

Agnieszka GENEROWICZ¹
Ryszarda IWANEJKO²

MOŻLIWOŚCI PROWADZENIA SELEKTYWNEJ ZBIÓRKI ODPADÓW KOMUNALNYCH PRZY CZEŚCIOWO NIEPEWNEJ SYTUACJI RYNKOWEJ – APLIKACJA METOD OBLICZENIOWYCH

System segregacji odpadów „u źródła” jest początkowym elementem kompleksowego rozwiązania gospodarki odpadami w regionie. Pomimo prostoty rozwiązań technicznych i technologicznych systemu segregacji jego efektywność ekonomiczna i ekologiczna jest zależna od wielu aspektów i parametrów wewnętrznych (poziom i możliwości recyklingu i przetworzenia), jak i uwarunkowań zewnętrznych (warunki rynkowe, współpraca z recyklerami, popyt na produkty z odpadów).

Proces decyzyjny we wszystkich dziedzinach wiąże się z ryzykiem podjęcia nieoptymalnych decyzji, a w przypadku gospodarowania odpadami ich skutkiem mogą być: straty finansowe, nieosiągnięcie wymaganych poziomów odzysku lub recyklingu, szkody środowiskowe, brak akceptacji społecznej.

Celem artykułu jest przedstawienie metodyki podejmowania decyzji i wyboru wariantu segregacji w gospodarstwach domowych, przy częściowo niepewnej sytuacji rynkowej, a co za tym idzie przy istnieniu niepewności co do możliwości przekazania odzyskanych frakcji surowców wtórnych do przetwarzania i recyklingu odzyskanych frakcji.

Ze względu na obszerność tematu, artykuł podzielono na dwie integralne części. Część I artykułu [20] stanowi opis uwarunkowań prawnych i możliwości technicznych rozwiązania selektywnej zbiórki odpadów, jako jednego z elementów kompleksowego systemu gospodarki odpadami. Analiza ta będzie stanowić bazę do podjęcia decyzji w zakresie wprowadzenia rozwiązań technicznych segregacji „u źródła”. Część II artykułu wskazuje kolejne kroki, oparte na odpowiednich metodach matematycznych, które są konieczne do rozwiązania problemu wyznaczenia najkorzystniejszego rozwiązania segregacji odpadów i pozyskiwania z nich frakcji użytkowych.

Słowa kluczowe: odzysk odpadów, segregacja „u źródła”, surowce wtórne, analiza decyzyjna, niepewna sytuacja rynkowa

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Agnieszka Generowicz, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska ul. Warszawska 24, 31 - 155 Kraków; tel. 126282183; agenerowicz@pk.edu.pl

² Ryszarda Iwanejko, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska ul. Warszawska 24, 31 - 155 Kraków; riw@vistula.wis.pk.edu.pl

1. Wprowadzenie

Pakiet prawa ochrony środowiska to zapisy wynikające z konwencji i ustaleń międzynarodowych dotyczących jego stanu i ochrony. Zapisy prawa dotyczące ochrony środowiska oparte są o podstawowe zasady tj.: zrównoważonego rozwoju, zdefiniowanego w Prawie Ochrony Środowiska [Dz. U. 2008.25.150 tekst jednolity], zasadę kompleksowości (kompleksowej ochrony środowiska), zasada prewencji, która powinna mieć ona pierwszeństwo przed obowiązkiem naprawienia szkody, zasadę przezroczności, uzupełniająca zasadę prewencji, zasadę „zanieczyszczający płaci”, zasadę nadrzędności wymagań ochrony środowiska wobec polityk, planów i programów dotyczących ochrony środowiska; zasadę dostępu do informacji o środowisku i zasadę partycypacji publicznej [2, 3, 5]. Zgodnie z prawidłową strukturą postępowania z odpadami metody odzysku i recyklingu stoją ponad metodami unieszkodliwiania, dlatego też powinny stanowić kluczowy element systemu gospodarki odpadami komunalnymi. Bez względu na stopień rozbudowy takiego systemu, pełnione przez niego funkcje, czy spodziewane efekty funkcjonowania, pierwsze i najważniejsze zadanie takiego systemu to odzysk i recykling frakcji użytkowych, organizacja zagospodarowania selektywnie gromadzonych frakcji użytkowych, przy jednoczesnym zagospodarowaniu zebranych odpadów zmieszanych. Analiza i wybór możliwości prowadzenie systemu segregacji są niejednokrotnie najważniejszym i pierwszym zadaniem decyzyjnym w systemie kompleksowym. Możliwości technicznego rozwiązania takiego systemu zostały przedstawione w części pierwszej artykułu, tutaj natomiast zaproponowano narzędzia matematyczne, wskazujące rozwiązania, stanowiące pomoc dla decydenta [2, 5-8, 10, 15-18].

