



Marek Zawilski • Grażyna Sakson

WYBÓR METODY MODERNIZACJI SYSTEMU KANALIZACYJNEGO PRZY WYKORZYSTANIU METODY AHP

Marek Zawilski, dr hab. inż., prof. PŁ – Politechnika Łódzka

Grażyna Sakson, dr inż. – Politechnika Łódzka

adres korespondencyjny:

Instytut Inżynierii Komunalnej i Instalacji Budowlanych

Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź

e-mail: marek.zawilski@plodz.pl, grazyna.sakson-sysiak@plodz.pl

THE SELECTION OF THE METHOD FOR SEWERAGE SYSTEM MODERNISATION EMPLOYING THE AHP METHOD OF MULTICRITERIA OPTIMIZATION

SUMMARY: In the paper, we demonstrate the example of the use of Analytic Hierarchy Process (AHP) for searching an optimal solution of an urban sewerage system modernization. The principles of the AHP method and its applicability for environmental projects are presented. The five following criteria of solution assessment were taken into consideration: economic, ecological, reliability, social and technical. The aim of modernization of the sewerage system was reducing environmental impact due to CSO events, hydraulic relief of conduits and in consequence reducing of flooding on urban catchment. Four alternatives of meeting this aim were analysed: one storage tank prior to the CSO, eight storage tanks located on the catchment, one storage tank on the CSO channel, dispersed retention devices located on the sub-catchments.

The alternative no.1 was found as the optimal solution of the problem.

KEY WORDS: AHP, stormwater management, modernization of combined sewerage system

Wstęp

Modernizacja systemów kanalizacyjnych wymaga uwzględnienia różnych wariantów rozwiązań. Dotychczas są one oceniane zazwyczaj według jednego kryterium, najczęściej ekonomicznego. Pełna ocena takich zamierzeń wymaga natomiast uwzględnienia także kryteriów pozaekonomicznych, na przykład społecznych i niezawodnościowych. Ocenę taką umożliwia między innymi metoda AHP (*Analytical Hierarchy Process*), w której mogą być ujęte rozmaite kryteria mierzalne i niemierzalne, wartościowane względem siebie. W artykule przedstawiono ogólne zasady stosowania metody AHP oraz przykład jej zastosowania do wyboru optymalnego wariantu modernizacji systemu kanalizacyjnego dla rzeczywistej zlewni.

Optymalizacja systemów odprowadzania i unieszkodliwiania ścieków

Ocena planowanych przedsięwzięć inwestycyjnych powinna się opierać na wielu kryteriach technicznych i nietechnicznych oraz mierzalnych i niemierzalnych, które często są przeciwstawne względem siebie i nie mogą być spełnione jednocześnie w sposób optymalny. Dotychczas preferowane metody optymalizacyjne zazwyczaj biorą pod uwagę jedno kryterium – ekonomiczne¹. W przypadku modernizacji systemów kanalizacyjnych oprócz wyżej wymienionego kryterium niezwykle ważne są jeszcze inne, które mogą dotyczyć efektu ekologicznego, niezawodności systemu lub trudno wymiernych ocen odbioru przez społeczeństwo. Praktykowane jest również uwzględnianie większej liczby kryteriów przy podejmowaniu decyzji środowiskowych. W tym przypadku wybór rozwiązania dokonywany jest poprzez uznaniowe przypisywanie ocen poszczególnym wariantom i sporządzenie na tej podstawie wykresu radarowego².

Na ogół zadanie optymalizacji wielokryterialnej polega na wybraniu wariantu optymalnego ze skończonej (policzalnej) ich liczby. Każdy z wariantów jest opisany za pomocą zbioru różnych kryteriów wyboru, a więc cech (ocen), które mogą być formalnie przeciwstawne, ale które opatrujemy liczbami oceny (bardziej lub mniej arbitralnie). Oceny względnie ściśle dotyczą, oczywiście, kryteriów mierzalnych (przykładowo ceny), wyrażonych liczbami, a oceny *sensu stricto* uznaniowe – kryteriów niemierzalnych (przykładowo estetyki czy funkcjonal-

¹ R. Miłaszewski, *Ekonomika ochrony wód powierzchniowych*, Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok 2003.

