

Aldona Wota, Andrzej Woźniak

METODYKA WYBORU LOKALIZACJI SKŁADOWISK ODPADÓW KOMUNALNYCH

METHODOLOGY OF SELECTING LOCALIZATIONS FOR MUNICIPAL LANDFILL SITES

Streszczenie

Wybór lokalizacji dla składowisk odpadów komunalnych należy do złożonych wielokryterialnych problemów decyzyjnych. W pracy przedstawiono opracowaną metodykę wyboru lokalizacji składowisk odpadów komunalnych, którą oparto o technikę GIS (*Geographic Information Systems*) w połączeniu z wielokryterialną metodą podejmowania decyzji AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Połączenie tych metod umożliwia włączenie różnorodnych czynników zarówno ilościowych, jak i jakościowych i rozwiązanie zadania w sposób holistyczny. Technika GIS pozwala na włączenie kryteriów wynikających z ustaleń prawnych (tzw. kryteriów wykluczających) i przeprowadzenie oceny przestrzennej pod kątem przydatności obszarów do składowania. W efekcie uzyskuje się tereny nadające się do składowania (predysponowane) oraz tereny objęte bezwzględnym zakazem lokalizowania składowisk. Do wyboru najdogodniejszego wariantu lokalizacyjnego ze zbioru obszarów predysponowanych do składowania wykorzystano metodę AHP. W tym celu strukturę zadania przedstawiono w postaci opracowanego modelu hierarchicznego ze skalą oddziaływania. Konstrukcja modelu wymagała odpowiedniego doboru kryteriów i subkryteriów oraz skali oddziaływania poszczególnych subkryteriów na rozważane lokalizacje. Opracowany wielokryterialny model ze skalą oddziaływania jest modelem uniwersalnym – z uwagi na sposób konstruowania – umożliwiającym jego zastosowanie do zagadnień innych niż lokalizacja składowisk.

Słowa kluczowe: lokalizacja składowisk, AHP (*Analytic Hierarchy Process*), GIS, ekologia

Summary

Selection of localizations for municipal landfills belongs to complex multi-criteria decision making problems. The paper presents a methodology developed for selecting localizations for municipal landfills based on Geographic Information System (GIS) technique coupled with Analytic Hierarchy Process (AHP). Joining these two methods makes possible incorporation of various quantitative and qualitative factors and solving the problem in a holistic way. GIS technique enables to include criteria resulting from the legal directives (so called rule-out criteria) and conducting spatial assessment in view of the area usability for waste deposition. In result we obtain areas suitable for waste deposition (predisposed) and the terrains where any localization of landfills is absolutely prohibited. AHP method was used to select the most suitable localization variant from the set of areas predisposed for waste deposition. For this purpose the structure of the task was presented as a developed hierarchy model with the scale of influence. Construction of the model required a proper selection of criteria and sub-criteria, and the scale of influence of individual sub-criteria on the considered localizations. Owing to the method of its construction the developed multi-criteria model with the scale of influence is a universal one and may be applied also for problems other than landfill localization.

Key words: localization of landfill sites, AHP (Analytic Hierarchy Process), GIS, ecologistics

WSTĘP

Unieszkodliwianie odpadów komunalnych poprzez ich składowanie jest jedną z najważniejszych technologii unieszkodliwiania odpadów. Z jednej strony stanowi ostatnie i nieodzowne ogniwo w hierarchii postępowania z odpadami bez którego system nie jest w stanie funkcjonować, z drugiej zaś, ma największe znaczenie dla zdrowia ludzkiego i środowiska przyrodniczego. W Polsce składowanie stanowi w dalszym ciągu podstawową formę unieszkodliwiania odpadów (w 2006 r. deponowano 96% zebranych odpadów). Wydaje się, że składowanie pomimo wprowadzania na większą skalę innych metod w tym np.: kompostowania czy spalania, będzie w najbliższych latach podstawową formą unieszkodliwiania odpadów. Jednym z kluczowych zobowiązań Polski po wejściu do UE w zakresie gospodarki odpadami, powinno być zapewnienie właściwej lokalizacji dla istniejących i przyszłych składowisk. Do 2009 r. mają zostać zamknięte bądź zmodernizowane składowiska, które nie spełniają wymagań ochrony środowiska. Powstawać będą nowe obiekty o funkcjach ponadgminnych. Racjonalna polityka gospodarowania odpadami wymaga, aby już dzisiaj zabezpieczać odpowiednie obszary dla lokalizacji tych obiektów [Wota, Woźniak 2006]. W świetle obecnych uwarunkowań prawnych oraz wymogów wynikających z członkostwa Polski w UE, wszelkie ograniczenia lokalizacyjne wy-

nikają głównie z konieczności ochrony ludności i środowiska przyrodniczego przed szkodliwym oddziaływaniem składowisk.

