oij} \leq Z_{oij} \quad \forall i, j, o \quad (7)$$

Ograniczenie (7) dotyczy przepustowości tras, przez które transportowane są niebezpieczne odpady.

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} (C_{pk}^s Y_{pk}) + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{o \in O} (T_{opk} C_{opk}^s) + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{o \in O} (\gamma_{opk} T_{opk} C_{opk}^{so}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{o \in O} (X_{oij} C_{oij}^t) = KC \quad (8)$$

Ograniczenie (8) pozwala na wyliczenie rzeczywistego kosztu transportu, utylizacji i składowania niebezpiecznych odpadów, uwzględniające przepustowość tras i prawdopodobieństwo wystąpienia awarii lub wypadku.

PODSUMOWANIE

W zaproponowanym modelu podstawą podjęcia decyzji jest minimalizacja kosztów transportu, utylizacji i przechowania niebezpiecznych substancji. Minimalizacja kosztów uwzględnia także prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku lub awarii. Sama możliwość określenia prawdopodobieństwa wypadku lub awarii na podstawie danych historycznych nie daje możliwości uwzględnienia skutków finansowych tego typu sytuacji. Wynika to z braku ze względu na brak możliwości określenia zakresu. Przeprowadzone symulacje komputerowe w oparciu o zapis matematyczny modelu [10] i dane generowane losowo, wykazały, że zaproponowany model matematyczny problemu może mieć zastosowanie w praktyce podejmowania decyzji związanych z transportem, utylizacją i składowaniem odpadów.

Dalsze prace powinny być prowadzone w celu uwzględnienia wpływu awarii na ludzi i środowisko i prób uwzględnienia kosztów ponoszonych na usunięcie skutków sytuacji kryzysowych.

LITERATURA

- [1] Budnick F.S., McLeavey D., Mojena R.: *Principles of Operations Research for Management*. IRWIN, Homewood, Illinois, 1988 i następne wydania.
- [2] Fleischmann M., Bloemhof-Ruwaard J.M., Dekker R., van der Laan E., van Nunen J., van Wassenhove L.: *Quantitative models for reverse logistics: A review*. European Journal of Operational Research, vol. 103(1997), s. 1-17, Elsevier.
- [3] Harkness J., ReVelle Ch.: *Facility location with increasing production costs*. European Journal of Operational Research, vol. 145(2003), s. 1-13, Elsevier.
- [4] Hesse Owen S., Daskin M. S.: *Strategic facility location: A review*. European Journal of Operational Research, vol 111(1998), s. 423-447, Elsevier.
- [5] Kloek W., Blumenthal K.: *Environment and energy*, Eurostat, 2009
- [6] Klose A., Drexl A.: *Facility location models for distribution system design*, European Journal of Operational Research, vol. 162(2005), s. 4-29, Elsevier
- [7] Korcyl A., *Optymalizacja transportu ładunków niebezpiecznych*. Logistyka; nr 2, 2011 ISSN 1231-5478
- [8] Nema A.K, Gupta S.K, :*Optimization of regional hazardous waste management systems:an improved formulation*, Waste Management 19, s.441-451, 1999, Elsevier
- [9] Morrissey A.J., Browne J., : *Waste management models and their application to sustainable waste management*, Waste Management 24, s.297-308, Elsevier, 2004.
- [10] Schrage L., Cunningham K.: *LINGO, Optimization Modeling Language*. LINDO Systemc Inc., C

OPTIMIZATION OF TRANSPORT OF DANGEROUS SUBSTANCES, TAKING INTO ACCOUNT THE CAPACITY OF ROUTES AND THE LIKELIHOOD OF AN ACCIDENT DURING TRANSPORT

Abstract

The article proposes a mathematical model optimization problem taking into account the transport of hazardous cargo throughput of transport routes of hazardous substances. The model also takes into account the probability of failure in the place of storage or transport accident on the route sheet. Decisions on transport of dangerous substances, start of treatment and disposal of substances and storage of substances that are not recycled, depend on the places where they are generated, the topology of the possible transport and the technical possibilities for their further development takes into account the capacity of routes and the likelihood of failure and the later associated costs.

Keywords: transportation of hazardous substances, location, route capacity, the probability of failure, storage