

PRACE ORYGINALNE ORIGINAL PAPERS

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 70, 2015: 317–330
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 70, 2015)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 70, 2015: 317–330
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 70, 2015)

Krzysztof GÓRSKI¹, Leszek Rajmund IGNATOWICZ², Jerzy BYKOWSKI³

¹Instytut Budownictwa i Geoinżynierii, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

²Katedra Konstrukcji Metalowych, Politechnika Wrocławska

³Instytut Melioracji, Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

¹Institute of Building and Geoengineering, Poznań University of Life Sciences

²Department of Metal Structures, Wrocław University of Technology

³Institute for Land Reclamation, Environmental Development and Geodesy, Poznań University of Life Sciences

Zastosowanie metody AHP do projektowania komór mikrotunelowych

Application of AHP method to design microtunneling shafts

Słowa kluczowe: komora mikrotunelowa, metoda AHP, ścianka szczelna, studnia opuszczana
Key words: microtunnel shaft, AHP method, sheet pile wall, dug well

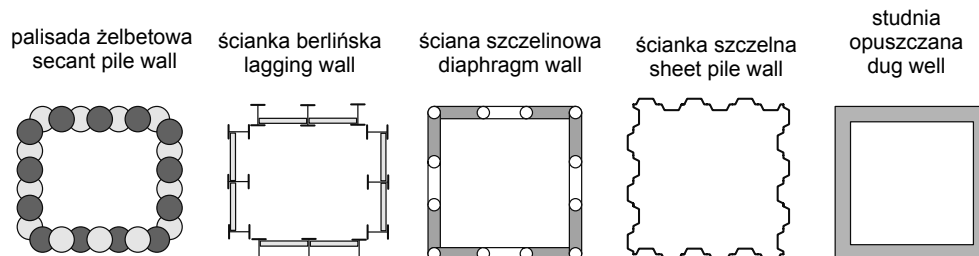
Wprowadzenie

Podjęcie decyzji przez projektanta o wyborze konstrukcji przy projektowaniu komór mikrotunelowych stanowiących o istocie bezpieczeństwa, ciągłości realizacji i bezawaryjności realizowanych kolektorów metodą mikrotunelingu jest podyktowane wieloma aspektami natury technicznej, technologicznej, ekonomicznej i społecznej.

Jako przykład można przytoczyć wybór między konstrukcją ścian zabez-

pieczenia wykopu wykonaną w technologii ze ścianki szczelnej, ścian szczelinowych, z palisady lub ze studni opuszczanych bądź rozwiązania za pomocą ścianki berlińskiej (Ignatowicz i in., 2014; rys. 1).

Na wybór komory mikrotunelowej w realizowanej technologii ma szczególny wpływ koszt realizacji komory, a więc ekonomiczny aspekt inwestycji. Jednocześnie projektant, wskutek niedokładnego rozpoznania warunków posadowienia konstrukcji, może popełnić znaczące błędy dla ogólnych i ostatecznych kosztów realizacji danej komory. Zatem projektant w warunkach dużej niepewności danych musi podjąć decyzje o dalekosiężnych skutkach zarówno w wymiarze finansowym (Bykowski



RYSUNEK 1. Przykłady możliwych technologii do zastosowania w przypadku projektowania komór mikrotunelowych (opracowanie R.L. Ignatowicz)

FIGURE 1. Examples of possible technology for use in case of designing microtunneling chambers (compiled by R.L. Ignatowicz)

i Joachimczak, 2010), jak i pod względem bezpieczeństwa konstrukcji. W takiej sytuacji sensownym rozwiązaniem jest zastosowanie metod wspomagających podejmowanie decyzji, do których należy między innymi metoda AHP (Adamus i Gręda, 2005; Kempniński i in., 2008; Saaty, 2008; Adamus i Łasak, 2010; Dietrich, 2010; Michalska i Pośpiech, 2011; Żurek, 2011; Prusak i Stefanów, 2014).