² R. Błażejewski, T. Nawrot, *Kryteria wyboru systemu odprowadzania i oczyszczania ścieków komunalnych*, „Forum Eksploatatora” 2012 nr 2, s. 32-27.

ności), wyrażonych opisowo. Istota tego rodzaju optymalizacji wielokryterialnej sprowadza się do poszukiwania rozwiązania maksymalizującego ocenę łączną, najczęściej ważoną. Wynik jest nadal obarczony subiektywnością, ale wynika ona tylko z metodyki przydzielania ocen początkowych, natomiast sam algorytm poszukiwania optimum jest ściśle matematyczny i nie wpływa na ostateczny wynik.

Jeśliby w najprostszy sposób chcieć ująć wszystkie kryteria w jednej funkcji, zadanie można by zapisać jako:

$$F = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \dots + w_i f_i + \dots + w_n f_n \rightarrow \min/\max \quad (1)$$

gdzie:

F – funkcja zbiorcza dla każdego wariantu rozwiązania,

f_i – ocena kolejnego kryterium,

w_i – waga kolejnego kryterium (zazwyczaj suma $w_i = 1$).

Mamy tu jednak do czynienia z dwoma problemami:

1. Jak wyznaczyć wagi w_i ?
2. Jak zapisać wspólnie oceny kryteriów f_i , gdy są one wyrażone w różnych jednostkach?

Metoda *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

Jedną ze znanych metod optymalizacyjnych jest metoda AHP³. Polega ona w pierwszej kolejności na wyborze kryteriów optymalizacji, a następnie utworzeniu macierzy ich hierarchizacji, czyli porównywaniu ich nawzajem w celu określenia ich wag końcowych. Do oceny tej przyjmowana jest przedstawiona poniżej skala ocen (tabela 1).

Następnie porównuje się między sobą poszczególne warianty rozwiązań, stosując analogiczną metodykę porównań. Na końcu oblicza się dla każdego wariantu sumę średnią ważoną cech, a wariant optymalny to ten z maksymalną wartością sumy ważonej.

Przewagą opisywanej metody jest względna łatwość porównywania między sobą jednocześnie tylko dwóch kryteriów (parami), z czego następnie wynikają ich wagi. Unika się dzięki temu konieczności uznaniowego oszacowania wszystkich wag jednocześnie. Ponadto wielkości określonych w ten sposób wag podlegają sprawdzeniu przez obliczenie tak zwanego wskaźnika spójności W wyniku tego obliczenia można wskazać oceny podane błędnie, niespójne w stosunku do innych.

Metoda AHP jest odpowiednia szczególnie do wyboru optymalnego rozwiązania w przypadku, gdy rozwiązanie to należy oceniać zarówno za pomocą wskaźników mierzalnych, jak i niemierzalnych. W przypadku wyboru optymalnych wariantów technik ochrony środowiska takie przypadki występują bardzo często, gdyż oprócz aspektów ekonomicznych należy brać pod uwagę także na przykład społeczne.

³ T.L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw Hill International, Berkshire 1980.

Tabela 1
Skala ocen stosowana w metodzie AHP

Ocena opisowa	Ocena liczbową
Absolutna przewaga	9
Bardzo silna przewaga	7
Silna przewaga	5
Niewielka przewaga	3
Jednakowa istotność	1
Wartości pośrednie	2,4,6,8

Źródło: opracowanie własne.

Metoda AHP jest ciągle udoskonalana, a konsekwencją tego jest wprowadzenie metody rozszerzonej AHP/ANP, która bierze pod uwagę dodatkowo powiązania wewnętrzne między grupami elementów (klastrami) optymalizowanego systemu⁴.

Zastosowanie metody AHP na świecie

Opisywana metoda jest stosowana na świecie od ponad 30 lat⁵. W zakresie nauk o środowisku w ostatnim dziesięcioleciu była ona najczęściej stosowaną metodą optymalizacji, szczególnie przy podejmowaniu decyzji w zakresie gospodarki odpadami, bogactw naturalnych, zrównoważonej produkcji, GIS oraz ocen oddziaływania na środowisko⁶. Ogółem na 312 przypadków stosowania optymalizacji wielokryterialnej w 150 z nich stosowano metodę AHP.