Analizując literaturę światową z okresu ostatnich kilkunastu lat, zauważa się, że w związku z potrzebą uwzględniania coraz to nowych kryteriów, głównie jakościowych, problem wyboru w swojej strukturze jest wielokryterialny [Erkut, Morgan 1991; Mummolo 1996; Allen i in. 2000–2001; Matsudo i in. 2003; Gemitzi i in. 2007]. Podejście takie jest stosunkowo nowe, gdyż dopiero niedawno w tematyce lokalizacji składowisk, uwzględnianie potrzeb człowieka i otaczającego go środowiska zostało prawnie zagwarantowane. Na gruncie polskim prace podejmujące problematykę wyboru lokalizacji składowisk odpadów komunalnych w świetle nowych uwarunkowań należą wciąż do prac nowych.

Ze względu na fakt, iż wybór lokalizacji składowisk odpadów komunalnych należy do kontrowersyjnych decyzji z powodu konfliktowości interesów różnych stron, **celem** pracy było opracowanie uniwersalnej metodyki wyboru lokalizacji składowisk odpadów komunalnych, która uwzględniałaby złożoność zagadnienia w skali kraju bądź regionu.

METODYKA OPRACOWANIA

Metodykę wyboru lokalizacji składowisk opracowano w taki sposób, aby uwzględniała i spełniała główne cele związane z lokalizacją składowisk odpadów komunalnych. Cele wynikają bezpośrednio z Dyrektywy 99/31/WE z dn. 26.05.1999 r. w sprawie składowania odpadów. Do prawa polskiego zostały wdrożone przez Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 24.03.2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów (Dz.U. Nr 61, poz. 549). Dotyczą one zasadniczo:

- ochrony zdrowia lokalnej społeczności, zagrożonej bliskością składowiska,
- zminimalizowania ujemnego wpływu składowiska na otaczające środowisko,
- bezpiecznego składowania odpadów.

Proces lokalizacji składowisk wymaga obszernej oceny i identyfikacji potencjalnych obszarów do składowania odpadów komunalnych. Trudność analizy zagadnienia wynika z złożoności jego struktury, czyli konieczności rozpatrywania wyboru lokalizacji na tle uwarunkowań różnej natury. Obszary te muszą spełniać wymagania regulacji formalnoprawnych i równocześnie muszą minimalizować koszty ekonomiczne, techniczne środowiskowe czy społeczne. Procedura wyboru powinna włączać maksymalną ilość istotnych informacji i zapewniać, że rezultat wyboru jest optymalny ze względu na zaangażowane strony. W związku z tym pojawia się problem: w jaki sposób dokonać prawidłowego wyboru w sytuacji, kiedy ilość kryteriów jakościowych i ilościowych

(w większości przestrzennych), jakie należy rozpatrzyć, jest na tyle duża, że nie jest możliwym w sposób jednoznaczny wybrać i ocenić obszary do składowania.

Ze względu na znaczną liczbę czynników ograniczających wybór, opracowano dwuetapową metodykę wyboru przy wykorzystaniu technik GIS (*Geographic Information Systems*) i wielokryterialnej metody podejmowania decyzji AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [Wota 2008].

Metodyka składa się z dwóch głównych etapów:

I Wykluczenie obszarów niewłaściwych dla procesu wyboru lokalizacji składowisk odpadów komunalnych (model decyzyjny GIS).

II Wycena zbioru obszarów predysponowanych do składowania (model decyzyjny AHP).

WYKLUCZENIE OBSZARÓW NIEWŁAŚCIWYCH

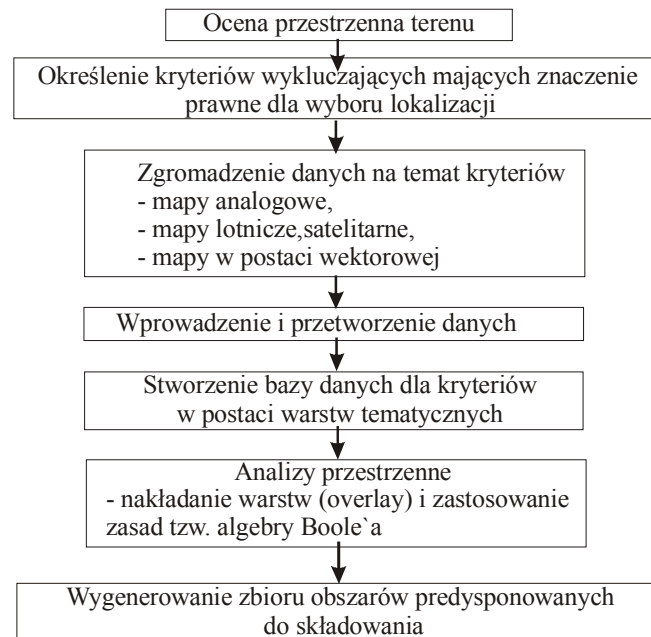
W celu wykluczenia obszarów niewłaściwych dla składowania odpadów komunalnych należy przeprowadzić przestrzenną ocenę terenu pod kątem jego przydatności dla lokalizacji, kierując się uwarunkowaniami prawnymi wynikającymi z wymagań ochrony środowiska. Podstawę do oceny przydatności terenów stanowią kryteria zawarte głównie w Rozporządzeniu... 2003 (tab. 1). Kryteria te, należą do kryteriów wykluczających, czyli takich, które należy bezwzględnie respektować przy wyborze lokalizacji składowisk.