2. Metoda AHP dla warunków zdeterminowanych

Metoda wielokryterialnego wyboru AHP składa się z kilku etapów. Są to [1, 7, 8, 12, 13, 15, 19]:

1. Hierarchizacja problemu, czyli sformułowanie celu nadrzędnego o największym stopniu ogólności (tu: wskazanie najkorzystniejszego dla danej jednostki osadniczej systemu segregacji odpadów komunalnych „u źródła”), wskazanie kryteriów wyboru (tu: sformułowane w części I artykułu [20] K1, K2 i K3) oraz alternatywnych wariantów dopuszczalnych (tu: przedstawione w części I artykułu W1, W2, W3), przy czym przyjmuje się, że kolejność wymienianych kryteriów i wariantów jest przypadkowa i nie wynika z preferencji decydenta,
2. Ocena ważności kryteriów (dokonywana przez decydenta, tu: przez gminę lub regionalną instalację przetwarzania odpadów, odpowiedzialną za kompleksowe prawidłowe działanie systemu gospodarki odpadami, w tym również elementu segregacji u źródła),
3. Ocena wszystkich wariantów ze względu na przyjęte kryteria (dokonywana przez eksperta bądź ekspertów) czyli np. inżyniera projektanta, znającego zasady eksploatacji systemów segregacji i lokalne uwarunkowania możliwości ich wprowadzenia w konkretnym regionie),

4. Wyznaczenie oceny końcowej ze względu na wszystkie kryteria równocześnie, co musi być poprzedzone przyjęciem odpowiedniej reguły agregacji H.

Z matematycznego punktu widzenia etapy 2 i 3 są analogiczne, dlatego w dalszej części zamiast pojęć kryterium (dla etapu 2) i wariant (dla etapu 3) stosowane będzie ogólne pojęcie obiekt. Przeprowadzenie oceny obiektów polega na ich porównaniu parami a wyniki zapisuje się w tzw. macierzy porównań parami $A=(a_{ij})_{i,j=1..n}$ gdzie n- liczba obiektów. Im bardziej i-ty obiekt jest preferowany nad j-ty, tym większą wartość należy nadać wyrazowi a_{ij} . Stopień preferencji jednego obiektu nad drugim wyraża się w podstawowej 9-cio stopniowej skali Saaty'ego [6, 7, 8, 12, 13, 14, 15] od 1 do 9, przy czym zgodnie z zaleceniami twórcy metody T. Saatyego można podawać oceny „dokładniejsze” tzn., jeśli $a_{ij}>1$ z dokładnością jednego miejsca po przecinku, a jeśli $a_{ij}<1$ z dokładnością dwóch miejsc po przecinku. Przykładowo przyjęcie $a_{ij}=1$ oznacza uznanie obiektów i-tego oraz j-tego za równoważne, a przyjęcie wartości $a_{ij}=9$ oznacza, że i-ty obiekt został oceniony jako bezwzględnie lepszy od j-tego. Stopień preferencji obiektów uzależniony jest od osądu przeprowadzającego ocenę i wynika ze stopnia ważności kryterium (etap 2) lub stopnia spełnienia danego kryterium przez kolejny wariant (etap 3). Jest oczywiste, że muszą zachodzić pewne podstawowe zasady: 1^o równości: $a_{ii}=1$, co oznacza, że każdy obiekt jest sobie równoważny; 2^o wzajemności: $a_{ij}=1/a_{ji}$, co oznacza, że i-ty obiekt jest, a takim samym stopniu lepszy (gorszy) od j-tego w jakim obiekt j-ty jest gorszy (lepszy) od i-tego oraz 3^o przechodności: jeśli $a_{ij}>1$ oraz $a_{jk}>1$ to $a_{ik}>1$ co oznacza, że jeśli i-ty obiekt jest lepszy od j-tego a j-ty lepszy od k-tego, to i-ty jest lepszy od k-tego. Wynik każdego porównania a_{ij} jest równocześnie stosunkiem względnych wag (rang) obiektów i-tego oraz j-tego w ocenie końcowej $a_{ij}=\omega_i/\omega_j$. Zestawienie wszystkich wag tworzy unormowany wektor $\omega=(\omega_1,\omega_2,\dots,\omega_n)$, który przy zachowaniu logiczności i spójności porównań jest tzw. wektorem własnym macierzy A. Jeśli skonstruowana macierz porównań nie zawiera wewnętrznych sprzeczności i jest logicznie spójna, to zachodzi równość $A\omega=\lambda_{\max}*\omega$, gdzie λ_{\max} jest maksymalną wartością własną macierzy A odpowiadającą wektorowi własnemu ω . Do oceny poprawności porównań stosuje się dwie wartości [6, 7, 8, 12, 13, 15, 19] wskaźnik zgodności CI (Consistency Index) oraz stosunek zgodności CR (Consistency Ratio). Jeśli wartości te spełniają odpowiednie kryteria, to macierz porównań A nie zawiera sprzeczności i nie wykazuje braku konsekwencji, a wyznaczone w późniejszych krokach wagi będą poprawne. W przypadku braku stałości preferencji należy zweryfikować macierz porównań parami.

Ostatni etap metody AHP wymaga określenia reguły agregacji ocen H, co pozwoli na ocenę wariantów ze względu na wszystkie kryteria łącznie. Najczęściej stosuje się liniową regułę $H(W_i)=\sum \omega_j*K_j(W_i)$, gdzie: W_i – i-ty wariant (projektowy, decyzyjny), j – numer kryterium, K_j - j-te kryterium, $K_j(W_i)$ – ocena cząstkowa i-tego wariantu względem j-tego kryterium, ω_j – względna waga j-tego kryterium odzwierciedlająca preferencje decydenta. Kończącą ocenę wariantów W_i dla ściśle określonych warunków zdeterminowanych stanowią wartości globalnej funkcji użyteczności $H(W_i)$, określające równocześnie ranking wariantów.

