

WYBÓR WARIANTU USUWANIA I UNIESZKODLIWIANIA ŚCIEKÓW Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY DECYZYJNEJ NA PRZYKŁADZIE WIEJSKICH JEDNOSTEK OSADNICZYCH

SELECTION OF WASTEWATER REMOVAL AND DISPOSAL OPTION USING DECISION ANALYSIS ON THE EXAMPLE OF RURAL SETTLEMENT UNITS

Weronika Wójcik, Zbigniew Mucha, Agnieszka Generowicz
Politechnika Krakowska

Streszczenie. W artykule przedstawiono propozycję zastosowania analizy decyzyjnej do wyboru sposobu usuwania i oczyszczania ścieków na terenach wiejskich. Wybór optymalnego rozwiązania oparto na kryterium zrównoważonego rozwoju. Zaproponowane metody: hierarchiczna metoda AHP i metoda programowania kompromisowego, mogą być wykorzystywane do wyboru najlepszego rozwiązania na etapie planowania systemu usuwania i oczyszczania ścieków w wiejskich jednostkach osadniczych, z uwagi na to, że analiza i wybór rozwiązania systemu usuwania i unieszkodliwiania ścieków z terenów wiejskich jest skomplikowanym zadaniem decyzyjnym, które powinno być ocenione w wielu różnorodnych aspektach, przy użyciu różnych kryteriów i mierników.

Abstract. The article presents a proposal for decision analysis application to the selection process for the removal and treatment of sewage in rural areas. Selecting the optimal solution was carried out based on the criteria of sustainable development. The proposed methods: hierarchical method of AHP and compromise programming can be used to choose the best solution at the planning stage removal system and wastewater treatment in countryside settlements, due to the fact that the analysis and the choice of system solutions removal and disposal wastewater in rural areas is a complicated task decision-making, which should be evaluated in many different aspects, adopting various criteria and measuring instruments.

Adres do korespondencji – Corresponding authors: mgr inż. Weronika Wójcik, dr inż. Zbigniew Mucha, dr hab. inż. Agnieszka Generowicz, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 30-962 Kraków, e-mail: weronika2002@wp.pl.

Słowa kluczowe: analiza wielokryterialna, metoda AHP, metoda programowania kompromisowego, usuwanie i oczyszczanie ścieków,

Key words: multi-criteria analysis, AHP method, compromise programming method, wastewater treatment, removal wastewater

WSTĘP

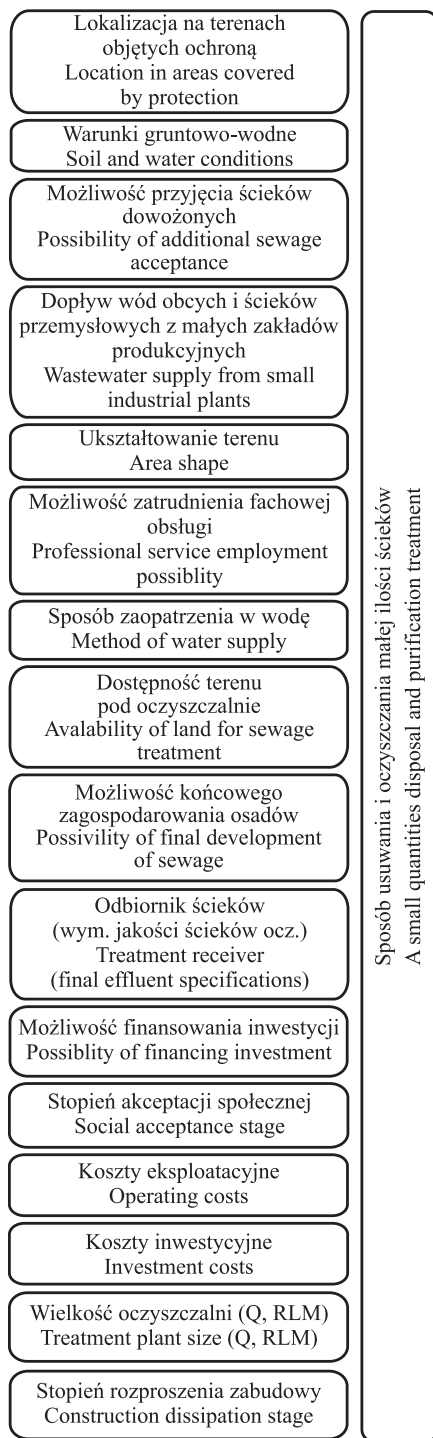
Przyjęcie zasad „zrównoważonego rozwoju” (*Sustainable Development*) dla ochrony środowiska oraz racjonalnej gospodarki zasobami naturalnymi nałożyło nowe „ramy” i narzuciło konieczność wprowadzania systemowych rozwiązań, które na równych prawach będą traktować płaszczyzny ekologiczną, ekonomiczną i społeczną. Gospodarka komunalna, a w tym systemy odprowadzania i unieszkodliwiania ścieków stanowią jeden z istotniejszych problemów poprawy stanu środowiska naturalnego. Problem ten dotyczy zwłaszcza małe jednostki osadnicze o rozproszonej zabudowie, zazwyczaj jednorodzinnej, jednostek o charakterze rolniczym, których zanieczyszczenie stanowi zagrożenie dla ludzi i środowiska oraz jednostek o słabej edukacji ekologicznej mieszkańców. System usuwania i unieszkodliwiania ścieków musi więc być traktowany jako struktura techniczna, składająca się z systemu kanalizacji i systemu oczyszczania ścieków, która ma zapobiegać degradacji i zanieczyszczeniu środowiska, a nie jak dotychczas obciążać go emisjami. Jest to system wielopłaszczyznowy, obejmujący wiele dziedzin gospodarki. Dlatego jego ocena stwarza liczne problemy i często bywa niepełna [Roeleveld 1997, Balkema i in. 1998].