Tabela 1. Kryteria wykluczające na podstawie Rozporządzenia Ministra Środowiska [2003] w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów

Table 1. Rule-out criteria based on Rozporządzenia Ministra Środowiska [2003] concerning specific requirements of localization, construction and closure of individual landfill types

Kryteria wykluczające	
– strefy zasilania głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP), strefy ochrony ujęć wód podziemnych i powierzchniowych,	– doliny rzek, tereny źródłiskowe, bagienne i podmokłe, obszary bezpośredniego lub pośredniego zagrożenia powodzią,
– strefy zasilania użytkowych wód podziemnych (UZWP), sąsiedztwo zbiorników wód powierzchniowych, obszary jeziornych i ich stref krawędziowych,	– tereny zaangażowane glaciciektonicznie lub tektonicznie, tereny spękane lub uszczelinowaconych,
– obszary parków narodowych i ich otulin, obszary lasów ochronnych, obszary rezerwatów przyrody i ich otulin,	– tereny o nachyleniu powyżej 10°, tereny przecinane uskokami,
– strefy osuwisk i zapadlisk terenu (w tym powst. w wyniku zjawisk krasowych oraz zagrożonych lawinami),	– tereny o możliwościach wystąpienia deformacji szkód górniczych,
– tereny wychodni skał zwięzłych porowatych, skrasowiałych i skawernowane,	– gleby klas I i II, obszary ochrony uzdrowiskowej, zabudowa zwarta, lotniska

Uzyskanie informacji o przestrzennym rozmieszczeniu, każdego kryterium wymaga zgromadzenia, przeanalizowania i przetworzenia różnorodnych danych, z różnych źródeł na temat każdego z nich. Do przeprowadzenia wykluczenia terenów na podstawie przyjętych kryteriów, należy zastosować techniki *Systemów Informacji Geograficznej (GIS)*, narzędzie zdolne do przetwarzania i analizowania wszystkich włączonych danych i przedstawiania wyników w formie graficznej (rys. 1).



Rysunek 1. Schemat postępowania dla modelu wykluczającego GIS
Figure 1. Procedure for rule-out GIS model

W wyniku procedury GIS, przy zastosowaniu operacji opartych o algebrę Boole'a, ze wszystkich obszarów teoretycznie możliwych do lokalizacji składowisk, można wybrać jedynie takie, które nie stoją w konflikcie z kryteriami wykluczającymi (albo je spełniają). Dzięki takiej operacji otrzymuje się tereny tzw. predysponowane do składowania.

OCENA OBSZARÓW PREDYSPONOWANYCH DO SKŁADOWANIA

Obszary predysponowane uzyskane w I etapie uważane są jako przydatne do składowania. Jednak niektóre z nich mogą być właściwsze od pozostałych, ze względu na kryteria np. społeczne czy techniczno-ekonomicznych, czy odległo-

ści od terenów wrażliwych, które nie zostały uwzględnione w I etapie. W związku z tym, etap II dotyczy przeprowadzenia rankingu wariantów lokalizacyjnych ze zbioru obszarów predysponowanych do składowania odpadów, ze względu na poziom spełnienia wymogów poszczególnych kryteriów. W tym celu określono i scharakteryzowano najważniejsze elementy, tzw. elementy wartościujące, które stanowiły podstawę do oceny i wyboru miejsca składowania odpadów. Przy wyborze elementów wartościujących w szczególności kierowano się zasadami dotyczącymi uwzględnienia:

- elementów związanych z odległościami od obszarów wykluczonych,
- elementów związanych z obszarami bądź odległościami od obszarów, które należy respektować, jednakże nie podlegają bezwzględnemu wykluczeniu,
- innych elementów nie wymienionych w Rozporządzeniu... 2003.

Do podstawowych najważniejszych elementów wartościujących zagadnienia zaliczono: użytkowanie terenu, lokalną społeczność, geologię i hydrogeologię, odległości od uskoków, hydrologię i ochronę wód powierzchniowych, topografię, widoczność, obszary szczególnie chronione, dziedzictwo kulturowe, odległości od lotnisk, meteorologię, ruch drogowy i jego dostępność, dostępność materiałów izolujących, infrastrukturę i bezpieczeństwo składowiska, strefy buforowe. Z ogólną charakterystyką elementów związanych z lokalizacją wiąże się wpływ różnorodnej liczby czynników, dlatego też, ich ilość i cechy mogą być zmienne w zależności od regionu czy nawet miejscowości.

Do oceny i wyboru optymalnej lokalizacji ze zbioru obszarów predysponowanych opracowano model przy zastosowaniu wielokryterialnej metody podejmowania decyzji AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Unikalnością metody AHP jest złożony wielokryterialny i wielozakresowy model przedstawiony w ujęciu hierarchicznym. Rozwiązanie problemu decyzyjnego przy pomocy AHP przebiega w 4 głównych etapach, połączonych w zintegrowany i logiczny kompleks:

1. Strukturalizacja problemu wielokryterialnego w postaci hierarchicznej. Elementy struktury stanowią zidentyfikowane, wydzielone istotne czynniki mające wpływ na rozwiązanie problemu.