W przypadku opisanym przez Bottero i in.⁷ metoda AHP/ANP posłużyła do wyboru optymalnego wyboru technologii oczyszczania ścieków z przemysłu spożywczego. Uwzględniono trzy główne kryteria optymalizacji: ekonomiczne (koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, udział funduszy publicznych, rentowność obiektu i oszczędność energii), technologiczne (złożoność systemu i jego funkcjonalność) oraz środowiskowe (zapotrzebowanie surowców, hałas, odory, zanieczyszczenie gleby, wód i powietrza, opinia społeczna, aspekty wizualne).

⁴ T.L. Saaty, *Theory and Applications of the Analytic Network Process*, RWS Publications, Pittsburgh 2005; T.L. Saaty, L.G. Vargas, *Decision Making with the Analytic Network Process*, Springer Science, New York 2006.

⁵ T.L. Saaty, *The Analytic...*, op. cit.

⁶ I.B. Huang, J. Keisler, I. Linkov, *Multi-criteria decision analysis in environmental sciences. Ten years of applications and trends*, „Science of the Total Environment” 2011 nr 409, s. 3578-3594.

⁷ M. Bottero, E. Comino, V. Riggio, *Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems*, „Environmental Modelling & Software” 2011 nr 26, s. 1211-1224.

Na tej podstawie została wybrana technologia fitoremediacji, jako najlepsza do oczyszczania ścieków z małych wytwórni sera.

Metoda AHP bywa także stosowana do oceny istniejących rozwiązań ochrony środowiska, na przykład do oceny oddziaływania systemów kanalizacyjnych na odbiornik i użytkowanie jego wód⁸.

W Polsce omawiana metoda była stosowana między innymi do rozwiązywania problemów organizacyjnych i menedżerskich, optymalizacji produkcji przemysłowej⁹, sterowania bezpieczeństwem obiektu technicznego¹⁰, a także do wyboru systemu usuwania i oczyszczania ścieków¹¹.

Przykład zastosowania metody AHP do określenia optymalnego wariantu modernizacji systemu kanalizacyjnego

Założenia

Poniżej przedstawiono przykład wyboru optymalnego wariantu modernizacji systemu kanalizacji ogólnospławnej dla wybranej zlewni w centrum Łodzi, wykorzystując opisywaną metodę AHP. Obecnie system ten nie spełnia obowiązujących przepisów dotyczących częstości działania przelewów burzowych (maksymalnie 10 razy w roku) oraz normy PN-EN 752:2008 w zakresie częstotliwości zalewania terenu. Celem modernizacji jest spełnienie powyższych wymagań. Modernizacja systemu umożliwi również ograniczenie zrzutów do odbiornika ładunków zanieczyszczeń z kanalizacji ogólnospławnej. Brano pod uwagę zarówno zrzuty z przelewów burzowych, jak również ścieki biologicznie nieoczyszczone kierowane by-passem do odbiornika w okresach bardzo intensywnych opadów przez Grupową Oczyszczalnię Ścieków, do której trafiają ścieki z analizowanej zlewni. Dane dotyczące funkcjonowania systemu kanalizacyjnego uzyskano w rezultacie jego symulacji programem EPA SWMM dla 10 lat. Obliczenia symulacyjne pozwoliły na uzyskanie informacji na temat przeciążeń sieci, częstotliwości działania przelewów burzowych oraz emisji zanieczyszczeń do odbiorników.