Praktyczne wdrożenie i zastosowanie założeń zrównoważonego rozwoju w gospodarce wodno-ściekowej wymaga znalezienia odpowiednich miar, kryteriów lub wskaźników oceniających planowane rozwiązanie, które w sposób praktyczny zmierzają jego funkcjonowanie. Taka miara pozwoli na wybór systemu gospodarki ściekowej w regionie, który jest systemem najkorzystniejszym w świetle zasad zrównoważonego rozwoju oraz pozwoli na jego modernizację w miarę takiej konieczności.

MOŻLIWOŚCI WARIANTOWYCH ROZWIĄZAŃ ODPROWADZANIA I OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW DLA MAŁYCH MIEJSCOWOŚCI

Zgodnie z zapisami Dyrektywy Rady 91/271/EWG w miejscach, gdzie budowa systemu kanalizacji zbiorczej nie przyniosłaby korzyści dla środowiska lub powodowałaby nadmierne koszty, należy zastosować systemy indywidualne lub inne rozwiązania zapewniające odpowiedni poziom ochrony środowiska.

Wybór sposobu usuwania i oczyszczania ścieków uzależniony jest od wielu czynników. Najważniejsze z nich to: warunki terenowe i gruntowo-wodne, odbiornik ścieków i wymagany stopień oczyszczania ścieków, wielkość jednostki osadniczej i stopień rozproszenia jej zabudowy, wpływ na środowisko i aspekty ekonomiczne (ryc. 1). Wybór powinien być dokonywany na podstawie wielokryterialnej analizy obejmującej łącznie aspekty: techniczne, technologiczne, społeczne, środowiskowe i ekonomiczne.



Ryc. 1. Uwarunkowania sposobu usuwania i oczyszczania małej ilości ścieków [Mucha i Mikosz 2009]
Fig. 1. Conditions to be considered for treatment of small volumes of wastewater [Mucha and Mikosz 2009]

Jako możliwe warianty usuwania i oczyszczania ścieków z terenów wiejskich przyjmuje się [Mucha i Mikosz 2009]:

- gromadzenie ścieków w szczelnych zbiornikach (tzw. zbiorniki bezodpływowe) i okresowe ich wywożenie do punktów zlewnych zbiorczych oczyszczalni,
- oczyszczanie ścieków w oczyszczalni przydomowej z ich odprowadzeniem do gruntu lub wód powierzchniowych,
- odprowadzenie ścieków do zbiorczej sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków.

Na terenach wiejskich występuje najczęściej kombinacja tych sposobów.

PRZYJĘTE DO OBLICZEŃ WARIANTY ROZWIĄZANIA – OPIS WARIANTÓW DECYZYJNYCH I KRYTERIÓW ICH OCENY

Analizę wykonano na podstawie danych zawartych w pracy Dwuwariantowa koncepcja kanalizacji sanitarnej... [2008] dla dwóch miejscowości w gminie X, które mają charakter wypoczynkowo-rekreacyjny (agroturystyka). W ramach pracy wykonano ankietę, którą objęto wszystkich mieszkańców analizowanych wsi. W ankiecie zawarto 37 szczegółowych pytań dotyczących czynników mających wpływ na bilans ścieków; zapytano też mieszkańców o preferowany sposób rozwiązania odprowadzania i oczyszczania ścieków. Wyniki ankiety wskazują zdecydowanie na preferowany przez mieszkańców system scentralizowany z jedną zbiorczą lub ewentualnie kilkoma lokalnymi oczyszczalniami, co uwzględniono w ocenie kryteriów (tab. 1). Uwzględniając dane z ankiety, wykonano szczegółowy bilans ilości i jakości ścieków oraz wybrano możliwe technicznie warianty odprowadzania i oczyszczania ścieków z tych miejscowości:

Wariant W1 – system kanalizacji mieszanej grawitacyjno-tłoczny z 8 przepompowniami oraz dwoma lokalnymi oczyszczalniami dla jednej miejscowości i jedną oczyszczalnią dla miejscowości drugiej z odprowadzeniem ścieków oczyszczonych do wód powierzchniowych płynących.

Wariant W2 – oczyszczalnie indywidualne w łącznej liczbie 27 sztuk z odprowadzeniem ścieków oczyszczonych do wód powierzchniowych płynących.

W koncepcji zaproponowano kilka rozwiązań oczyszczalni indywidualnych i lokalnych z wykorzystaniem zblokowanych urządzeń ze złożem biologicznym zraszanym, złożem zanurzonym napowietrzanym, osadem czynnym niskoobciążonym oraz biologiczne reaktory membranowe. Zaproponowane rozwiązania techniczno-technologiczne spełniają wymagania przepisów ochrony środowiska, w tym Rozporządzenia Ministra Środowiska z 2006 r. z późniejszymi zmianami [Rozporządzenie... 2006]. Do porównawczych analiz w artykule wybrano układy technologiczne indywidualnych i lokalnych oczyszczalni składające się z osadnika gnilnego i złoża biologicznego zraszanego Bioclere.