Tutaj po zastosowaniu metody AHP do poszczególnych sytuacji rynkowych uzyskuje się wektory ocen zależnych od tych sytuacji, przedstawione równaniem (1).

$$H(S_k) = (H(W_1 | S_k); H(W_2 | S_k); H(W_3 | S_k)) \quad (1)$$

gdzie k – numer sytuacji rynkowej ($k=1, 2, 3$). Najwyższa wartość $H(W_i | S_k)$ wskazuje na wybór i -tego wariantu W_i jako najlepszego dla k -tej sytuacji rynkowej.

2.1. Hierarchizacja problemu

Pierwszy etap metody AHP jest zgodny, z przedstawionymi w cz. 1 artykulu, kryteriami (K1, K2, K3) oraz wariantami (W1, W2, W3).

2.2. Ranking kryteriów

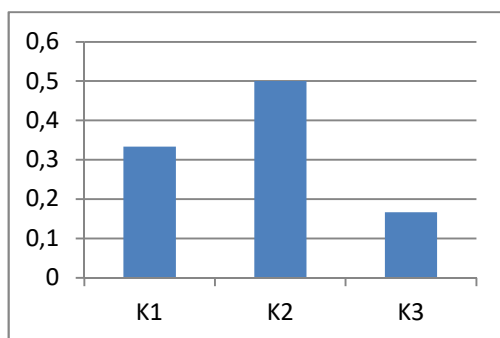
Drugim etapem metody AHP jest, przeprowadzana przez decydenta, ocena ważności kryteriów, która jest niezależna od warunków rynkowych. Po dokonaniu przez decydenta porównań kryteriów parami została utworzona pierwsza macierz porównań (tab.1).

Tabela 1. Macierz porównań kryteriów

Table 1. Criteria comparison matrix

	K1	K2	K3
K1	1	2/3	2
K2	1,5	1	3
K3	0,5	1/3	1

Dla tej macierzy wyznaczono maksymalną wartość własną z tzw. ilorazów Rayleigh'a oraz wektor własny macierzy metodą potęgową [4]. Uzyskano $\omega = (\omega(K1), \omega(K2), \omega(K3)) = (\omega_1, \omega_2, \omega_3) = (1/3; 0.5; 1/6)$. Te wagi kryteriów w graficzny sposób przedstawiono na wykresie (rys. 1).



Kolejnym etapem metody AHP jest ocena wszystkich wariantów ze względu na przyjęte kryteria. Ten etap powinien zostać wykonany kolejno dla warunków S1, S2 i S3.

Rysunek 1. Graficzne przedstawienie wag kryteriów uzyskane po ich porównaniu parami

Figure 1. Graphical representation of the weights of the criteria obtained after pairing them

2.3. Wybór optymalnego rozwiązania dla warunków S1

Ocenę wszystkich wariantów dla sytuacji S1 uzyskano po ich porównaniu parami ze względu na wszystkie kryteria oddzielnie (tab.2).

Tabela 2. Macierz porównań wariantów ze względu na kryteria K1, K2 oraz K3 dla słabej sytuacji gospodarczej S1

Table 2. Comparative matrix of variants based on criteria K1, K2 and K3 for weak economic situation S1

	K1			K2			K3		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
W1	1	2	4	1	1/2	1/3	1	1/3	1
W2	0,5	1	2	2	1	2/3	3	1	3
W3	0,25	0,5	1	3	1,5	1	1	1/3	1

Następnie ze względu na poszczególne j-te kryteria wyznaczono wagi wszystkich i-tych wariantów i uzyskano ich oceny częściowe dla sytuacji S1. Na potrzeby przeprowadzanej tu analizy oznaczono je jako $K_j(W_i|S1)$. Są one odpowiednio równe:

$$\begin{aligned}
 K1(W1|S1) &= 0,57143 & K1(W2|S1) &= 0,28571 & K1(W3|S1) &= 0,14286 \\
 K2(W1|S1) &= 0,16667 & K2(W2|S1) &= 0,33333 & K2(W3|S1) &= 0,5 \\
 K3(W1|S1) &= 0,2 & K2(W2|S1) &= 0,6 & K2(W3|S1) &= 0,2
 \end{aligned}$$

Jak widać, ze względu na każde j-te kryterium suma wyznaczonych wag $\sum_j K_j(W_i|S1)$ jest równa 1. Ostatnim etapem metody AHP jest wyznaczenie

oceny końcowej wszystkich wariantów ze względu na wszystkie kryteria równocześnie. Tutaj zastosowano podaną wcześniej liniową regułę agregacji. Przykładowo dla wariantu W1 ocena końcowa wynosi:

$$H(W1|S1) = \omega_1 \cdot K1(W1|S1) + \omega_2 \cdot K2(W1|S1) + \omega_3 \cdot K3(W1|S1) = 0,3071.$$

W rezultacie uzyskano następujące znormalizowane oceny końcowe dla warunków S1: $H(S1) = (H(W1|S1); H(W2|S1); H(W3|S1)) = (0,3071; 0,3619; 0,3310)$. Jak widać w warunkach S1 ze względu na wszystkie kryteria łącznie najlepszy jest wariant W2 a niewiele gorszy jest wariant W3. Również na tym etapie uzyskuje się tzw. rozwiązania znormalizowane, co oznacza, że suma odpowiednich wag (rang) jest równa 1.