Metoda AHP

Analityczny proces hierarchiczny (AHP) jako wielokryterialna metoda wspomagania podejmowania decyzji może składać się z wielu odmian i kroków pozwalających uzyskać rozwiązanie ilościowe przyczyniające się do świadomego podjęcia decyzji, w sytuacji gdy należy rozważyć mierzalne i niemierzalne aspekty problemu. Jako metoda poszukiwania najlepszych decyzji wskazuje nie tylko jaką alternatywę wybrać wśród dostępnych wariantów, ale też uzasadnia dlaczego ją należy wyróżnić (dlaczego jest najlepsza). W ogólnym zarysie metody można wyróżnić nastę-

pujące podstawowe kroki (Prusak i Stefanów, 2014):

- stworzenie modelu struktury problemu w postaci drzewa hierarchii czynników,
- ocena modelu hierarchicznego i określenie „ważności” poszczególnych kryteriów, subkryteriów poprzez porównanie ich parami, korzystając z odpowiedniej skali rang,
- oszacowanie wartości wag dla poszczególnych kryteriów i subkryteriów (priorytetów),
- weryfikacja ocen decydena, stosowana przy porównaniach parami, za pomocą współczynnika spójności – CR ,
- analiza wrażliwości.

W metodzie AHP po stworzeniu drzewa hierarchii czynników, należy przystąpić do etapu oceny modelu i określenia „ważności” poszczególnych kryteriów i subkryteriów poprzez porównanie parami. Etap ten najbardziej wpływa na poprawność uzyskanych wyników i ostatecznie na decyzję mającą, niestety, dalekosiężny wpływ na ostateczne rozwiązanie. W tym podpunkcie (b) następuje przypisanie rang i porównanie ich dla każdego wariantu decyzyjnego

w obrębie analizowanych kryteriów. Porównania parami obejmują również same kryteria, subkryteria itp. W wyniku porównań parami uzyskuje się przypisanie „ważności i wpływu” poszczególnych wariantów decyzyjnych (w postaci wag) na ostateczną decyzję. Jest to swoisty „ranking, porządkujący obiekty (warianty decyzyjne)” (Adamus i Greda, 2005). Efektem stosowanej w metodzie procedury matematycznej jest uzyskanie dla każdego kryterium macierzy porównań parami $\mathbf{A}^{(k)}$ (gdzie $k = 1, 2, \dots, m$ oznaczają poszczególne kryteria), której rozbudowaną postać można przedstawić następująco:

$$\mathbf{A}^{(k)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Należy wspomnieć, iż wartości macierzy porównań parami $\mathbf{A}^{(k)}$ nie przyjmują dowolnych liczb, lecz ustala się

je na podstawie fundamentalnej tablicy wartości Saaty’ego, przedstawioną w tabeli 1 (Dietrich, 2010; Prusak i Stefanów, 2014).

Zanim przystąpi się do wyznaczania wielkości wagowych, można przeprowadzić normalizację macierzy porównań parami $\mathbf{A}^{(k)}$ (gdzie $k = 1, 2, \dots, m$).

Normalizację kolumnami realizuje się poprzez zastosowanie wzoru (Prusak

i Stefanów, 2014): $a_{ij(u)}^{(k)} = \frac{a_{ij}^{(k)}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^{(k)}}$, uży-

skując w ten sposób macierz unormowaną $\mathbf{A}^{(k)}_{(u)} = [a_{ij(u)}^{(k)}]$.

W dalszej kolejności przechodzi się do etapu oszacowania wartości wag dla poszczególnych kryteriów i subkryteriów, w którym wyznacza się wartości współczynników wagowych stanowiących wartości wektora własnego macierzy \mathbf{A} .

Kolejnym ważnym punktem jest weryfikacja ocen decydenta, w którym można oszacować współczynnik spójności (zgodności) – *CR*. Współczynnik *CR*

TABELA 1. Rangi przy porównaniach w metodzie AHP (Dietrich, 2010; Prusak i Stefanów, 2014)
TABLE 1. Saaty’s fundamental scale, 9-point pairwise comparison scale in AHP method (Dietrich, 2010; Prusak and Stefanów, 2014)

Ocena ekspercka (ranga) Expert evaluation (significance)	Ocena słowna (jakościowa) Verbal evaluation (qualitative)
1	równoważny (tak samo preferowany)
2	równoważny do nieznacznie preferowany
3	nieznacznie preferowany
4	nieznacznie do silnie preferowany
5	silnie preferowany
6	silnie do bardzo silnie preferowany
7	bardzo silnie preferowany
8	bardzo silnie do wyjątkowo preferowany
9	wyjątkowo preferowany