2. Obliczanie priorytetów (wag) lokalnych wszystkich elementów składowych struktury.

Etap składa się z:

– budowy macierzy kwadratowej) ocen porównań parami wydzielonych czynników danego poziomu względem poziomu wyższego. Elementami macierzy są oceny przyjęte na podstawie 9-cio punktowej skali ocen,

– wyznaczenie dla każdej macierzy maksymalnej wartości własnej λ_{\max}

i związanego z tą wartością wektora własnego w ,

3. Sprawdzanie zgodności ocen porównań parami za pomocą wskaźnika zgodności (CI) i współczynnika zgodności (CR),

4. Wyznaczenie priorytetów (wag) globalnych dla poszczególnych wariantów rozwiązania.

Strukturę zadania zbudowano zgodnie z zasadami tworzenia tzw. struktur hierarchicznych ze skalą oddziaływania [Saaty 2004, Wota 2005]. Kompletną opracowaną strukturę problemu ilustruje rysunek 2.

– Poziom I hierarchii składa się z jednego elementu, celu zadania – wybór optymalnej lokalizacji składowisk odpadów komunalnych.

– 20 wybranych subkryteriów rozmieszczono w taki sposób, aby na jednym poziomie nie znajdowało się więcej niż 7 ± 2 elementów. Do hierarchii wprowadzono poziom II pośredni, reprezentowany przez grupę kryteriów o ogólnym znaczeniu opisujących wybór lokalizacji: A – Hydrogeologia i geologia; B – Środowisko naturalne; C – Uwarunkowania społeczne; D – Techniczno-ekonomiczne. W przyjętych kryteriach nie uwzględniono kryterium ekonomicznego związanego z kosztami budowy, eksploatacji i zamknięcia składowiska, ponieważ koszty te są nieznane, gdyż zależą np. od wysokości i technologii składowania, żywotności składowiska, czy przyszłej stopy inflacji. Pośrednie korzyści ekonomiczne uwzględniono natomiast przy ocenie subkryteriów związanych np. z wykorzystaniem surowców lokalnych, czy istniejącej infrastruktury.

– Poziom III hierarchii budują subkryteria, które są bardziej szczegółowym rozwinięciem każdej grupy kryteriów poziomu II.

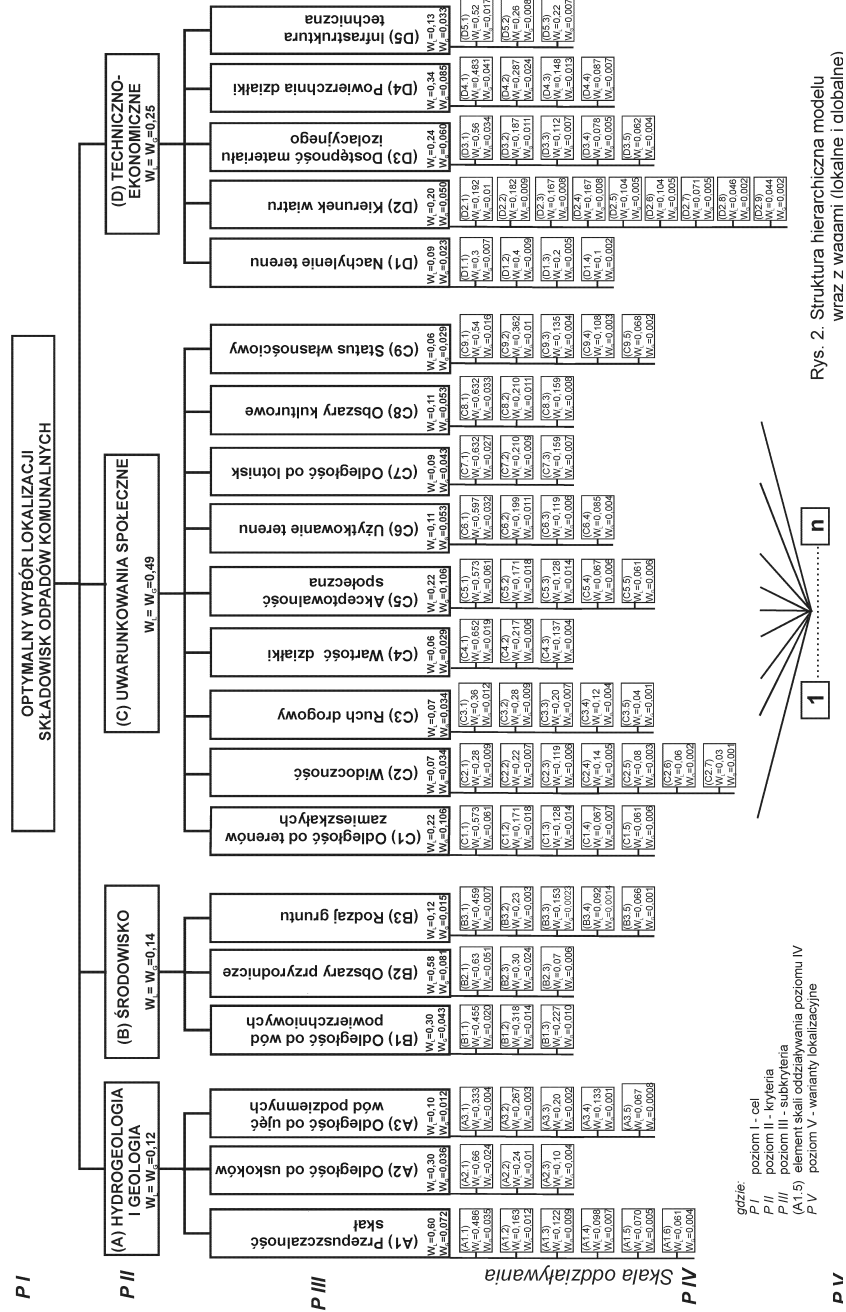
W grupie kryteriów **A - Hydrogeologia i geologia**, wydzielono 3 subkryteria: (A1) Przepuszczalność skał; (A2) Odległość od uskoków; (A3) Odległość od ujęć wód podziemnych.