Rozpatrzono cztery warianty modernizacji systemu, umożliwiające osiągnięcie powyższych celów:

1. Budowa jednego zbiornika retencyjnego przed przelewem burzowym.

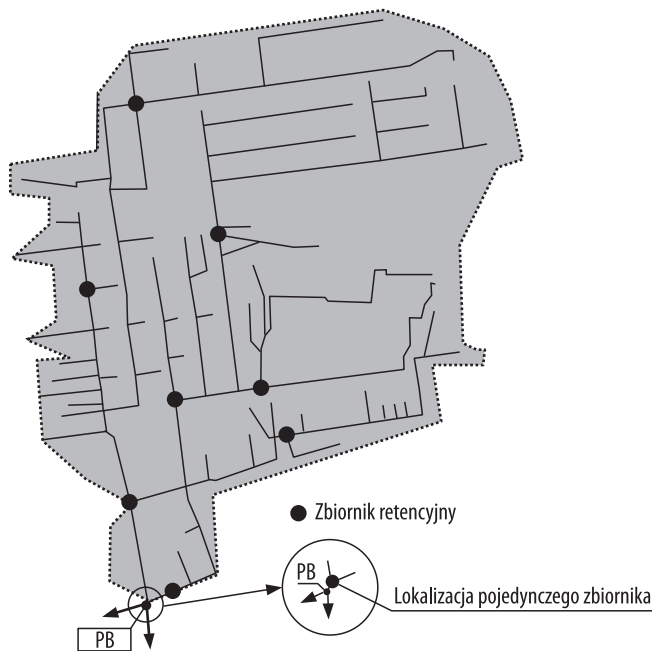
⁸ A. Benzerra i in., *Decision support for sustainable urban drainage system management: A case study of Iijel*, „Journal of Environmental Management” 2012 nr 101, s. 46-53.

⁹ K. Pawłowski, M. Bieniek, *Zastosowanie metody AHP/ANP w podejmowaniu decyzji w celu zwiększenia produkcji*, Projekt, AGH, Kraków 2012.

¹⁰ O. Downarowicz i in., *Zastosowanie metody AHP do oceny i sterowania poziomem bezpieczeństwa złożonego obiektu technicznego. Wybrane metody ergonomii i nauki o eksploatacji*, Politechnika Gdańska, Wydział Zarządzania i Ekonomii, Zakład Ergonomii i Eksploatacji Systemów Technicznych, Gdańsk 2000.

¹¹ Z. Mucha, R. Iwanejko, *Zastosowanie metody AHP do wyboru systemu usuwania i oczyszczania ścieków z małej jednostki osadniczej*, „Gaz, Woda i Technika Sanitarna” 2012 nr 10, s. 444-447.

Rysunek 1
Schemat analizowanej zlewni



Źródło: opracowanie własne.

2. Budowa 8 zbiorników retencyjnych na zlewni o pojemności łącznej równej pojemności pojedynczego zbiornika według wariantu 1.
3. Budowa zbiornika retencyjnego na burzowcu, opróżnianego pompowo do kolektora poniżej przelewu.
4. Zastosowanie retencji rozproszonej na zlewni wraz z lokalną infiltracją do gruntu (ograniczenie spływu ścieków opadowych do kanalizacji ogólnospławnej).

Do ceny każdego z wariantów przyjęto następujące kryteria i wskaźniki kwantyfikujące:

1. Kryterium ekonomiczne – na podstawie wielkości nakładów inwestycyjnych i kosztów eksploatacyjnych określono wskaźnik oczekiwanych kosztów rocznych K_r . Przyjęto, że wariant, który uzyska największą wartość wskaźnika K_r otrzymuje ocenę 1, zaś wariant o najmniejszej wartości K_r – ocenę większą (według ogólnej skali ocen) w zależności od tego, na ile jest subiektywnie lepszy od wskaźnika najgorszego. Zdecydowano, że oceny dla pozostałych wariantów będą przeliczane proporcjonalnie do kosztów poszczególnych wariantów, a więc zrezygnowano z ocen uznaniowych. Przy takim założeniu, w przypadku stosunkowo nieznacznych różnic wskaźnika K_r , wskaźniki oceny będą także mało zróżnicowane i warianty będą oceniane podobnie.

