

Antoni KORCYL\*

## OPTYMALIZACJA TRANSPORTU ŁADUNKÓW NIEBEZPIECZNYCH

### Streszczenie

W artykule zaproponowano model matematyczny problemu optymalizacji transportu ładunków niebezpiecznych. Decyzje o przepływie niebezpiecznych ładunków, uruchomieniu zakładów (miejsc przetwarzania i utylizowania odpadów) oraz składowisk odpadów zależą od miejsc, w których są one generowane, topologii ich możliwego transportu oraz technicznych możliwości ich dalszego zagospodarowania.

**Słowa kluczowe:** transport ładunków niebezpiecznych, problem lokalizacji, optymalizacja, składowanie

### 1. WSTĘP

Nowoczesne społeczeństwa charakteryzuje rozwój gospodarki a co za tym idzie przemysłu, a wytwarzanie odpadów w procesie produkcyjnym jest nieuniknionym wynikiem postępu technicznego. Masowa produkcja różnych środków opartych na związkach chemicznych dla potrzeb komunalnych, rolnictwa, urbanizacji, opieki zdrowotnej prowadzi do generowania bardzo dużych ilości odpadów, które są wprowadzane w sposób mniej lub bardziej kontrolowany do środowiska w postaci stałej, ciekłej i gazowej. Substancja staje się odpadem, gdy nie ma możliwości na ponowne jej wykorzystania, a w szczególności na wykorzystanie jej naturalnych właściwości.

### 2. ODPADY A GOSPODARKA NARODOWA

Przemysł stał się ważną częścią nowoczesnego społeczeństwa, a tworzenie odpadów jest nieuniknionym wynikiem postępu technicznego. Masowa produkcja różnych środków chemicznych i energii oraz urbanizacja czy opieka zdrowotna, prowadzą do uwolnienia olbrzymich ilości odpadów do środowiska w postaci stałej, ciekłej i gazowej.

Odpady mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla ludzkiego zdrowia, środowiska (ziemia, powietrze, woda), jeśli nieodpowiednio się z nimi obchodzi, transportuje, składowuje.

Najbardziej skomplikowana jest utylizacja, składowanie lub pozbywanie się odpadów stałych, gdyż nie zawsze jest to możliwe w zakładach produkcyjnych. Takie odpady wymagają specjalnych metod gromadzenia i postępowania.

Stopień niebezpieczeństwa odpadów zależy od wielu czynników, takich jak:

- Forma fizyczna (skład, reaktywność, ilość)
- Wpływ biologiczny i ekologiczny
- Trwałość
- Wpływ na zdrowie
- Wpływ na środowisko.

---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Zarządzania

Bazując na definicji odpadów wg Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska, odpady mogą być klasyfikowane, jako niebezpieczne, jeśli posiadają jedną z wymienionych czterech cech:

- A. zapalność
- B. substancja żrąca
- C. reaktywność
- D. toksyczność.

Odpady te zanieczyszczają wody gruntowe, rzeki, jeziora, powietrze, mogą powodować pożary a czasem eksplozje oraz poważne schorzenia poprzez zanieczyszczanie żywności, oraz bezpośredni kontakt.

Większość odpadów jest tworzona przez przemysł chemiczny i petrochemiczny, które produkują różnego rodzaju środki chemiczne potrzebne obecnemu społeczeństwu.

Na rynku znajduje się ponad 60 000 różnych komercyjnych środków chemicznych, co roku na rynek wprowadzanych jest około 1 000 nowych produktów. W dodatku, obecnie dostępnych jest w przybliżeniu około 35 000 pestycydów, 8 600 konserwantów żywnościowych oraz składników kosmetycznych i medycznych.

Kontakt z niebezpiecznymi odpadami może wywołać następujące skutki dla zdrowia:

- zmiany nowotworowe
- zmiany genetyczne
- uszkodzenia płodu
- zmiany w systemie immunologicznym
- zmiany w systemie nerwowym
- wrodzone nieprawidłowości.