W grupie **B – Środowisko** – 3 subkryteria: (B1) Odległość od wód powierzchniowych; (B2) Obszary przyrodnicze; (B3) Rodzaj gruntu.

W grupie **C – Uwarunkowania społeczne** – 9 subkryteriów: (C1) Populacja; (C2) Widoczność; (C3) Ruch drogowy; (C4) Wartość działki; (C5) Akceptowalność społeczna; (C6) Użytkowanie terenu; (C7) Odległość od lotnisk; (C8) Obszary kulturowe; (C9) Status własnościowy.

W grupie **D – Techniczno-ekonomiczne** – 5 subkryteriów: (D1) Nachylenie terenu; (D2) Kierunek wiatru; (D3) Dostępność materiału izolacyjnego; (D4) Powierzchnia działki; (D5) Infrastruktura techniczna.

– Na poziomie IV do każdego z 20 zaimplementowanych subkryteriów przypisano przedział liczbowy (skalę oddziaływania), którego elementy opisują stopień oddziaływania poszczególnych subkryteriów na rozważane lokalizacje. Określono również bufor, czyli minimalną odległość pomiędzy składowiskiem a odbiornikiem (receptorem) w celu zmniejszenia aktualnego lub potencjalnego ryzyka zanieczyszczenia środowiska. Bufor należy traktować jako element wykluczający (tab. 4 i 5).



Rysunek 2. Struktura hierarchiczna problemu i wagi globalne i lokalne
Figure 2. Hierarchical structure of the problem with local and global weights of estimation

– Ostatni V poziom modelu (podstawa hierarchii) reprezentowany jest przez alternatywne lokalizacje. Liczba alternatywnych lokalizacji nie stanowi ograniczenia dla modelu.

Przedstawiona na rysunku 2 struktura hierarchiczna stanowiła podstawę do obliczeń analitycznych, czyli do oceny ważności wszystkich jej elementów składowych. Ocena ważności wyrażono w postaci priorytetów (wag). Ocena przeprowadzono kierując się trendami literatury światowej.

Dla każdego czynnika hierarchii obliczono wagi lokalne i globalne. Waga lokalna związana jest z danym poziomem, natomiast globalna jest wynikiem pomnożenia wagi lokalnej elementu danego poziomu z wagą globalną elementu poziomu wyższego.

W celu oceny ważności elementów (cech) składowych budowana jest macierz A o wymiarze $n \times n$ (n – ilość elementów na danym poziomie), ocen porównań parami wydzielonych czynników danego poziomu względem poziomu wyższego.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Wyrazy położone nad przekątną a_{ij} są ocenami ekspertów przyjętych na podstawie skali ocen 1÷9 (tab. 2). Wyrazy położone na przekątnej $a_{ij} = 1$, wyrazy poniżej przekątnej są odwrotnościami wyrazów z nad przekątną $a_{ij} = 1/a_{ij}$

Tabela 2. Skala ocen Saate`ego w AHP (w porównaniach parami)
Table 2. The Saaty's scale in AHP methode (comparison in pairs)

Wartości liczbowe	Skala ważności
1	Jednakowa ważność
3	Nieznaczna ważność
5	Wyraźna ważność
7	Bardzo wyraźna ważność
9	Absolutna ważność
2,4,6,8	Wielkości pośrednie

Na I poziomie zawsze znajduje się jeden element, w związku z tym waga wynosi (1,0). Na poziomie II hierarchii znajdujące się 4 elementy, wyceniono pod kątem ich oddziaływania na element wyżej położony, czyli na optymalny wybór lokalizacji składowisk. Rozwiązano jedną macierz M_{1II} o wymiarze (4x4), będącą wynikiem porównań parami elementów poziomu II względem elementu poziomu I. Na poziomie III hierarchii rozwiązano 4 macierze o wymiarach kolejno: (3x3), (3x3), (9x9), (5x5). Natomiast poziom IV poddany analizie

wymagał wyceny 20 macierzy. Wymiar tych macierzy jest zależny od liczby możliwości rozwiązań przyjętych zgodnie z skalą intensywności subkryteriów.