Tabela 2

Przykład danych do optymalizacji wyboru wariantu modernizacji systemu kanalizacji ogólnospławnej

	Kryterium				
	Ekonomiczne (oczekiwany roczny koszt) [zł/a]	Ekologiczne (redukcja ładunku ChZT) [%]	Niezawodnościowe (liczba przeciążeń)	Spółeczne (ocena uciążliwości, zajętości terenu na danej zlewni)	Techniczne (ocena – łatwość obsługi, doświadczenie w stosowaniu, wymagania eksploatacyjne)
Wariant 1 (1zb) przed PB	2.7	68	445	Konflikt w przeznaczeniu terenu na inne inwestycje, nie niszczy ani nie poprawia krajobrazu	Kłopoty lokalizacyjne, opróżnianie grawitacyjnie, wieloletnie doświadczenie w stosowaniu
Wariant 2 (8zb)	3.2	63	234	W kilku przypadkach konflikt w przeznaczeniu terenu na inne inwestycje, nie niszczy ani nie poprawia krajobrazu	Problemy ze znalezieniem miejsca – trzy z ośmiu zbiorników są trudne pod względem znalezienia terenu, opróżnianie grawitacyjne, wieloletnie doświadczenie w stosowaniu
Wariant 3 (1 zb po PB otwarty)	1.05	36	445	Zbiornik otwarty, uciążliwość zapachowa, pogorszenie walorów krajobrazowych, korzystne warunki lokalizacyjne	Łatwość realizacji, niezbyt głęboki, bezproblemowa lokalizacja, konieczność opróżniania pompowego
Wariant 4 (rozprosz+inf)	2.6	45	79	Zasilanie wód gruntowych sprzyja zachowaniu naturalnego obiegu wody, urządzenia nie zajmują powierzchni przeznaczonej, na inny cel, mogą stanowić element krajobrazu, nie są uciążliwe dla otoczenia	Brak wieloletnich doświadczeń w eksploatacji, trudne do realizacji w przypadku dużej liczby elementów

Źródło: opracowanie własne.

2. Kryterium ekologiczne – jako wskaźnik przyjęto procentową redukcję ładunku ChZT wnoszonego do odbiornika przez przelewy i by-pass oczyszczalni dla każdego wariantu w stosunku do stanu istniejącego. Wariant najgorszy (emisja największa) otrzymuje ocenę 1, zaś wariant najlepszy (emisja najmniejsza) otrzymuje ocenę zgodnie ze skalą ocen AHP. Oceny dla pozostałych wariantów przelicza się proporcjonalnie, jak w przypadku poprzedniego kryterium.
3. Kryterium niezawodnościowe – ocenione zostało w analizowanym przypadku według liczby przeciążeń odcinków sieci w okresie obliczeniowym. Podobnie jak w poprzednich przypadkach ocenę 1 przypisano wariantowi z największą liczbą przeciążeń, zaś ocenę największą, według skali ocen AHP, wariantowi z najmniejszą liczbą przeciążeń, a pozostałe warianty otrzymują oceny pośrednie proporcjonalne.

4. Kryterium społeczne – pod uwagę wzięto następujące subkryteria: zajęcie terenu, wcześniej planowanego na inny cel oraz zachowanie walorów środowiskowych, na przykład poprawa cyklu obiegu wody, korzystny wpływ na szatę roślinną, walory krajobrazowe i inne.
 5. Kryterium techniczne – pod uwagę wzięto doświadczenia w stosowaniu urządzeń, łatwość ich obsługi i wymagania eksploatacyjne.
- Kryteria 4 i 5 są więc oceniane czysto subiektywnie.

Charakterystykę poszczególnych wariantów i przypisane im obliczone wskaźniki, oparte na przyjętych kryteriach, przedstawiono w tabeli 2.

Obliczenia

Na początku sporządzono macierz porównań wzajemnych kryteriów oceny rozwiązania dla poszczególnych cech (kryteriów oceny). Wartości cech porównawczych a_{ij} w macierzy są określone arbitralnie według porównania cech wiersza i kolumny, przy czym zgodnie z tabelą 1 porównaniom tym przypisuje się liczbę całkowitą. Przykładowo wartość a_{14} wynika z porównania cechy 1 w wierszu 1 z cechą 4 z kolumny 4 (w tabeli 3 kryterium ekonomiczne oceniono jako mające niewielką przewagę, równą 3, nad społecznym). Wartości ocen odwrotnych, są odwrotnościami powyższych ocen całkowitych, na przykład $a_{41} = 1/3 = 0.33$ (ocena kryterium społecznego względem ekonomicznego).