świadczy o „kwalifikacjach eksperta”. Jeżeli jego wartość jest większa od ustalonej granicy 10% [lub 8%, przy „bardziej restrykcyjnych granicach” (Prusak i Stefanów, 2014)], można stwierdzić, iż rangi eksperckie przy porównaniach parami należy powtórzyć, ponieważ wyniki są obciążone zbyt dużym błędem. Współczynnik CR obliczany jest dla każdej macierzy porównań parami $\mathbf{A}^{(k)}$ i stanowi iloraz indeksu spójności (CI), zwanego również indeksem zgodności, do parametru RI , zgodnie ze wzorem:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Indeks spójności (zgodności) wyraża się jako:

$$CI = \frac{\lambda_{\max}^{(k)} - n}{n - 1}$$

gdzie:

$\lambda_{\max}^{(k)}$ – największa wartość wektora własnego macierzy porównań parami $\mathbf{A}^{(k)}$,
 n – liczba elementów n .

Parametr RI nosi nazwę indeksu losowego Saaty’ego i uzyskuje się go, korzystając z danych z tabeli 2, w zależności od liczby porównywanych elementów n .

TABELA 2. Indeksy losowe RI Saaty’ego (Prusak i Stefanów, 2014)
 TABLE 2. Saaty’s random index RI (Prusak i Stefanów, 2014)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,58

Metodę AHP najczęściej kończy procedura analizy wrażliwości podana w podpunkcie (e), która obejmuje badania wpływu zmiany wartości w macierzy porównań parami na wynik końcowy ustalonych wag lub współczynnika CR .

Obszerniejsze informacje na temat samej metodyki obliczeń AHP oraz jej podstaw matematycznych można znaleźć w bogatej literaturze na ten temat (Saaty, 2008; Michalska i Pościech, 2011; Żurek, 2011; Prusak i Stefanów, 2014) dlatego autorzy w niniejszym artykule nie przedstawili rozmaitych wariantów metody, która dynamicznie się rozwija i znajduje kolejne pola do zastosowań naukowych i technicznych.

Zastosowanie metody AHP do projektowania komór mikrotunelowych

Jednym z możliwych obszarów zastosowań metody AHP dla inżynierów jest projektowanie komór mikrotunelowych. Drzewo hierarchii priorytetów w takim przypadku może zostać przedstawione w najbardziej ogólnej postaci obejmującej najczęściej stosowane techniki realizacji komór mikrotunelowych (rys. 1). Niestety tak rozbudowana struktura drzewa hierarchii priorytetów wymaga ułożenia 18 macierzy porównań parami \mathbf{A} , przy czym na poziomie wprowadzania danych względem poszczególnych metod wykonania komory ma-

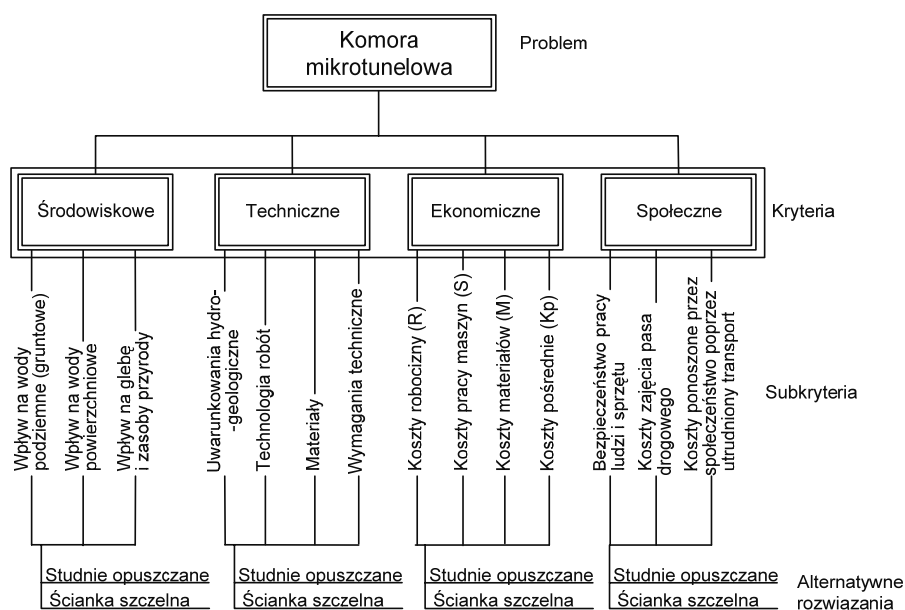
cierze miałyby wymiar 5×5 . Dlatego postanowiono w przykładzie obliczeniowym ilustrującym zastosowanie metody AHP zredukować alternatywne wybory konstrukcji komory tylko do dwóch metod budowy komory mikrotunelowej za

pomocą technologii studni opuszczanej i ścianki szczelnej. Zaproponowany model hierarchiczny dla przykładu obliczeniowego jest przedstawiony na rysunku 2.