Bardzo istotnym elementem w metodzie AHP jest 9-stopniowa skala ocen [Saaty1980]. Skala jest uniwersalna i ma szerokie zastosowanie. Pozwala porównywać i oceniać czynniki także jakościowe z ilościowymi.

Proces otrzymania wag kryteriów przedstawiono w tabeli 3. Otrzymane wagi są wynikiem porównań parami elementów poziomu II i odpowiedzią na pytanie, który z porównywanych czynników jest ważniejszy względem poziomu wyższego i w jakim stopniu? Przy wycenie macierzy M_{II} – założono, że najważniejsze są kryteria związane z uwarunkowaniami społecznymi i techniczno-ekonomicznymi, ponieważ kryteria hydrogeologia i geologia oraz środowisko zostały zabezpieczone przez kryteria wykluczające oraz dodatkowo przez strefy buforowe. W wierszu pierwszym i kolumnie trzeciej wpisano liczbę 1/5, symetrycznie poniżej przekątnej jej odwrotność (zgodnie z budową macierzy). Liczba 5 oznacza (zgodnie ze skalą), że uwarunkowania społeczne są wyraźnie ważniejsze niż czynnik hydrologia i hydrogeologia. Jak widać z obliczeń, najważniejszym kryterium (tabela 3) są uwarunkowania społeczne (0,49), zaś najmniej istotnym czynnikiem jest hydrologia i hydrogeologia (0,12). Wycena taka daje czytelny obraz uzyskanych względnych ważności kryteriów (wagi lokalne).

Tabela 3. Macierz M_{II} porównań parami kryteriów w odniesieniu do poziomu I

Table 3. M_{II} matrix of comparison in pairs criteria with reference to level I

	(A)	(B)	(C)	(D)	(wi)
(A) Hydrogeologia i geologia	1	1	1/5	1/4	0,12
(B) Środowisko przyrodnicze	1	1	1/3	1/2	0,14
(C) Uwarunkowania społeczne	5	3	1	2	0,49
(D) Techniczno-ekonomiczne	2	2	1/2	1	0,25
$\lambda_{max}=4,02, CI=0,01, CR=0,01$					$\sum=1$

W analogiczny sposób uzyskano wagi dla niższych poziomów hierarchii. Wyznaczone wagi lokalne i globalne przedstawiono na rysunku 2.

Do oceny popełnianych błędów, bądź niezgodności w wydawaniu opinii przez eksperta/ekspertów wykorzystuje się maksymalną wartość własną macierzy ocen λ_{max} . Czym dalej λ_{max} odbiega od wymiaru macierzy n , tym większe popełnia się błędy w metodzie. Dopuszczalne są błędy 10%, zgodnie ze wzorem:

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \leq 0,1 \quad (1)$$

gdzie:

CI – wskaźnik zgodności (*Consistency Index*) macierzy porównań A ,

n – wymiar macierzy.

Tabela 4. Skala oddziaływania subkryteriów A1-C4
Table 4. Scale of influence of A1-C4 subcriteria