Najwyższą preferencję przypisano kryterium ekologicznemu, w stosunku do pozostałych, kolejno do: ekonomicznego, niezawodnościowego, społecznego i technicznego, przy czym najwyższy wskaźnik – 7 – odpowiada silnej przewadze. Kryterium ekonomiczne podobnie jest preferowane w stosunku do niezawodnościowego, społecznego i technicznego, przy najwyższej ocenie 6 – silna przewaga. Kryterium niezawodnościowe góruje nad technicznym z niewielką przewagą, a społeczne oceniono jako ważniejsze od niezawodnościowego i technicznego, również niewielką przewagą.

Tabela 3
Macierz porównań wzajemnych dla cech

Kryterium		1	2	3	4	5
		Ekonomiczne	Ekologiczne	Niezawodnościowe	Społeczne	Techniczne
1	Ekonomiczne	1.00	0.55	4.00	3.00	6.00
2	Ekologiczne	3.00	1.00	5.00	4.00	7.00
3	Niezawodnościowe	0.25	0.20	1.00	0.33	2.00
4	Społeczne	0.33	0.25	3.00	1.00	3.00
5	Techniczne	0.17	0.14	0.50	0.33	1.00
	Suma	4.75	1.93	13.50	8.67	19.00

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4

Wyznaczanie współczynnika spójności

Kryterium	1	2	3	4	5	6	7
	Ekonomiczne	Ekologiczne	Niezawodności	Społeczne	Techniczne	Średnia geometryczna	Wektor priorytetu
Ekonomiczne	1.00	0.33	4.00	3.00	6.00	1.89	0.269
Ekologiczne	3.00	1.00	5.00	4.00	7.00	3.35	0.477
Niezawodności	0.25	0.20	1.00	0.33	2.00	0.51	0.072
Społeczne	0.33	0.25	3.00	1.00	3.00	0.94	0.135
Techniczne	0.17	0.14	0.50	0.33	1.00	0.33	0.047
Suma	4.75	1.93	13.50	8.67	19.00	7.02	1.00
Wiersz priorytetu	1.278	0.919	0.974	1.166	0.896		

Źródło: opracowanie własne.

W celu sprawdzenia poprawności relacji określonych w tabeli 3 obliczono dodatkowo tak zwany współczynnik spójności CI. Do powyższej tabeli 3 dodano wyniki pomocniczych obliczeń, niezbędnych do określenia wynikowego wskaźnika spójności CR.

W kolumnie 6 obliczono średnią geometryczną z każdego wiersza, a następnie zsumowano je. Wektor priorytetu obliczono, normalizując wartości kolumny 6 względem tej sumy. Następnie utworzono wiersz priorytetu jako iloczyn sum z każdej kolumny i wartości wektora priorytetu z kolejnego wiersza. Następnie obliczono indeks spójności (CI):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

gdzie:

 λ_{\max} – *maximum eigenvalue* (suma wiersza priorytetu),

n – liczba kryteriów.

Ostatecznym obliczanym wskaźnikiem jest wskaźnik spójności (CR) jako:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

gdzie:

RI – *Random Index*; oblicza się go według tabeli 5 na podstawie liczby kryteriów.

W analizowanym przykładzie dla $n = 5$ należy przyjąć $RI = 1.11$. W związku z tym otrzymuje się wskaźnik spójności $CR = 0.052$. Wskaźnik ten nie powinien być większy niż 0.1 (akceptowalne są wartości do 0.2), co świadczy o spójności przyjętych ocen.

W tabeli 6 przedstawiono normalizację wyżej wymienionych ocen (obliczenie ilorazów ocen i ich sum kolumnowych z tabeli 3) oraz uśrednione współczynniki wagowe kryteriów (ostatnia kolumna).

Tabela 5
Wartość wskaźnika RI według Saaty'ego

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Random Index	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Źródło: T.L. Saaty, *Decision Making for Leaders*, RWS Publications, Pittsburg 2001.