2.4. Wybór optymalnego rozwiązania dla warunków S2

Podobnie jak poprzednio ocenę wszystkich wariantów dla sytuacji S1 uzyskano po ich porównaniu parami ze względu na wszystkie kryteria oddzielnie, przy czym oceny wariantów ze względu na kryterium społeczne K3 nie uległy zmianie (tab.3).

Tabela 3. Macierz porównań wariantów ze względu na kryteria K1, K2 oraz K3 dla średniej sytuacji gospodarczej S3

Table 3. Comparative matrix of variants based on the criteria K1, K2 and K3 for the average economic situation S3

	K1			K2			K3		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
W1	1	3	7	1	1/3	0,2	1	1/3	1
W2	1/3	1	5	3	1	1/3	3	1	3
W3	1/7	1/5	1	5	3	1	1	1/3	1

Stosując sposób oznaczeń analogicznie jak w punkcie 5.3 tutaj uzyskano następujące wyniki:

$$\begin{aligned}
 K1(W1|S2) &= 0,649097 & K1(W2|S2) &= 0,27897 & K1(W3|S2) &= 0,071925 \\
 K2(W1|S2) &= 0,104729 & K2(W2|S2) &= 0,25829 & K2(W3|S2) &= 0,636982 \\
 K3(W1|S2) &= 0,2 & K2(W2|S2) &= 0,6 & K2(W3|S2) &= 0,2
 \end{aligned}$$

Stosując liniową regułę agregacji uzyskano następujące znormalizowane oceny końcowe dla warunków S2: $H(S2) = (H(W1|S2); H(W2|S2); H(W3|S2)) = (0,3021; 0,3221; 0,3758)$. Jak widać w warunkach S2 najlepszy jest wariant W3, a wariant W2 jest trochę gorszy.

2.5. Wybór optymalnego rozwiązania dla warunków S3

Postępując podobnie jak w sytuacjach S1 oraz S2 dokonano porównań wszystkich wariantów i wyznaczono macierze porównań (tab.4).

Teraz uzyskano następujące wyniki:

$$\begin{aligned}
 K1(W1|S3) &= 0,602629 & K1(W2|S3) &= 0,315029 & K1(W3|S3) &= 0,082342 \\
 K2(W1|S3) &= 0,060325 & K2(W2|S3) &= 0,231175 & K2(W3|S3) &= 0,7085 \\
 K3(W1|S3) &= 0,2 & K2(W2|S3) &= 0,6 & K2(W3|S3) &= 0,2
 \end{aligned}$$

Tabela 4. Macierz porównań wariantów ze względu na kryteria K1, K2 oraz K3 dla dobrej sytuacji gospodarczej S3

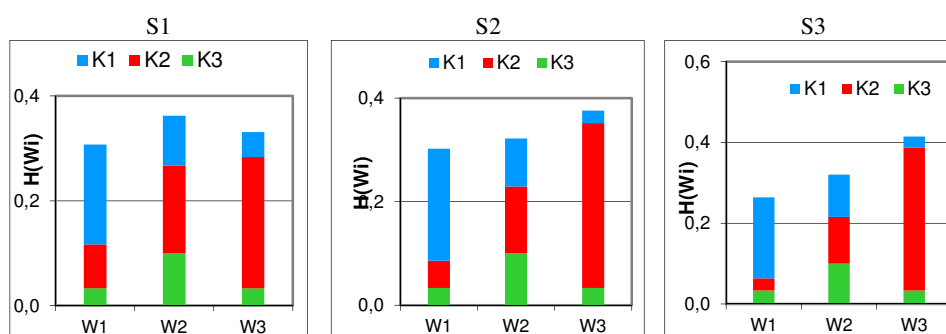
Table 4. Comparative matrix of variants based on criteria K1, K2 and K3 for good economic situation S3

	K1			K2			K3		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
W1	1	2	7	1	1/5	1/9	1	1/3	1
W2	1/2	1	4	5	1	1/4	3	1	3
W3	1/7	1/4	1	9	4	1	1	1/3	1

Stosując liniową regułę agregacji uzyskano następujące znormalizowane oceny końcowe dla warunków S3: $H(S3) = (H(W1|S3); H(W2|S3); H(W3|S3)) = (0,26440; 0,3206; 0,4150)$. Podobnie jak w sytuacji S2 tutaj też najlepszy jest wariant W3.

2.6. Optymalne rozwiązania dla wszystkich sytuacji

Rezultaty dla wszystkich typów sytuacji przedstawiono na rys. 2. Widać, że decydujący wpływ na optymalny wybór wariantów w różnych sytuacjach zawsze miało decydujące kryterium korzyści K2 ($\omega_2=0,5$), a najmniejszy wpływ miało kryterium najniższe K3 ($\omega_3=1/6$), (rys. 1). We wszystkich sytuacjach zostały spełnione kryteria dla CI oraz CR stanowiące wymóg poprawności rozwiązań.