A1. Przepuszczalność skał		B3. Rodzaj gruntu	
Symbol	Stopień rozprzestrzeniania zanieczyszczeń	Symbol	Grundy ilaste
A1.1	Skały nieprzepuszczalne	B3.1	Grundy piaszczysto-gliniaste
A1.2	Skały półprzepuszczalne	B3.2	Grundy gliniaste makroporowate (lessy)
A1.3	Słaba	B3.3	Grundy skaliste różnego pochodzenia
A1.4	Średnia	B3.4	Grundy piaszczysto-żwirowe
A1.5	Dobra	B3.5	Cl. Odległość od zabudowań
A1.6	Bardzo dobra	C1.1	Odł. >2000m od obszarów zamieszkałych niezależnie od rodzaju zabudowy
	A2. Odległość od strefy uskokowej	C1.2	Odł. 1000 ÷ 2000m i nieliczne zabudowania
A2.1	Odległość >300m	C1.3	Odł. 500 ÷ 1000m i nieliczne zabudowania albo 1000 ÷ 2000 luźna zabudowa
A2.2	Odległość 200 ÷ 300m	C1.5	Odł. 500 ÷ 1000m i luźna zabudowa albo 1000 ÷ 2000 i zwarta zabudowa
A2.3	Odległość 100 ÷ 200m	C1.6	Odł. 500 ÷ 1000m i zwarta zabudowa
bufor	Odległość ≤ 100m	bufor	Odł. ≥ 500m
	A3. Odległość od ujęć wód podziemnych		C2. Widoczność
A3.1	Odł. >2000m w górę albo >500 w dół ujęcia	C2.1	Niewidoczne ze względu na morfologię terenu
A3.2	Odł. 1000 ÷ 2000m w górę ujęcia	C2.2	Strefa widoczności > 2000m z terenów zamieszkałych
A3.3	Odł. <500m w dół ujęcia	C2.3	Strefa widoczności w odległości 500-2000m z głównych dróg
A3.4	Odł. 500 ÷ 1000m w górę ujęcia	C2.4	Strefa widzialna w odległości od 1000-2000m od obszarów zamieszkałych
A3.5	Odł. 350 ÷ 500m w górę ujęcia	C2.5	Strefa widzialna w odległości <500m z głównych dróg
bufor	Odł. ≤ 350m w górę ujęcia	C2.6	Strefa widoczności 500-1000m z obszarów zamieszkałych
	B1. Odległość od wód powierzchniowych	C2.7	Strefa widoczności w odległości <500m od obszarów zamieszkałych
B1.1.	Odł. >500m od większych rzek*		C3. Ruch drogowy
B1.2	Odł. 200 ÷ 500m od strumieni i potoków	C3.1	Składowisko nie wpływa na okoliczny ruch drogowy
B1.3	Odł. <200m od strumieni potoków	C3.2	Składowisko ma ograniczony wpływ na okoliczny ruch drogowy
	B2. Obszary przyrodnicze	C3.3	Ograniczony wpływ na przejazd na i z składowiska
B2.1	Odł. > 1000m od granic obszarów parków narodowych i rezerwatów przyrody (i ich otulin), NATURY 2000,	C3.4	Składowisko będzie przyczyną wielu trudności na okoliczny ruch drogowy
B2.2	W obrębie obszarów chronionego krajobrazu		
B2.3	Odł. >500m od granic obszarów parków narodowych i rezerwatów przyrody (i ich otulin), NATURY 2000,	C3.5	Skład. będzie przyczyną poważnych trudności na okoliczny ruch drogowy
bufor	Odł. ≤ 500m od granic obszarów parków narodowych i rezerwatów przyrody (i ich otulin), NATURY 2000,		C4. Wartość działki
	* Liczone od strefy zalewowej rzek, strumieni, potoków	C4.1	Niska cena
	Źródło: opracowanie własne	C4.2	Średnia cena
		C4.3	Wysoka cena

Tabela 5. Skala oddziaływania subkryteriów C5-D5
Table 5. Scale of influence of C5-D5 subcriteria

Symbol	C5. Akceptowalność społeczna	Symbol	D2. Kierunek wiatru
C5.1	Odległość > 10000m	D2.1	S
C5.2	Odległość 5 000 ÷ 10000m	D2.2	E
C5.3	Odległość 2000 ÷ 5000m	D2.3	SE
C5.4	Odległość 1000 ÷ 2000m	D2.4	N
C5.5	Odległość < 1000m	D2.5	NW
C6.1	Łąki i pastwiska	D2.6	NE
C6.2	Tereny przemysłowe	D2.7	SW
C6.3	Tereny przeznaczone pod zabudowę	D2.8	W
C6.4	Grunty orne	D2.9	Kierunki zmienne
C7.1	> 13km	D3. Dostępność materiału przykrywającego (izolujący)	
C7.2	10 - 13km	D3.1	Materiał dostępny w sąsiedztwie składowiska w 100%
C7.3	8 - 10km	D3.2	Materiał dostępny w sąsiedztwie składowiska w 80%
bufor	< 8km	D3.3	Materiał dostępny w sąsiedztwie składowiska 60%
C8.1	Odległość > 1500	D3.4	Materiał dostarczany z zewnątrz obszaru
C8.2	Odległość 1000 ÷ 1500	D3.5	Materiał syntetyczny
C8.3	Odległość 500 ÷ 1000	D4. Powierzchnia działki	
bufor	≥ 500 m	D4.1	> 40 ha
C9.1	1 właściciel (wartość społeczna)	D4.2	30-40 ha
C9.2	2 właścicieli (wartość społeczna i prywatna)	D4.3	25-30 ha
C9.3	3 właścicieli (wartość społeczna)	D4.4	20-25 ha
C9.4	4-5 właścicieli	D5. Infrastruktura	
C9.5	> 5 właścicieli prywatnych	D5.1	Infrastruktura pełna (wod-kan., oczyszczalnia ścieków, sieć elektryczna)
D1.1	0° ÷ 2,5°	D5.2	Infrastruktura – bez kanalizacji
D1.2	2,6° ÷ 5°	D5.3	Infrastruktura – bez wodociągów i kanalizacji
D1.3	5,1° ÷ 7,5°		
D1.4	7,6° ÷ 10°		

Zródło: opracowanie własne

W przypadku, gdy wskaźnik $CI > 0,1$ wycenę w danej macierzy należy powtórzyć. Z wartością własną λ_{max} związany jest jej wektor własny (w), który ma tę własność, że wszystkie jego składowe są większe od zera i dlatego przyjmuje się go jako wektor priorytetów (wag).