Celem postępowania z niebezpiecznymi odpadami jest fizyczna i chemiczna ich modyfikacja, tak, aby można było je bezpiecznie wywozić i składować. Istnieje kilka technologii (neutralizacja, spalanie, stężanie), które mogą być użyte w całym procesie postępowania z niebezpiecznymi odpadami. Technologie te powodują, że odpady są mniej szkodliwe, toksyczne oraz redukują ich stężenie. Są one charakteryzowane według ich efektywności w postępowaniu z poszczególnymi rodzajami odpadów, pozostałości, kosztów oraz ryzyka z tym związanego:

1. Fizyczny proces postępowania:
  - a) oczyszczanie gazów
  - b) oddzielanie cieczy od ciał stałych
  - c) usuwanie ich właściwości
2. Chemiczny proces postępowania
3. Biologiczny proces postępowania.

Postępowanie i rozmieszczenie niebezpiecznych odpadów w głównym składowisku zależy od rodzaju odpadów. Powinno ono być tak zaplanowane, aby chronić środowisko oraz ludzi przed ich skutkami ubocznymi.

Metodami stosowanymi do końcowego usunięcia niebezpiecznych odpadów są:

- spalanie
- składowanie na wysypiskach specjalnie do tego przygotowanych i zarządzanych lub ogólnodostępnych

- składowanie czasowe lub na stałe w wodach przybrzeżnych
- ługowanie wraz z włączaniem do podziemnych grot.

Niebezpieczne odpady powinny być składowane w miejscach, gdzie nie będą stanowić zagrożenia dla otoczenia. Oto niektóre kryteria brane pod uwagę przy wyborze i ocenie miejsca składowania odpadów:

1. Wysypisko powinno być usytuowane w miejscach mało zaludnionych, na glebach niskowydajnych i potencjalnie niskim zanieczyszczeniu wód gruntowych
2. Zlokalizowane z dala od dolin, naturalnych obniżen terenu, nadmiernych spadów terenu
3. Powinno być ogrodzone lub pod nadzorem
4. Jeżeli to możliwe, powinno być zlokalizowane w miejscach zawierających dużą ilość gliny w związku z niską przepuszczalnością i korzystnymi cechami absorbcyjnymi tego rodzaju gleby
5. Położone w bliskiej odległości od stacji kolejowych i autostrad
6. Główne składy powinny być bliżej zlokalizowane
7. Przewożone odpady do miejsc składowania nie powinny wymagać przeładunku podczas ekspedycji
8. Wszystkie punkty składowania powinny być zlokalizowane w odpowiedniej odległości od zbiorników wody dostarczających wodę dla ludności oraz zwierząt
9. Jeżeli to możliwe, punkty te powinny mieć niskie opady deszczu lub wysokie tempo parowania
10. Należy prowadzić spis wszystkich potencjalnych lokacji, gdzie mogą być gromadzone odpady, aby umożliwić późniejszą ich regenerację. Pomoże to również analizować przyczyny niepożądanych reakcji lub innych problemów powstałych w danym miejscu
11. Niezbędne są szczegółowe analizy lokalizacji miejsc i rodzaju odpadów, aby ocenić długoterminową stabilność i ich odporność na wpływy atmosferyczne i reakcje ze środowiskiem w konkretnie wybranym miejscu
12. Miejsce powinno być ulokowane lub zaprojektowane tak, aby uniemożliwić jakiegokolwiek wycieki mogące powstać w czasie dostawy odpadów
13. Podstawa wysypiska powinna być w wystarczającej odległości powyżej zwierciadła wody gruntowej, aby uniemożliwić przenikanie i przesiąkanie szkodliwych substancji.

W 27 państwach Unii Europejskiej średnio produkuje się ponad 6000 kg na osobę, z czego tylko 423 kg przez gospodarstwa domowe. Więcej niż połowa odpadów generowanych przez gospodarkę powstaje w przemyśle i budownictwie. Około 3% odpadów z produkowanej ilości jest niebezpiecznych dla zdrowia ludzi oraz szkodliwych dla środowiska [5]. Odpady generowane w zakładach przemysłowych mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla ludzkiego zdrowia i środowiska nie tylko w momencie, gdy powstają, ale także podczas transportu do miejsc ich przerobu, utylizacji czy składowania, jeżeli postępowanie z nimi jest niezgodne z regulacjami prawnymi.