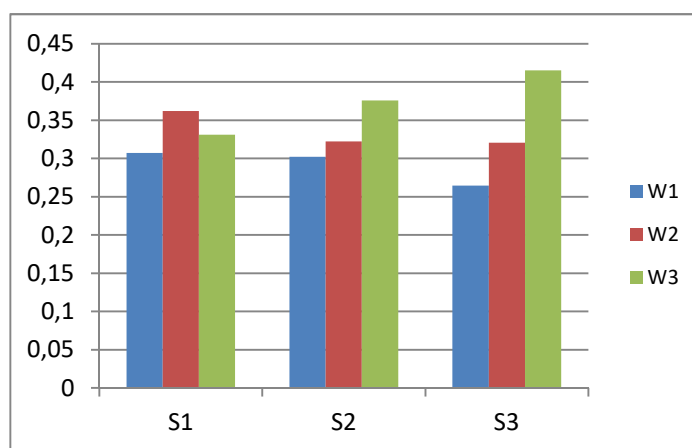


Rys. 2. Graficzne przedstawienie rankingu wariantów segregacji dla trzech sytuacji rynkowych

Figure 2. Graphical representation of segregation options for three market situations

Przeprowadzone analizy wskazały, że przy hierarchii kryteriów wynikającej z wartościowań decydenta (tab.4) najlepszymi wariantami segregacji odpadów są (rys.3):

- w słabej sytuacji rynkowej S1 – segregacja trójpojemnikowa W2, niewiele gorsza jest segregacja dwupojemnikowa W1,
- w średniej i dobrej sytuacji rynkowej S2 i S3 segregacja wielopojemnikowa W3 a gorsza w obu sytuacjach jest segregacja trojpojemnikowa W2.



Rys. 3. Hierarchia wariantów segregacji w różnych sytuacjach gospodarczych

Figure 3. Hierarchy of variants of segregation in different economic situations

3. Wybór systemu segregacji odpadów „u źródła” w warunkach niepełnej informacji rynkowej

Warunki częściowej niepewności lub tzw. niepełnej informacji liniowej (NIL) to takie, kiedy o przyszłości nie wiadomo zbyt wiele, gdy jedynie można określić przedziały zmienności prawdopodobieństw zajść poszczególnych, niezależnych od decydenta mogących zaistnieć w przyszłości różnych sytuacji gospodarczych oraz ewentualne zależności między tymi prawdopodobieństwami. Wówczas problem wyboru systemu segregacji w takich warunkach można przedstawić w postaci tzw. macierzy użyteczności (tabela 5), w której decyzje d_1 , d_2 i d_3 są skojarzone z realizacją wariantów odpowiednio W_1 , W_2 i W_3 , a p_1 , p_2 i p_3 są prawdopodobieństwem wystąpienia w przyszłości, niezależnych od woli decydenta, sytuacji rynkowych S_1 , S_2 i S_3 . Wyrazami macierzy są użyteczności warunkowe tj. użyteczności poszczególnych wariantów w każdej z analizowanych sytuacji oznaczone jako $U(W_i|S_k)$, gdzie W_i oznacza i -ty wariant, S_k oznacza k -tą sytuację gospodarczą (stan natury niezależny od decydenta). Tutaj jako wartości użyteczności $U(W_i|S_k)$ przyjęto wyznaczone powyżej za pomocą metody oceny wielokryterialnej AHP zagregowane użyteczności poszczególnych wariantów w odpowiednich sytuacjach gospodarczych.

Tabela 5. Macierz użyteczności w warunkach niepełnej informacji [opracowanie własne]

Table 5. Utility matrices in incomplete information [own elaboration]

Sytuacja gospodarcza i prawdopodobieństwo jej wystąpienia				
		S1	S2	S3
		p_1	p_2	p_3
d_1	$U(W_1 S_1) = H(W_1 S_1) = 0,307143$	$U(W_1 S_2) = H(W_1 S_2) = 0,302063$	$U(W_1 S_3) = H(W_1 S_3) = 0,264372$	
d_2	$U(W_2 S_1) = H(W_2 S_1) = 0,361905$	$U(W_2 S_2) = H(W_2 S_2) = 0,322138$	$U(W_2 S_3) = H(W_2 S_3) = 0,320597$	
d_3	$U(W_3 S_1) = H(W_3 S_1) = 0,330952$	$U(W_3 S_2) = H(W_3 S_2) = 0,375799$	$U(W_3 S_3) = H(W_3 S_3) = 0,415031$	

gdzie:

S_1 , S_2 , S_3 - sytuacja rynkowa, stan natury niezależny od decydenta,

p_1 , p_2 , p_3 – prawdopodobieństwo wystąpienia w przyszłości odpowiedniej sytuacji rynkowej,

d_1 , d_2 , d_3 – decyzje skojarzone z realizacją wariantów odpowiednio W_1 , W_2 , W_3 .

Dokładny rozkład prawdopodobieństw $\{p_k\}_k$ wystąpienia k -tych stanów natury jest nieznan, lecz można podać pewne ograniczenia i relacje między tymi prawdopodobieństwami. Można je zapisać w postaci układu nierówności liniowych, do których konieczne jest dołączenie równania na zupełność warunków. Do dalszej analizy przyjęto następujący układ nierówności liniowych (2):

$$\begin{cases} p_1 + p_2 + p_3 = 1 \\ 0,1 \leq p_1 \leq 0,7 \\ 0,2 \leq p_2 \leq 0,8 \\ 0,2 \leq p_3 \leq 0,7 \end{cases} \quad (2)$$

Kolejnym krokiem jest rozwiązanie tego układu. Tutaj uzyskano następujące rozkłady prawdopodobieństw $A(0,1; 0,2; 0,7)$, $B(0,1; 0,7; 0,2)$, $C(0,6; 0,2; 0,2)$, $D(0,2; 0,2; 0,6)$. Te rozwiązania tworzą tzw. rozkłady ekstremalne, które odpowiadają wierzchołkom wielościanu wypukłego, wewnątrz którego znajdują się wszystkie możliwe rozkłady prawdopodobieństw (p_1, p_2, p_3) spełniające powyższy układ [10]. Pomimo, że istnieje nieskończenie wiele takich dopuszczalnych rozkładów (p_1, p_2, p_3) , to dalszą analizę wystarczy ograniczyć do uzyskanych powyżej rozwiązań ekstremalnych.