Przepustowość oczyszczalni lokalnych poza sezonem wynosi od $Q = 11,5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ i równoważnej liczby mieszkańców $RLM = 100$ do $Q = 21 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ i $RLM = 181$ oraz w sezonie od $Q = 22 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ i $RLM = 191$ do $Q = 55 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ i $RLM = 710$. Przepustowość oczyszczalni indywidualnych poza sezonem wynosi od $Q = 0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ i równoważnej liczby mieszkańców $RLM = 5$ do $Q = 5,3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ i $RLM = 70$ oraz w sezonie $Q = 0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ i $RLM = 6$ do $Q = 8,3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ i $RLM = 97$. Osady z osadników gnilnych

indywidualnych i lokalnych oczyszczalni wywożone będą do odwadniania w większej oczyszczalni.

Koszty inwestycyjne oczyszczalni przyjęto na podstawie koncepcji w oparciu o oferty dostawcy urządzeń, a koszty kanalizacji na podstawie jednostkowych kosztów scalonych Sekocenbud [Dwuwariantowa koncepcja... 2008]. Obliczone w koncepcji koszty eksploatacji oczyszczalni obejmują koszty obsługi, energii elektrycznej, materiałów eksploatacyjnych, badań. Koszt wywozu osadu przyjęto w wysokości 80 zł za m³ osadu.

Proponowane warianty usuwania i oczyszczania ścieków oraz kryteria opisujące funkcjonowanie poszczególnych rozwiązań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Macierz decyzyjna dla wyboru systemu usuwania i oczyszczania ścieków

Table 1. Decision matrix for selecting a disposal and treatment sewage system

Kryteria oceniające Criteria for evaluation	Oceniane warianty Rated variants	
	W1	W2
Prostota i łatwość obsługi, 0–10 Simplicity and ease of use, 0–10	6	4
Koszty inwestycyjne kanalizacji i oczyszczalni, mln zł The investment costs of sewerage and sewage treatment, mln zł	4,51	1,9
Koszty eksploatacji kanalizacji i oczyszczalni, tys. zł · rok ⁻¹ The operating costs of sewerage and wastewater, thous. zł · year ⁻¹	197,0	31,0
Aspekty społeczne (na podstawie ankiet), 0–10 Social aspects (surveys), 0–10	8	2
Oddziaływanie na środowisko (odory, hałas), 0–10 Impact on the environment (odors, noise), 0–10	7	5

ANALIZA WIELOKRYTERIALNA ZAPROPONOWANYCH ROZWIĄZAŃ I WSKAZANIE ROZWIĄZANIA NAJKORZYSTNIEJSZEGO

Dla porównania rozwiązań techniczno-technologicznych systemów usuwania i unieszkodliwiania ścieków sanitarnych w dużym regionie, o charakterze wiejskim zaproponowano analizę wielokryterialną. Do metody analizy wielokryterialnej przyjęto warianty techniczno-technologiczne rozwiązań systemu usuwania i unieszkodliwiania ścieków.

Dokonanie oceny, porównanie i wybór najkorzystniejszego z zaproponowanych rozwiązań poddanych ocenie możliwe jest dzięki liczbowemu określeniu wskaźników oceniających. Pokazują one konsekwencje działania i stanowią miarę realizacji celów stawianych regionalnym rozwiązaniom gospodarki wodno-ściekowej [Lundin i in. 1999]. W niniejszym przykładzie rolę wskaźników oceniających rozwiązanie pełnią przyjęte do oceny kryteria opisujące warianty przedstawione wyżej. Są one opisane i oszacowane na rzeczywistym przykładzie możliwości rozwiązań wariantowych systemów usuwania i unieszkodliwiania ścieków w jednostkach osadniczych Puławy i Wisłoczek, opisane w opracowaniu Dwuwariantowa koncepcja... [2008].

Problem decyzyjny zostaje sformułowany w momencie, gdy ustalone są kryteria oceniające i określone ich wartości wyrażone w postaci skończonego zbioru liczb będących wynikiem oceny poszczególnych technologii pod względem wybranych kryteriów. Liczby owe, stanowiące miarę konsekwencji realizowanych technologii, w teorii decyzji zapisywane są w tzw. macierzy decyzyjnej (tab. 2) i stanowią formalny zapis wielokryterialnego dyskretnego problemu decyzyjnego [Hokkanen i Salminen 1997, Belton i Stewart 2002, Aragonés-Beltrána i in. 2009, Generowicz i in. 2011a, 2011b].

Tabela 2. Ogólny zapis macierzy decyzyjnej [Generowicz i in. 2011a, 2011b, Mucha i in. 2012]
Table 2. General decision matrix notation [Generowicz i in. 2011a, 2011b, Mucha i in. 2012]

Oznaczenie / opis kryterium / jednostki Designation / description criterion / unit	Ocena poszczególnych wariantów usuwania i unieszkodliwiania ścieków w wybranym regionie Evaluation of the different variants removal and disposal of sewage in the selected region			
	Wariant 1 Variant 1	Wariant 2 Variant 2	...	Wariant N Variant N
kryt ₁ / cryt ₁	r_{11}	r_{21}	...	r_{N1}
...
kryt _{M}	r_{1M}	r_{2M}	...	r_{NM}

r_{NM} – miara stopnia realizacji M -tego kryterium oceniającego w N -tym wariantcie

Należy zaznaczyć, że ostatecznie zaproponowana metoda rozwiązania zadania decyzyjnego jest wyłącznie narzędziem matematycznym, wskazującym strategię, podczas gdy najważniejszym i najtrudniejszym elementem całej procedury jest znalezienie kryteriów oceny oraz metody ich wartościowania. Prawidłowe znalezienie grupy kryteriów i ich wartości jest kluczowym elementem całej analizy, a przyjęta metoda analizy wielokryterialnej pozwala wyłącznie na matematyczne rozwiązanie. Należy również zaznaczyć, że ostateczną decyzję o rozwiązaniu kwestii systemu techniczno-technologicznego usuwania i unieszkodliwiania ścieków podejmuje decydent. Przyjęta metodyka wskazuje jedynie najkorzystniejsze rozwiązanie uzależnione od wartości wag kryteriów.