Odpady oraz ich przetwarzanie, ponowne wykorzystanie oraz ewentualne ich składowanie w miejscach odpowiednio przygotowanych zgodnie z normami odpowiadającymi ochronie środowiska, to obecnie bardzo poważny problem ekologiczny na świecie. W Polsce ponad 86% zebranych odpadów komunalnych trafia na składowiska (dane GUS z 2009 r.). Natomiast średnia ilość odpadów składowanych na wysypiskach w krajach EU wynosi ok. 47% .

Usprawnienie gospodarki odpadami spełniające normy ochrony środowiska należy dostosować do Krajowego Planu Gospodarki Odpadami. Dokument jest przeznaczony dla całego kraju i został sporządzony w oparciu o ustawę z dnia 27 kwietnia 2001 roku o odpadach (Dz. U. Nr 62, poz.628 oraz z 2002 roku Nr 41, poz. 365 i Nr 113, poz. 984).

Krajowy Plan Gospodarki Odpadami wprowadza obowiązek opracowania odpowiednich planów na szczeblu krajowym, wojewódzkim, powiatowym i gminnym.

### 3. MODEL MATEMATYCZNY PROBLEMU

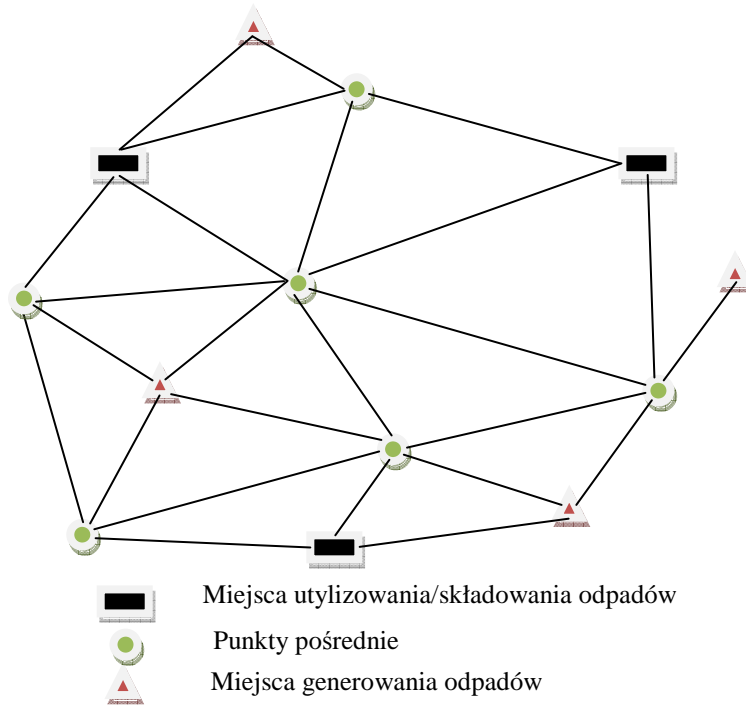
Zarządzanie gospodarką odpadami jest ważnym problemem, z którym muszą sobie radzić menedżerowie oraz instytucje powołane do nadzorowania i egzekwowania prawnych uregulowań w tym zakresie. Dlatego wiele uwagi poświęca się możliwości stosowania różnorodnych metod wspomagających te działania [1,6,8]. W dobie szybkiego postępu informatyzacji i komputeryzacji możliwe stają się do zastosowania metody matematyczne służące do wspomagania podejmowania decyzji w zakresie gospodarki odpadami, a w szczególności z problemami lokalizacji składowisk odpadów oraz ich transportu. W literaturze znanych jest wiele modeli matematycznych i ich aplikacji dla zrównoważonego zarządzania odpadami [2,3,4,7].

W problemie optymalizacji transportu ładunków niebezpiecznych odpady generowane są w miejscach  $i$  ( $i \in I$ ). Następnie odpady są transportowane poprzez punkty pośrednie  $j$  ( $j \in J$ ) do miejsc  $k$  ( $k \in K$ ), w których mogą zostać poddane utylizacji. 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 marszruty transportu. Możliwość transportu poszczególnych typów odpadów opisuje odpowiedni parametr  $\alpha$ .