Najostrożniejszą optymalną decyzję wyznacza się za pomocą tzw. zasady MaxEmin. Jest to znana zasada nazywana też zasadą Bernoulliego lub Bayesa. Zgodnie z nią jako optymalną należy wybrać taką strategię, która będzie maksymalizować minimalne oczekiwane wartości użyteczności [9, 10]. Pierwszym krokiem jest minimalizowanie względem rozkładów ekstremalnych $\{X\}$ wartości oczekiwanych użyteczności i -tych decyzji. Wartość oczekiwaną użyteczności i -tej decyzji przy rozkładzie $\{p_k\}$ wyznacza się jako sumę iloczynów $E(d_i, X) = \sum_k p_k \cdot U(W_i | S_k)$ gdzie i – oznacza i -tą decyzję (równoważnie i -ty

wariant W_i), k – identyfikuje sytuację gospodarczą, p_k – jest prawdopodobieństwem wystąpienia sytuacji S_k , X – jedno z rozwiązań ekstremalnych (tu: A, B, C, D). Przykładowo przeciętna użyteczność decyzji d_1 jest równa:

$$E(d_1; A) = p_1(A) \cdot U(W_1 | S_1) + p_2(A) \cdot U(W_1 | S_2) + p_3(A) \cdot U(W_1 | S_3) = 0,1 \cdot 0,307143 + 0,2 \cdot 0,302063 + 0,3 \cdot 0,264372 = 0,2761879.$$

Następnie uzyskane wyniki maksymalizuje się ze względu na i -tą decyzję. Wszystkie wyznaczone wartości oczekiwane zestawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Oczekiwane użyteczności dla NIL [opracowanie własne]

Table 6. Expected usefulness for NIL [own elaboration]

d_i	Rozkłady ekstremalne X				min $E(d_i; X)$	max	decyzja
	A	B	C	D			
d_1	0,270291	0,274394	0,291676	0,274568	0,270291	0,357563	d_3
d_2	0,330107	0,343554	0,350761	0,334238	0,330107		
d_3	0,399602	0,382052	0,357563	0,391195	0,357563		

Zgodnie z zasadą MaxEmin optymalną decyzją jest d3, gdyż niezależnie od zaistniałej w przyszłości sytuacji rynkowej, gwarantuje najwyższą oczekiwaną użyteczność wyrażoną w umownej unormowanej skali.

4. Analizy dodatkowe

Po uzyskaniu rozwiązania końcowego wskazane jest przeprowadzenia tzw. analizy czułości, która ukaze jak bardzo na uzyskany wynik wpływają dane początkowe. Intuicyjnie wiadomo, że w tym przypadku na wynik końcowy mogą mieć wpływ preferencje decydenta oraz ocena możliwości rozwoju sytuacji w przyszłości.

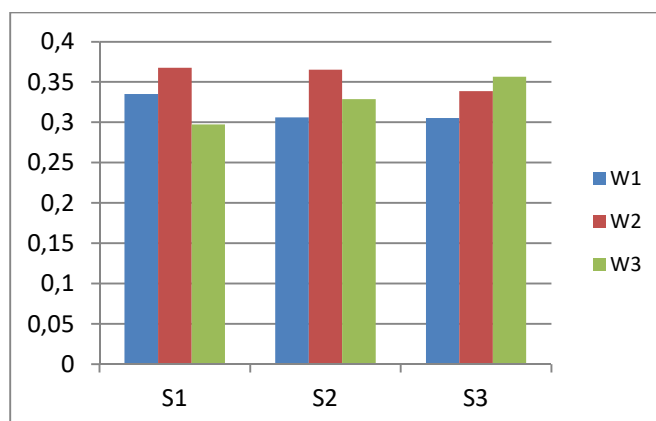
Preferencje decydenta, czyli jego ocena ważności kryteriów są uwzględniane w metodzie AHP. Uzyskany za pomocą AHP ranking wariantów może w istotny sposób zależeć od aktualnych preferencji decydenta, co oznacza, że zmiana wartościowań decydenta może wpłynąć na zmianę rozwiązania końcowego. Dlatego sprawdzono, jak zmieniają się rozwiązania dla innej sytuacji, tj., jeśli decydent uzna, że kryteria K1 oraz K2 są równoważne i równocześnie nie- zbyt ważniejsze od kryterium K3 (tab. 7).

Tabela 7. Macierz porównań kryteriów po zmianie preferencji decydenta

Table 7. Criteria comparison matrix after changing the preferences of the decision maker

	K1	K2	K3
K1	1	1	2
K2	1	1	2
K3	0,5	0,5	1

Na podstawie nowej macierzy porównań wyznaczono wagi poszczególnych kryteriów i uzyskano $\omega=(\omega_1; \omega_2; \omega_3)=(0,4; 0,4; 0,2)$. Przy nowych preferencjach decydenta, tj. przy wzroście ważności kryterium korzyści, zmianie uległy rankingi wariantów dla poszczególnych sytuacji rynkowych (rys.4). I tak dla słabej sytuacji rynkowej najlepszy okazuje się wariant W2 (segregacja trójpojemnikowa), a później wariant W1 (segregacja dwupojemnikowa). Dla średniej sytuacji znów najlepszy byłby wariant W2 a po nim W3. Natomiast przy dobrej sytuacji rynkowej najlepszy byłby W3 a po nim W2. Jak widać, przy nowych preferencjach decydenta, wynikających przykładowo ze zmiany sytuacji finansowej przedsiębiorstwa, w różnych sytuacjach gospodarczych rankingi wariantów są zupełnie odmienne, jednak uzyskane wyniki są logiczne i można powiedzieć, że są zgodne z oczekiwaniami.