Tabela 6
Normalizacja ocen i określenie wag kryteriów

Kryterium	Ekonomiczne	Ekologiczne	Niezawodnościowe	Społeczne	Techniczne	Waga
Ekonomiczne	0.21	0.17	0.30	0.35	0.32	0.27
Ekologiczne	0.63	0.52	0.37	0.46	0.37	0.47
Niezawodnościowe	0.05	0.10	0.07	0.04	0.11	0.07
Społeczne	0.07	0.13	0.22	0.12	0.16	0.14
Techniczne	0.04	0.07	0.04	0.04	0.05	0.05

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 7
Ocena wariantów ze względu na kryterium ekonomiczne

Kryterium ekonomiczne				
Wariant	1	2	3	4
1	1.00	2.40	0.18	0.78
2	0.42	1.00	0.13	0.37
3	5.60	8.00	1.00	5.33
4	1.28	2.67	0.19	1.00
Suma	8.30	14.07	1.49	7.48

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z przypisanymi ocenami wagi wynikowe poszczególnych kryteriów są zatem uporządkowane następująco:

ekologiczne-ekonomiczne-społeczne-niezawodnościowe-techniczne.

Następne zestawienia dotyczą wzajemnej oceny wariantów (1-4) pod względem istotności kolejnych kryteriów.

W tym przypadku (tabela 7) skrajne oceny zostały przypisane, a pozostałe obliczone według zasady proporcjonalności do kosztów. Tak więc:

- najgorszy wariant – nr 2 (K = 3.2 mln PLN) uzyskuje R = 1 punkty;

- najlepszy – nr 3 ($K = 1.05$ mln PLN) uzyskuje $R=8$ punktów (czyli wariant 3 względem 2 otrzymuje ocenę 8), a wariant 2 względem 3 – odwrotność tej oceny (0.13).

Różnica ocen skrajnych $\Delta R = 7$ punktów.

Następnie wyliczono pomocniczy współczynnik: $r = \Delta K / \Delta R$, czyli $r = -2.15 / 7 = -0.307$.

Pozostałym wariantom przypisuje się zatem punkty według wzoru:

$$p = 1 + \frac{\Delta K}{r}, \text{ umieszczone w tabeli 7.}$$

W tym przypadku (tabela 8) również przypisano najpierw oceny skrajne, a wartości ocen pozostałych obliczono według zasady proporcjonalności:

- najgorszy wariant – nr 3 (wskaźnik $e = 36\%$) uzyskuje $R = 1$ pkt, najlepszy – nr 1 ($e = 68\%$) uzyskuje $R = 5$ pktów (wariant 1 względem 3 otrzymuje ocenę 5);
- różnica $\Delta R = 4$ punkty;
- stąd $r = \Delta e / \Delta R$, czyli $r = 32 / 4 = 8$.

Pozostałym wariantom przypisano zatem punkty według wzoru: $p = 1 + \frac{\Delta e}{r}$

Tabela 8

Ocena wariantów ze względu na kryterium ekologiczne

Kryterium ekologiczne				
Wariant	1	2	3	4
1	1.00	1.625	5	3.875
2	0.62	1	4.375	3.25
3	0.20	0.23	1	0.47
4	0.26	0.31	2.125	1
Suma	2.08	3.165	12.5	8.595

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 9

Ocena wariantów ze względu na kryterium niezawodnościowe

Kryterium niezawodnościowe				
Wariant	1	2	3	4
1	1	0.22	1	0.14
2	4.46	1	4.46	0.28
3	1	0.22	1	0.14
4	7	3.58	7	1
Suma	13.46	5.02	13.46	1.56

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 10
Ocena wariantów ze względu na kryterium społeczne

Kryterium społeczne				
Wariant	1	2	3	4
1	1	2	4	0.33
2	0.5	1	3	0.25
3	0.25	0.33	1	0.2
4	3	4	5	1
Suma	4.75	7.33	13	1.78

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 11
Ocena wariantów ze względu na kryterium techniczne

Kryterium techniczne				
Wariant	1	2	3	4
1	1	3	0.33	4
2	0.33	1	0.25	2
3	3	4	1	5
4	0.25	0.5	0.2	1
Suma	4.58	8.5	1.78	12

Źródło: opracowanie własne.