Ostatecznie wagi globalne dla ocenianych lokalizacji uzyskuje się ze wzoru:

$$C_i = \sum_{j=1}^n s_j \cdot v_{ij}^l \quad (2)$$

gdzie:

- C_i – waga globalna końcowa dla i -tej ocenianej lokalizacji,
- s_j – waga globalna subkryterium j poziomu III,
- v_{ij}^l – waga lokalna elementu ze skali oddziaływania związana z subkryterium j .

Wielkości wag stanowią podstawę do uporządkowanie zbioru wariantów (ranking wariantów) i wskazanie wariantu najlepszego, czyli tego, który uzyskał najwyższą wagę. Uzyskane wagi lokalne i globalne poszczególnych elementów na danym poziomie modelu stanowią bazę do analizy ich wpływu na wynik końcowy.

PODSUMOWANIE

Przedstawiona w artykule metodyka wyboru lokalizacji składowisk odpadów komunalnych oparta o technikę GIS oraz metodę AHP, umożliwia włączenie różnorodnych czynników zarówno ilościowych, jak i jakościowych oraz rozwiązanie zadania w sposób systemowy.

GIS pozwala na włączenie kryteriów wynikających z ustaleń formalnoprawnych (tzw. kryteriów wykluczających) i przeprowadzenie oceny przestrzennej pod kątem przydatności obszarów do składowania. W efekcie uzyskuje się tereny nadające się do składowania (predysponowane) oraz tereny objęte bezwzględny zakazem lokalizowania składowisk. Metoda wielokryterialna AHP umożliwia rangowanie zbioru obszarów predysponowanych do składowania ze względu na poziom spełnienia wymogów poszczególnych kryteriów. Rangowanie porządkuje rozpatrywane lokalizacje według kryterium przydatności do wykorzystania w charakterze składowiska odpadów.

Opracowany wielokryterialny model ze skalą oddziaływania jest modelem uniwersalnym – z uwagi na sposób konstruowania – umożliwiającym jego zastosowanie do zagadnień innych niż lokalizacja składowisk, np. wybór spalarni. Do modelu bez problemu można włączać nowe elementy jak również opinie ekspertów. Zaletą metody jest łatwość z jaką może być wdrożona, bez ponoszenia dużych nakładów, a co najważniejsze w krótkim czasie, wykorzystując przy tym opracowane już materiały i inne źródła danych.

W aspekcie praktycznym zaproponowana metodyka może służyć władzom lokalnym jako narzędzie podejmowania decyzji w procesie formułowania strategii oraz planowania i zarządzania gospodarką odpadami. Społeczeństwu natomiast jest w stanie przedstawić złożoność problematyki wyboru proponowanych lokalizacji tak, aby mogli wyrazić swoją akceptację.

BIBLIOGRAFIA

- Allen A., Costa C. N., Brito M. G., Caetano P. S., Vendar D. et al. The development of a GIS Model for the location of landfill sites in Ireland and Portugal CRC (Ireland) / Cork County Council (Ireland)/CIGA/Sesimbra Council. Community Initiative INTERREG II C (Atlantic area), European Commission, EA B1IRE n 2.15, 2000–2001.
- Erkut E., Moran S. R. Locating obnoxious facilities in the public sector: An application of the Analytic Hierarchy Process to municipal landfill siting decisions. *Socio-Economic Planning Science*, Vol. 25, No. 2, 1991, s. 89–102.
- Gemitzi A., Tsihrintzis V., Voudrias E., Petalas Ch., Stravodimos G. Combining geographic information system, multicriteria evaluation techniques and fuzzy logic in siting MSW landfills. *Environmental Geology* 51, 2007, s. 797–811.
- Matsudo T., Bahardyan B., Tanaka N., Kakuta Y. Analysis of people's concerns about impact of SWM facilities. Ninth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Calgari, 6–10 October, 2003.
- Mummolo G. An Analytic Hierarchy Process Model for Landfill Site Selection. *Journal of Environmental Systems*, Vol. 24(4), 1996, s. 445–465.
- Saaty T. L. Decision making the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 13(1), 2004, s. 1–35.
- Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, 1980.
- Wota A., Woźniak A. Logistyczne aspekty składowania odpadów komunalnych w województwie małopolskim. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi PAN w Krakowie, nr 3/2, 2006, s. 135–146.
- Wota A. K. Możliwość zastawiania metody AHP do oceny przydatności terenów problemowych dla rolnictwa. *Acta Agraria et Silvestria. Sekcja Ekonomiczna*, Vol. XLIV/1, Kraków 2005, s. 409–416.
- Wota A. 2008. Optymalizacja wyboru lokalizacji składowisk odpadów komunalnych z wykorzystaniem metody AHP (Analytic Hierarchy Process). *Studia Rozprawy Monografie*, Kraków 2008 (monografia w druku po recenzji).

Dr hab. inż. Andrzej Woźniak, Prof. UR
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Katedra Technicznej Infrastruktury Wsi
30-149 Kraków ul. Balicka 116B
Tel. (012) 662 4660
ul. Balicka 104, 30-149 Kraków
Dr Aldona, K Wota

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie
ul. J. Wybickiego 7, 31-261 Kraków
awozniak@ar.krakow.pl, awota@min-pan.krakow.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Antoni T. Miler*