Rysunek 4. Hierarchia wariantów segregacji w różnych sytuacjach gospodarczych po zmianie preferencji decydenta

Figure 4. Hierarchy of variants of segregation in different economic situations after changing the preferences of the decision maker

Taka analiza badania wpływu danych wyjściowych nazywana jest analizą czułości. W praktyce najczęściej największy wpływ na zmianę rozwiązania obserwuje się przy zmianie ważności samych kryteriów, a zmiana ocen wariantów ze względu na poszczególne kryteria nie jest już tak bardzo zauważalna.

Ocenę rozwoju sytuacji w przyszłości opisuje układ równań nieliniowych. Aktualnie ze względu na nowe możliwości tworzenia np. nowego szlaku przevożenia odpadów segregowanych do Chin, można sformułować inny układ

$$\begin{cases} p_1 + p_2 + p_3 = 1 \\ 0,1 \leq p_1 \leq 0,4 \\ 0,2 \leq p_2 \leq 0,8 \\ 0,4 \leq p_3 \leq 0,8 \end{cases} \quad (3)$$

Rozwiązaniem tego układu są punkty ekstremalne A(0,1; 0,2; 0,7), B(0,4; 0,2; 0,4) oraz C(0,1; 0,5; 0,4). Jak widać (tab. 8), tutaj pomimo pewnej zmiany prognoz końcowe rozwiązanie nie uległo zmianie.

Tabela 8. Oczekiwane użyteczności dla NIL [opracowanie własne]

Table 8. Expected usefulness for NIL [own elaboration]

d _i	Rozkłady ekstremalne X			min E(d _i ;X)	max	decyzja
	A	B	C			
d1	0,276187	0,287495	0,289019	0,270291	0,357563	d3
d2	0,325036	0,325498	0,337428	0,330107		
d3	0,398776	0,387007	0,373553	0,357563		

5. Podsumowanie i wnioski

- Segregacja „u źródła” i odzysk surowców z odpadów komunalnych to dla każdej gminy lub przedsiębiorstwa gospodarki komunalnej każdorazowo problem decyzyjny.
- Z problemem decyzyjnym mamy do czynienia wówczas, gdy należy osiągnąć jakiś zamierzony cel, istnieją na to alternatywne metody, lecz najlepszy sposób działania nie jest oczywisty.
- Rozwiązanie każdego procesu decyzyjnego wymaga udzielenia odpowiedzi na podstawowe pytania: jakie (niezależne od decydenta, lecz mające istotny wpływ na rezultat jego działań) sytuacje mogą się wydarzyć w przyszłości i czy jest coś, czego nie można przewidzieć? jakie są możliwe decyzje (sposoby działania)? jakie mogą być rezultaty podjętych decyzji? Rzeczywiste problemy decyzyjne najczęściej są określane jako zadania przy niepełnej informacji, równoważnie częściowej niepewności.
- Klójące się interesy gospodarki komunalnej, mieszkańców i recyklerów, odbierających frakcje surowcowe nakazują wskazywać rozwiązania, które nigdy nie są dobre dla wszystkich. Matematyczna analiza oraz wykazanie dobrych i złych stron każdego z rozwiązań, pozwala na podjęcie decyzji, która częściowo przynajmniej zadowoli strony uczestniczące w procesach odzysku i recyklingu odpadów komunalnych.
- Do rozwiązania problemu zaproponowano metodę matematyczną rankingu wariantów technicznych selektywnej zbiórki, uwzględniając warunki rynkowe, a co za tym idzie możliwości zbytu zebranych selektywnie odpadów.
- Uzyskanych wyników nie powinno się uogólniać na inne gminy lub przedsiębiorstwa oczyszczania miast. Przedstawione rozważania należy traktować wyłącznie jako metodykę i przedstawiony do niej przypadek obliczeniowy. Oceny poszczególnych kryteriów i wariantów dla każdej gminy mogą być różne, gdyż zależą one od wielu indywidualnych czynników. Przykładowo kryteria zależą od subiektywnych preferencji decydenta, koszty zależą od rozległości gminy, częstości odbioru odpadów, posiadanego taboru samochodowego, użytkowanych instalacji, liczby pracowników zatrudnionych w różnych sytuacjach gospodarczych itp.
- W rzeczywistości decydent może w różnych sytuacjach gospodarczych (S1, S2, S3) mieć odmienne preferencje odnośnie ważności kryteriów. Przykładowo dla słabych warunków rynkowych S1 jako najważniejsze mógłby uznać minimalizację kosztów (K1), a dla dobrych warunków rynkowych (S3) maksymalizację korzyści. Nie zmienia to jednak przedstawionej metodyki.
- Przy rozwiązywaniu rzeczywistych problemów decyzyjnych odnośnie wyboru optymalnego sposobu segregacji odpadów wskazane byłoby przeprowadzenie dodatkowej analizy tzw. analizy wrażliwości. Polega ona na zbadaniu wpływu zmiany danych wyjściowych na przyjęte rozwiązanie.