Do realizacji zadania decyzyjnego, w celu potwierdzenia wyniku i ostatecznego rozwiązania zadania, zastosowano dwie metody analizy decyzyjnej – były to: metoda programowania kompromisowego i metoda AHP (hierarchii analitycznej).

Metoda programowania kompromisowego wykorzystuje koncepcję porządkowania poszczególnych wariantów według ich odległości od ustalonego punktu idealnego $X'(x'_1, x'_2, \dots, x'_M)$, którego wszystkie współrzędne x'_m są równe maksymalnej wartości przyjętej skali normalizacyjnej. Matematyczny zapis miary odległości badanej danego wariantu od punktu idealnego ma postać:

$$L_\alpha(s_n) = \sum_{m=1}^M w_m^\alpha \cdot (x'_m - r'_{NM})^\alpha \quad (1)$$

natomiast wybór najkorzystniejszego rozwiązania odbywa się wg zasady:

$$s_j = \bar{s} \Leftrightarrow L_\alpha(s_j) = \min L_\alpha(s_n); n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

gdzie:

- $L_\alpha(s_n)$ – miara rozbieżności danego wariantu s_n od punktu idealnego,
- \bar{s} – wybrany wariant,
- w_m – współczynnik wagi kryterium m ,
- x'_m – m -ta współrzędna punktu idealnego,
- r'_{NM} – znormalizowana wartość kryterium oceniającego,
- M – liczba kryteriów,
- α – wykładnik potęgowy mierzący odchylenie strategii od punktu idealnego X' , przyjmowany w praktyce jako 1, 2 oraz ∞ .

Decydując się na przyjęcie któregoś z rozwiązań technologicznych, można dopuścić pewne ograniczenia w wyborze wariantów. W niniejszych obliczeniach założono takie ograniczenia, czyli tzw. próg akceptowalności obliczony jako:

$$s_n^*) = 0,1 \cdot L(s_n)_{\min} \quad (3)$$

W związku z tym ograniczeniem strategię akceptowalne są zaznaczone w tabeli 4 gwiazdką (*) i stanowią rozwiązanie zadania decyzyjnego jako wybór strategii leżącej akceptowalnie blisko punktu idealnego.

Ostatecznym rozwiązaniem przy zastosowaniu metody programowania kompromisowego analizy wielokryterialnej jest uszeregowanie wariantów zaproponowanych rozwiązań, od rozwiązania najbardziej korzystnego do najmniej korzystnego, przy uwzględnieniu dodatkowo wagi kryteriów oceniających.

Sformułowanie problemu decyzyjnego jest opisane przez znormalizowaną macierz decyzyjną tego problemu zapisaną w tabeli 3.

Tabela 3. Znormalizowana macierz decyzyjna wyboru wariantu usuwania i unieszkodliwiania ścieków na przykładzie wiejskich jednostek osadniczych

Table 3. Removal and disposal variant standardized decision matrix on the example of countryside settlement units

Kryteria oceniające Criteria for evaluation	Oceniane warianty – Rated variants	
	W1	W2
Prostota i łatwość obsługi Simplicity and ease of use	0,55	0,33
Koszty inwestycyjne, mln zł Investment costs, mln zł	0	1
Koszty eksploatacji, tys. zł · rok ⁻¹ Operating costs, thous. zł · year ⁻¹	0	1
Aspekty społeczne (ankiety) Social aspects (surveys)	0,77	0,11
Oddziaływanie na środowisko Impact on the environment	0,66	0,44

W przyjętej do obliczeń metodzie programowania kompromisowego konieczne jest, by ustalić hierarchię ważności poszczególnych kryteriów, określając priorytety uczestników procesu decyzyjnego [Generowicz i in., 2011a, 2011b]. Wagę kryteriów do niniejszych obliczeń przyjęto na podstawie subiektywnej oceny autorów publikacji. Potrzebne do obliczeń wartości wag kryteriów podane są w tabeli 4. Np. w przypadku 1 każdemu kryterium przyporządkowano wagę 1 – wszystkie kryteria są równoważne; w kolejnych przypadkach następnemu kryterium przyporządkowywano wagę 2, podczas gdy pozostałym – wagę 1, czyli kryterium pierwsze jest dwa razy ważniejsze od pozostałych itd. W trzech ostatnich wierszach tabeli 4 przyporządkowywano różne wagi grupom kryteriów ekonomicznych lub społecznych i oddziaływania na środowisko. Grupy tych kryteriów przewartościowano jako pięć razy ważniejsze od pozostałych. Wyniki obliczeń analizy wielokryterialnej przedstawiono w tabeli 4. Rezultatem jest uszeregowanie wariantów, od najbardziej do najmniej korzystnego. Metoda daje możliwość dodatkowego ważenia kryteriów poprzez zastosowanie we wzorze wykładnika potęgowego α . Wykładnik ten pozwala na dodatkowe zważenie każdej odchyłki od punktu idealnego, proporcjonalnie do ich wielkości. Im wartość α jest wyższa, tym większego znaczenia nabierają duże odchylenia strategii od punktu idealnego. Poszczególne przypadki obliczeniowe wraz z wynikami uszeregowania rozwiązań wariantowych, uwzględniające różne wartości współczynnika α i wagi kryteriów są zawarte w trzech różnych kolumnach w tabeli 4.