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  $\beta$  określający dostępność technologii  $p$  dla utylizacji odpadów typu  $o$  w miejscu  $k$ .

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. Przykładową topografię przepływów odpadów przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Przykładowa topografia przepływów

Dla sformułowania problemu minimalizacji kosztów uruchomienia zakładów utylizacji i składowania odpadów oraz transportu niebezpiecznych substancji przyjmijmy następującą notację 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 (wierzchołku)  $k$  dla technologii  $p$
- $C_{opk}^s$         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  $i - j$

**PARAMETRY cd.**

- $G_{oi}$         ilość odpadów typu  $o$  powstających w wierzchołku  $i$
- $T_{opk}$         ilość odpadów typu  $o$  powstających w procesie technologicznym  $p$  w wierzchołku  $k$

$\alpha_{oij}$	parametr dostępności odcinka trasy pomiędzy wierzchołkami $i$ - $j$ dla transportu odpadu typu $o$
$\beta_{opk}$	parametr dostępności technologii $p$ w miejscu (wierzchołku) $k$ dla utylizacji odpadu typu $o$
$\gamma_{op}$	współczynnik pozostałości z przetwarzania odpadów typu $o$ związanych z technologią $p$ (procentowa ilość odpadów typu $o$ powstających w procesie technologicznym $p$ )

### 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 docelowych, w których jest zainstalowana odpowiednia technologia oraz istnieją możliwości składowania pozostałości po procesie utylizacji lub przy braku takiej możliwości składowanie odpadu bezpośrednio w transporcie w odpowiednich warunkach spełniających normy prawne 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 ma postać:

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

#### Przy ograniczeniach

Ograniczenia związane z wierzchołkami, w których generowane są niebezpieczne odpady zapewnia, że ilość odpadów w miejscach ich powstania 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 przedstawione jest poniżej:

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

Kolejne ograniczenie zapewnia, że 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 umożliwia takie działanie

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

Ograniczenie (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.

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

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

Ograniczenia (5) oraz (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, jako związki potrzebne do innych procesów technologicznych lub wykorzystane w innych dziedzinach gospodarki:

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

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

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje komputerowe w oparciu o zapis matematyczny modelu [9] wykazały, że zaproponowany model matematyczny problemu optymalizacji transportu niebezpiecznych substancji wraz z ich utylizacją oraz składowaniem może mieć zastosowanie w praktyce podejmowania decyzji związanych z zarządzaniem odpadami. Oprócz problemu wyboru miejsc przetwarzania i składowania substancji niebezpiecznych, które nie zostały przetworzone wybór, odpowiednich marszrut transportu odpadów jest dokonywany w oparciu o odcinki, które pozwalają na transport niezagrażający ludności, zwierzętom i środowisku.

Przeprowadzone symulacje komputerowe w oparciu o dane generowane losowo powinny być w przyszłości zweryfikowane na danych rzeczywistych. Dalsze prace powinny być prowadzone w celu uwzględnienia innych elementów związanych z transportem i utylizacją substancji niebezpiecznych. Należy uwzględnić takie aspekty jak wpływ szkodliwych substancji na środowisko w przypadku awarii na trasie transportu lub w miejscu przetwarzania/utylizowania czy na składowisku.

## 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] Nema A.K, Gupta S.K, :*Optimization of regional hazardous waste management systems:an improved formulation*, Waste Management 19, s.441-451, 1999, Elsevier
- [8] Morrissey A.J., Browne J., : *Waste management models and their application to sustainable waste management*, Waste Management 24, s.297-308, Elsevier, 2004.
- [9] Schrage L., Cunningham K.,: *LINGO, Optimization Modeling Language*. LINDO Systemc Inc., Chicago, 1991.

## OPTIMIZATION OF HAZARDOUS LOADS TRANSPORTATION

### Abstract

The optimization of hazardous loads transportation mathematical model is presented in this paper. Decisions of the hazardous loads flows and start-up works where the loads are processed depends of places of generation those loads, topology and technical potentiality.