Literatura

- [1] Aczel A.D.: Statystyka w zarządzaniu, PWN, Warszawa, 2000.
- [2] Bilitewski B., Härdtle G., Marek K.: Podręcznik gospodarki odpadami– teoria i praktyka, Wydawnictwo Seidel – Przywecki sp. z o.o, Warszawa, 2006.
- [3] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Dz.U.U.E.L.08.312.3).
- [4] Dryja M., Jankowska J., Jankowski M.: Przegląd metod i algorytmów numerycznych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, część 2. Warszawa 1982.
- [5] Generowicz A.: Multi – criteria analysis of waste management in Szczecin, Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 23, No. 1, 2014, pp. 57-63.
- [6] Generowicz A., Iwanejko R.: Wybór optymalnego rozwiązania systemu selektywnej zbiórki odpadów komunalnych przy niepewnej sytuacji rynkowej, Logistyka Vol. 3, 2015, 1414-1422.
- [7] Iwanejko R.: Generowicz A., Ocena wariantów segregacji odpadów komunalnych „u źródła” z wykorzystaniem analizy decyzyjnej AHP, Gaz Woda Technika Sanitarna, Vol. 2016, pp. 266-271.
- [8] Iwanejko R., Generowicz A., Klasyfikacja przyczyn pożarów i ocena ryzyka ich występowania w obiektach gospodarki odpadami komunalnymi w aspekcie start ekonomicznych, ekologicznych i społecznych, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, 32 (62) /1, 2015, pp. 137-152, DOI:10.7862/rb.2015.10.
- [9] Iwanejko R., Rybicki S.M.: Praktyczne aspekty stosowania metody hierarchicznego wyboru AHP w zagadnieniach zaopatrzenia w wodę, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna „Zaopatrzenie W Wodę, Jakość I Ochrona Wód”, Poznań 2008.
- [10] Kofler E.: Podejmowanie decyzji przy niepełnej informacji, Real Publishers, Zurych, 1993.
- [11] Kulczycka J., Generowicz A. Kowalski Z.: Strength and Weakness of Municipal and Packaging Waste System in Poland; book project under the working title "Integrated Waste Management – Volume I", August 2011; Publisher InTech; Edited by: Sunil Kumar.
- [12] Miller D.W., Stark M.K.: Praktyka i teoria decyzji, PWN, Warszawa 1971.
- [13] Moore P.G., Ryzyko w podejmowaniu decyzji, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 1975.
- [14] Rolad H.A., Moriarty B.: System Safety Engineering and Management, Jon Wiley & Sons. Inc., 1990.
- [15] Saaty T.L.: The Analytic Hierarchy Process, New York, Mc-Graw Hill, 1980.
- [16] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. 2013. 0. 21).
- [17] Ustawa z dnia 25 stycznia 2013 r. o zmianie ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach (Dz. U. 2013. 0. 228).
- [18] Ustawa z dnia 29 lipca 2005 r. o zużytych sprzęcie elektrycznym i elektronicznym (Dz. U. z 2005 r., Nr 180, poz. 1495 z późn. zm.).

- [19] Żak J.: Wielokryterialne wspomaganie decyzji w transporcie drogowym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, s. 46-73, 2005.
- [20] Generowicz A., Iwanejko R.: Możliwości prowadzenia selektywnej zbiórki odpadów komunalnych przy częściowo niepewnej sytuacji rynkowej – podstawy techniczne i możliwości rozwiązań segregacji. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA. t. XXXIV, z. 64 (4/II/17), s. 183-197, DOI:10.7862/rb.2017.239.

POSSIBILITY OF CONDUCTING SELECTIVE COLLECTION OF MUNICIPAL WASTE AT SOME PRECARIOUS MARKET SITUATION, PART II – APPLICATION OF CALCULATION METHODS

S u m m a r y

The waste segregation system is the starting point for a comprehensive waste management solution in the region. In spite of the simplicity of the technical and technological arrangements of the segregation system, its economic and environmental efficiency depends on many aspects and internal parameters (level and capacity of recycling and processing) as well as external conditions (market conditions, cooperation with recyclers, demand for waste products).

Decision-making in all areas entails the risk of non-optimal decisions, and in the case of waste management, they can result in: financial losses, failure to meet the required levels of recovery or recycling, environmental damage, lack of social acceptance.

The aim of this article is to present the methodology for decision making and the choice of segregation option in households, with some uncertain market situation, and consequently the uncertainty as to the possibility of transferring recycled fraction of recycled materials to the processing and recycling of recovered fractions. Because of the breadth of the topic, the article is divided into two integral parts. Part I of the article describes legal conditions and technical possibilities of selective waste collection as one of the elements of a comprehensive waste management system. This analysis will be the basis for deciding on the introduction of technological solutions for segregation at source. Part II of the article shows the steps followed by the appropriate mathematical methods that are needed to solve the problem of determining the best solution for the segregation of waste and the utilization of the utility fractions.

Keywords: municipal waste recovery, source segregation, secondary raw materials, decision analysis, uncertain market situation

Przesłano do redakcji: 24.11.2017 r.

Przyjęto do druku: 29.12.2017 r.