Tabela 4. Uporządkowanie poszczególnych wariantów rozwiązań usuwania i unieszkodliwiania ścieków na przykładzie wiejskich jednostek osadniczych

Table 4. Wastewater removal and disposal solutions variants sorted out on the example of countryside settlement units

Wagi kryteriów Weighting of the criteria	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha = 5$
1:1:1:1:1	$W2^* \rightarrow W1^*$	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$
2:1:1:1:1	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1^*$	$W1^* \rightarrow W2$
1:2:1:1:1	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$
1:1:2:1:1	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$
1:1:1:2:1	$W2^* \rightarrow W1^*$	$W1^* \rightarrow W2$	$W1^* \rightarrow W2$
1:1:1:1:2	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$	$W1^* \rightarrow W2^*$
5:1:1:1:1	$W1^* \rightarrow W2^*$	$W1^* \rightarrow W2$	$W1^* \rightarrow W2$
1:5:1:1:1	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$
1:1:5:1:1	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$
1:1:1:5:1	$W1^* \rightarrow W2$	$W1^* \rightarrow W2$	$W1^* \rightarrow W2$
1:1:1:1:5	$W1^* \rightarrow W2^*$	$W1^* \rightarrow W2$	$W1^* \rightarrow W2$
1:5:5:1:1	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$	$W2^* \rightarrow W1$
5:1:1:5:1	$W1^* \rightarrow W2$	$W1^* \rightarrow W2$	$W1^* \rightarrow W2$
5:1:1:5:5	$W1^* \rightarrow W2$	$W1^* \rightarrow W2$	$W1^* \rightarrow W2$

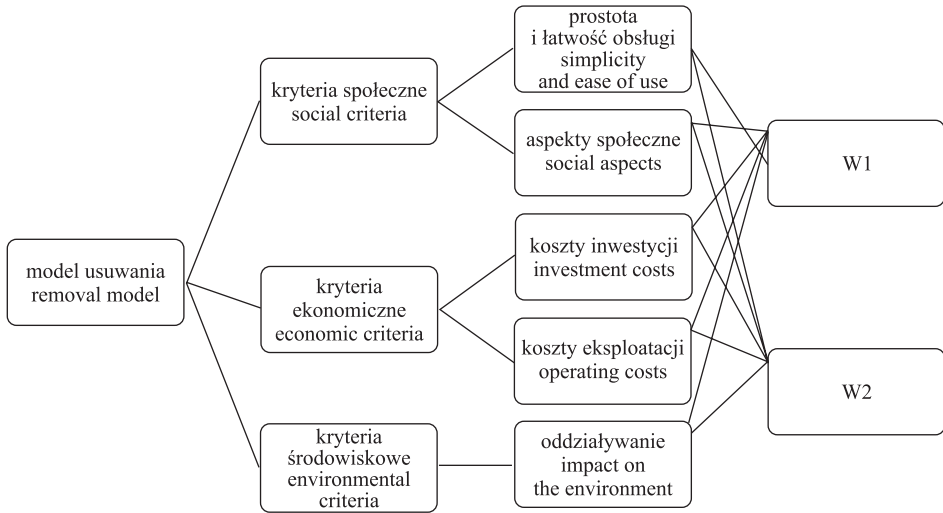
Podsumowując wyniki obliczeń, należy zauważyć, że w 42 przypadkach obliczeniowych części (23 razy) wybrany zostaje wariant W2, czyli rozwiązanie polegające na lokalizacji 27 indywidualnych oczyszczalni ścieków z odprowadzeniem ścieków oczyszczonych do wód powierzchniowych płynących. Nie jest to jednak bardzo znacząca przewaga, gdyż 19 razy wybrany został wariant W1, czyli rozwiązanie polegające na budowie systemu kanalizacji mieszanej grawitacyjno-tłocznej, z 8 przepompowniami oraz 2 lokalnymi oczyszczalniami dla jednej miejscowości oraz 1 oczyszczalnią dla miejscowości drugiej, z odprowadzeniem ścieków oczyszczonych do wód powierzchniowych płynących. Nie jest to więc rozwiązanie jednoznaczne, zwłaszcza biorąc pod uwagę, że niektóre z nich są stosunkowo blisko punktu idealnego, o czym świadczą rozwiązania zaznaczone gwiazdką (*). Są to rozwiązania leżące akceptowalnie blisko rozwiązania najkorzystniejszego (zgodnie ze wzorem 3). Interpretując wynik obliczeń, należałoby wziąć pod uwagę grupy kryteriów, ponieważ podczas przeważania grupy kryteriów ekonomicznych jako najkorzystniejszy wybrany zostaje wariant W2, a w pozostałych przypadkach wariant W1. Mimo braku jednoznacznego rozwiązania można jednak powiedzieć, że jeżeli istotniejsze są w regionie kryteria ekonomiczne, korzystniejszy okazuje się wariant W2, jeżeli natomiast w regionie wyżej stawia się kryteria społeczne lub kwestię wpływu na środowisko, wówczas lepiej jest przyjąć rozwiązanie W1.