W tym przypadku (tabela 9) zastosowano analogiczną formułę jak wyżej, przypisując ocenę $R = 7$ wariantowi nr 4 względem wariantów nr 1 i 3. Pozostałe oceny wyliczono według opisanej wyżej zasady proporcjonalności, kierując się wskaźnikiem z tabeli danych.

W tym przypadku (tabela 10) oceny zostały przypisane uznaniowo, a pod uwagę wzięto uciążliwość inwestycji dla mieszkańców. Podobnie postąpiono w przypadku oceny wariantów ze względu na kryterium techniczne – tabela 11.

W kolejnym kroku powyższe oceny zostały poddane normalizacji i uśrednieniu w wierszach (tabela 12).

Ostateczny wynik otrzymuje się po obliczeniu dla każdego wariantu sumy ważonej iloczynów ocen kryteriów i ich wag (tabela 13).

Jak wynika z obliczeń, optymalnym rozwiązaniem jest wariant 1, który nieznacznie przewyższa wariant 3 oraz nieco bardziej wyraźnie przewyższa pozostałe dwa.

Tabela 12

Normalizacja ocen dla wariantów ze względu na poszczególne kryteria

Kryterium ekonomiczne					
wariant	1	2	3	4	waga
1	0.12	0.17	0.12	0.10	0.13
2	0.05	0.07	0.08	0.05	0.06
3	0.68	0.57	0.67	0.71	0.66
4	0.15	0.19	0.13	0.13	0.15
Kryterium ekologiczne					
1	0.48	0.51	0.40	0.45	0.46
2	0.30	0.32	0.35	0.38	0.34
3	0.10	0.07	0.08	0.05	0.08
4	0.13	0.10	0.17	0.12	0.13
Kryterium niezawodnościowe					
1	0.07	0.04	0.07	0.09	0.07
2	0.33	0.20	0.33	0.18	0.26
3	0.07	0.04	0.07	0.09	0.07
4	0.52	0.71	0.52	0.64	0.60
Kryterium społeczne					
1	0.21	0.27	0.31	0.19	0.24
2	0.11	0.14	0.23	0.14	0.15
3	0.05	0.05	0.08	0.11	0.07
4	0.63	0.55	0.38	0.56	0.53
Kryterium techniczne					
1	0.22	0.35	0.19	0.33	0.27
2	0.07	0.12	0.14	0.17	0.12
3	0.66	0.47	0.56	0.42	0.53
4	0.05	0.06	0.11	0.08	0.08

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 13
Zestawienie końcowe wyboru wariantu optymalnego

Kryterium Wariant	Ekonomiczne	Ekologiczne	Niezawodnościowe	Spółeczne	Techniczne	Suma ważona
1	0.03	0.22	0.01	0.03	0.01	0.30
2	0.02	0.16	0.02	0.02	0.01	0.23
3	0.18	0.04	0.01	0.01	0.02	0.26
4	0.04	0.06	0.04	0.07	0.00	0.21

Źródło: opracowanie własne.

Podsumowanie

Zastosowanie metody AHP może być bardzo pomocne w podejmowaniu decyzji w zakresie modernizacji systemów ochrony środowiska. Metoda ta umożliwia porównywanie kryteriów mierzalnych i niemierzalnych przy jednoczesnym uwzględnieniu priorytetów ustalonych dla konkretnego przypadku. Priorytetem może być niekiedy aspekt ekonomiczny, w innej zaś sytuacji na przykład społeczny. W związku z tym przy ustalaniu tych priorytetów należy mieć świadomość ich znaczenia dla końcowego wyniku.

Metoda AHP jest coraz powszechniej stosowana na świecie dla inwestycji prośrodowiskowych i należy mieć nadzieję, że będzie ona coraz częściej stosowana również w naszym kraju, co umożliwi podejmowanie decyzji opartych nie tylko na kryterium ekonomicznym.