Metoda AHP (Analytical Hierarchy Process) to metoda analizy decyzyjnej, w której preferencje określone są za pomocą względnych ocen ważności kryteriów oceniających i wariantów, oceny te powstają poprzez porównywanie parami wszystkich kryteriów znajdujących się na danym poziomie hierarchii.

Zastosowano ją, wykorzystując oprogramowanie HIPRE [Web-HIPRE... 1998–2007] przygotowane i udostępniane przez Politechnikę w Helsinkach. Wykorzystanie innej metody w ostatnim etapie obliczeń będzie potwierdzeniem znalezienia właściwego rozwiązania i prawidłowego rozwiązania zadania decyzyjnego.

Metoda hierarchicznego wyboru AHP umożliwia dekompozycję złożonego problemu decyzyjnego oraz utworzenie rankingu finalnego dla skończonego zbioru wariantów, przedstawione na tzw. drzewie hierarchicznym (ryc. 2) [Saaty 2001, 2004, Mucha i Iwanejko 2012]. Dzięki temu możliwy jest równoczesny ranking wielu dopuszczalnych wariantów projektowych ze względu na wiele nierównoważnych kryteriów oceny. Metodyka zakłada więc konieczność oceny ważności wariantów ze względu na każdy z nich z osobna, a dopiero ocena końcowa dokonywana jest ze względu na wszystkie kryteria równocześnie. Dla łatwości obliczeń i porównań stosuje się tzw. drzewo decyzyjne szeregując w nim zarówno wszystkie warianty, jak i kryteria oceniające.

Kolejnym krokiem w prowadzeniu analizy jest przyznanie wag poszczególnym kryteriom oceniającym. Wagi przypisywano zgodnie z metodą AHP, której założeniem jest porównanie parami kryteriów: każdego z każdym w poszczególnych grupach. Miarą konsekwencji w przyjmowaniu wag jest współczynnik CI (Consistency Index) w programie HIPRE+ zwany CM (Consistency Measure). Teoretycznie współczynnik przyjmuje wartość od 0 do 1, za akceptowalne przyjmuje się wartości poniżej 0,2. Kryteria mogą w tym programie przyjmować wagi w zakresie 1–9, gdzie: 1 – kryterium najmniej ważne, 9 – kryterium najbardziej ważne.



Ryc. 2. Drzewo hierarchiczne zbudowane do celów wyboru wariantu usuwania i unieszkodliwiania ścieków

Fig. 2. Hierarchical outline constructed for the choice of wastewater removing and disposal option

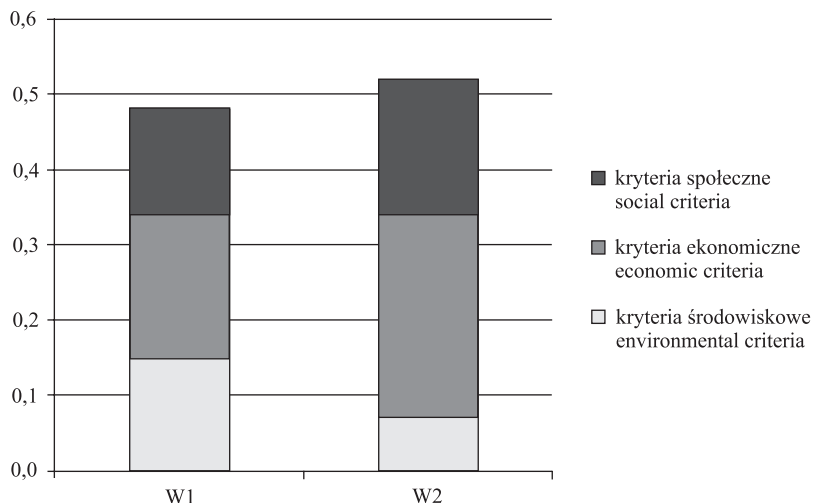
Do celów obliczeniowych w niniejszej metodzie przyjęto, że wagi poszczególnych grup kryteriów (społecznych : ekonomicznych : środowiskowych) mają się do siebie jak 0,319 : 0,46 : 0,221, czyli przeważone zostały kryteria ekonomiczne.

Przy omówionych założeniach i wykorzystaniu omówionej metody, najkorzystniejszy wynik analizy decyzyjnej (ryc. 3) otrzymano dla wariant W2.

Dodatkowym atutem programu jest możliwość wykonania analizy wrażliwości, w której dokonuje się analizy wyników poprzez zmianę wagi wybranego kryterium, przy zachowaniu wag pozostałych kryteriów. Ryciny 3–4 przedstawiają więc analizę wrażliwości wariantu, zmieniając kolejno wagi kryteriów społecznych i środowiskowych. Jak widać na rycinie 4, zmniejszenie wagi kryteriów społecznych do wartości 0 spowodowałoby zmianę wariantu. Natomiast na rycinie 5 widać, że niewielka zmiana wagi kryteriów środowiskowych zmieni wynik zadania decyzyjnego i wskaże rozwiązanie W1.

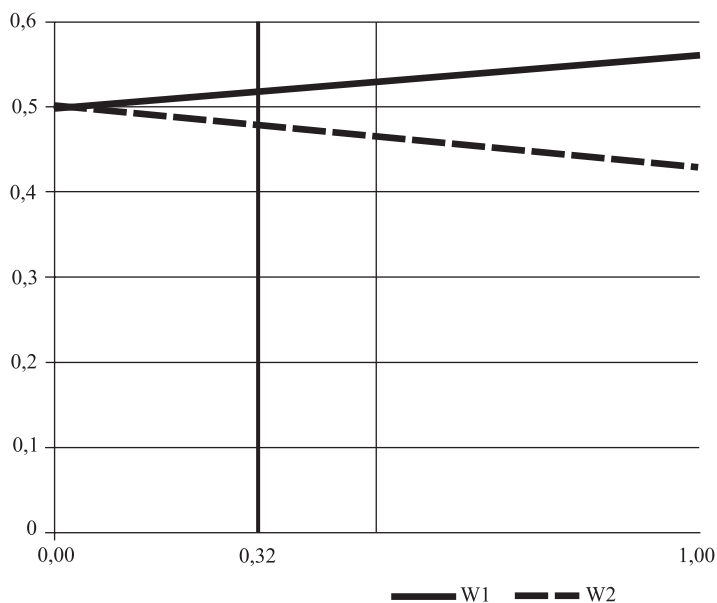
Zmieniając wagi grup kryteriów w taki sposób, aby poszczególne grupy kryteriów (społecznych : ekonomicznych : środowiskowych) miały się do siebie jak 0,314 : 0,065 : 0,621, czyli wzrosło znaczenie kryteriów środowiskowych, podczas gdy waga kryteriów ekonomicznych jest praktycznie marginalna, wynik analizy decyzyjnej przesuwa się i jako korzystniejszy wybrany zostaje wariant W1. Zostało to przedstawione na rycinie 6.

Porównując wyniki obydwu metod wielokryterialnych: metody programowania kompromisowego oraz metody AHP, można powiedzieć, że wynik jest identyczny i jedna metoda potwierdza drugą. W obydwu metodach nie ma jednoznacznego wyboru analizowanych wariantów, które uzależnione są od wag kryteriów narzuconych przez decydenta lub autora analizy decyzyjnej. W obydwu metodach przeważenie kryteriów ekonomicznych wpływa na zmianę rozwiązania i na ostateczny wynik obliczeń.



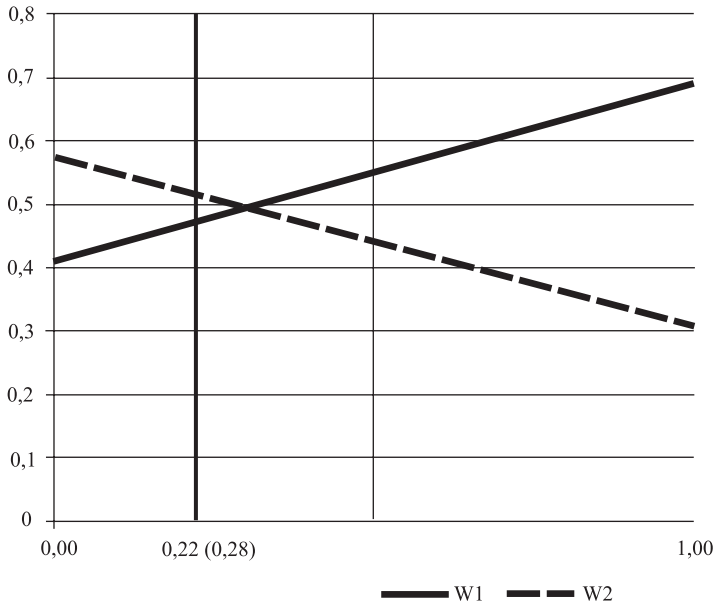
Ryc. 3. Wyniki obliczeń metodą AHP – wybór wariantu usuwania i unieszkodliwiania ścieków, gdy przeważone znacznie zostają kryteria ekonomiczne [Web-HIPRE... 1998–2007]

Fig. 3. AHP calculation results for the choice of wastewater removing and disposal option, while outweighed are the economic criteria [Web-HIPRE... 1998–2007]



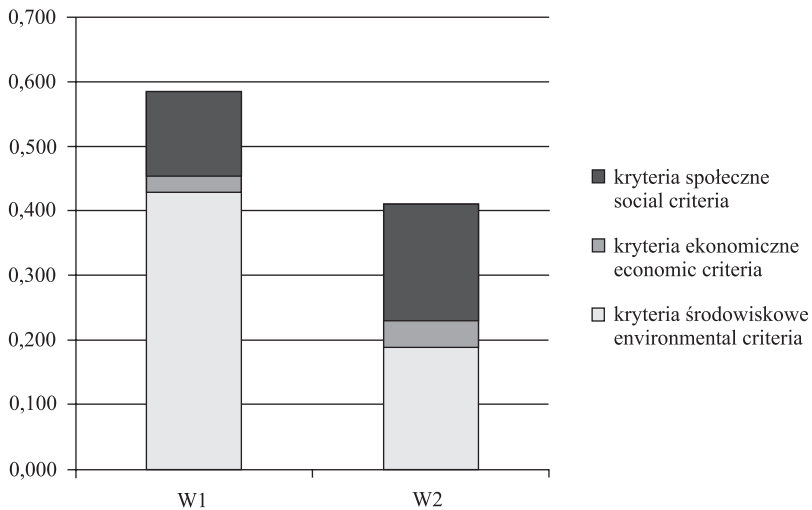
Ryc. 4. Analiza wrażliwości wpływu wagi grupy kryteriów społecznych na wynik analizy i wyboru wariantu usuwania i unieszkodliwiania ścieków [Web-HIPRE... 1998–2007]

Fig. 4. Sensitivity analysis impact of the social criteria weight for analysis result and wastewater removal and disposal selection option [Web-HIPRE... 1998–2007]



Ryc. 5. Analiza wrażliwości wpływu wagi grupy kryteriów środowiskowych na wynik analizy i wyboru wariantu usuwania i unieszkodliwiania ścieków [Web-HIPRE... 1998–2007]

Fig. 5. Sensitivity analysis impact of the environmental criteria weight for analysis result and wastewater removal and disposal selection option [Web-HIPRE... 1998–2007]



Ryc. 6. Wyniki obliczeń metodą AHP – wybór wariantu usuwania i unieszkodliwiania ścieków, gdy przeważone znacznie zostają kryteria środowiskowe [Web-HIPRE... 1998–2007]

Fig. 6. AHP calculation results for the choice of wastewater removing and disposal option, while outweighed are the environmental criteria [Web-HIPRE... 1998–2007]

WNIOSKI

- Analiza i wybór rozwiązania systemu usuwania i unieszkodliwiania ścieków z terenów wiejskich jest skomplikowanym zadaniem decyzyjnym, które powinno być ocenione w wielu różnorodnych aspektach pod kątem różnych kryteriów i mierników.
- W koncepcji z uwagi na niższe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne zaproponowano do realizacji wariant z indywidualnymi oczyszczalniami, co nie potwierdza wyników analizy wielokryterialnej.
- Zastosowane metody analizy wielokryterialnej: programowania kompromisowego i hierarchii analitycznej wskazują na dokładnie te same rozwiązania zadania decyzyjnego, uzależniając wynik od przyjętych do analiz wag kryteriów oceniających

PIŚMIENNICTWO

- Aragonés-Beltrána P., Mendoza-Roca J.A., Bes-Piáa A., Garcia- Melon E., Parra- Ruiz E., 2009. Application of multi-criteria decision analysis to jar-test results for chemicals selection in the physical-chemical treatment of textile wastewater. *J. Hazard. Materials* 164, 288–295.
- Balkema A., Weijers S., Lambert F., 1998. On Methodologies for Comparison of Wastewater Treatment Systems with Respect to Sustainability. Conf. WIMEK Options for Closed Water Systems. Wageningen, Holandia.
- Belton V., Stewart T., 2002. Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers Norwell (Mass.).
- Dwuwariantowa koncepcja kanalizacji sanitarnej we wsiach Puławy i Wisłoczek wraz z koncepcjami oczyszczalni ścieków dla tych wsi, 2008. Profesjonalne Doradztwo Technologiczne w Oczyszczaniu Ścieków Kraków.
- Generowicz A., Kowalski Z., Kulczycka J., Banach M., 2011a. Ocena rozwiązań technologicznych w gospodarce odpadami komunalnymi z wykorzystaniem wskaźników jakości technologicznej i analizy wielokryterialnej, *Przem. Chem.* 90(5), 747–753.
- Generowicz A., Kulczycka J., Kowalski Z., Banach M., 2011b. Assessment of waste management technology using BATNEEC options, technology quality method and multi-criteria analysis. *J. Environ. Manag.* 92(4), 1314–1320.
- Hokkanen J., Salminen P., 1997. Choosing a solid waste management system using multi-criteria decision analysis. *Europ. J. Operat. Res.* 98, 19–36.
- Lundin M. Molander S., Morrison G.M., 1999. A set of indicators for the assessment of temporal variations in the sustainability of sanitary systems. *Water Sci. Technol.* 39(5), 235–242.
- Mucha Z., Iwanejko R., 2012. Zastosowanie metody AHP do wyboru systemu usuwania i oczyszczania ścieków z małej jednostki osadniczej. *Gaz Woda Techn. Sanit.* 10, 444–447.
- Mucha Z., Mikosz J., Generowicz A., 2012. Zastosowanie analizy wielokryterialnej do wyboru technologii w małych oczyszczalniach ścieków. *Czas. Techn. Politechniki Krakowskiej, ser. Środowisko* 1-Ś 109(4), 145–156.
- Mucha Z., Mikosz J., 2009. Racjonalne stosowanie małych oczyszczalni ścieków zgodnie z kryteriami zrównoważonego rozwoju. *Czas. Techn. Politechniki Krakowskiej, ser. Środowisko* 2-Ś.
- Roeleveld P.J. Klapwijk A., Eggels P. G., Rulkens W., van Starckenburg W., 1997. Sustainability of municipal wastewater treatment. *Water Sci. Technol.* 10, 221–228.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczegól-

- nie szkodliwych dla środowiska wodnego. Dz.U. z 2006 r. Nr 137, poz. 984; zmiana: Dz.U. z 2009 r. Nr 27, poz. 169.
- Saaty T., 2004. Decision making the analytical Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). J. Syst. Sci. Syst. Engin. 13(1), 1–35.
- Saaty T., 2001. L. Decision making for leaders. The Analytical Hierarchy Processes for decision in the complex world. RWS Publications. Pittsburgh.
- Web-HIPRE. Global Decision Support, 1998–2007, <http://www.hipre.hut.fi> [dostęp: 28.02.2014].

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.08.2014