Macierze (na poziomie kryterium celu decyzyjnego) wraz z analizą formalną przedstawiono w tabelach 3–8. Wartości współczynników kryterium ekonomicznego (tab. 6) przyjęto na podstawie analizy rzeczywistych cen ofertowych wykonania ścianki szczelnej i alternatywnie studni opuszczanej na poziomie cen i stawek z I kwartału 2015 roku, z uwzględnieniem kosztów zajęcia pasa drogowego (Bykowski i in., 2013).

Wagi wyznaczone metodą mnożenia macierzy, stosując następujący algorytm (Prusak i Stefanów, 2014) – otrzymane wartości wag dotyczą prezentowanych tabel 3–7):

1. Określenie wartości wagowych w każdym wierszu k macierzy $A^{(k)}$ poprzez procedurę polegającą na wyliczeniu sumy ilorazów wartości macierzy a_{kl} ($l = 1, 2, \dots, m$) przez sumę wartości w odpowiedniej kolumnie i podzieleniu jej przez wartość wymiaru macierzy (np. wartość 4 dla tabeli 3 lub wartość 3 dla tabeli 4). Uzyskanie wektora wag $W^{(k)I}$.
2. Mnożenie macierzy $A^{(k)}$ (gdzie $k = 1, 2, \dots, m$) przez samą siebie (podnoszenie jej do kwadratu).
3. Wyznaczenie nowych wartości macierzy $A^{(k)I}$ (gdzie $k = 1, 2, \dots, m$) stanowiących wartości macierzy po wymnożeniu macierzy A z punktu 1 (I – oznacza pierwszą iterację).
4. Powtórzenie operacji określenia wartości wagowych, według punktu 1,



RYSUNEK 2. Drzewa hierarchii priorytetów w przykładzie obliczeniowym dla wyboru projektu komory mikrotunelowych z dwóch alternatywnych wariantów

FIGURE 2. Hierarchy trees of priorities in the example calculation for project selection microtunneling chamber with two alternative scenarios

TABELA 3. Macierz porównań parami **A** kryteriów decyzyjnych pod względem celu wraz z oszacowaniem indeksu spójności (*CI*)

TABLE 3. A matrix of pairwise comparisons **A** in terms of decision-making criteria for including an estimate of cohesion factor (*CI*)

×	Środowiskowe Environmental	Techniczne Technical	Ekonomiczne Economic	Spoleczne Social	Waga przed iteracją Weight before iteration	Waga po iteracji Weight after iteration
Środowiskowe Environmental	1	1	3	5	0,424	0,483
Techniczne Technical	1	1	1	2	0,262	0,243
Ekonomiczne Economic	1/3	1	1	3	0,219	0,196
Spoleczne Social	1/5	1/2	1/3	1	0,094	0,078
Suma Sum	2,53	3,50	5,33	11,00	1,000	1,000
$\lambda_{\max}^{(k)} = 4,2131$		<i>CI</i> = 0,0710		<i>CR</i> = 0,0798		

TABELA 4. Wyniki porównań subkryteriów pod względem kryterium środowiskowego wraz z oszacowaniem indeksu spójności (*CI*) i współczynnika spójności (*CR*)

TABLE 4. Results of subcriteria comparisons in terms of environmental criterion together with estimating cohesion factor (*CI*) and coefficient of consistency (*CR*)

×	Wpływ na wody gruntowe Impact on groundwater	Wpływ na wody powierzchniowe Impact on surface water	Wpływ na glebę i zasoby przyrody Impact on soil and natural resources	Priorytety lokalne Local priorities	Priorytety globalne Global priorities	Waga Weight	Waga uzyskana przez iteracje Weight obtained by iterations
Wpływ na wody gruntowe Impact on groundwater	1	1/2	1/3	0,172	0,08	0,237	0,172
Wpływ na wody powierzchniowe Impact on surface water	2	1	1	0,372	0,18	0,387	0,372
Wpływ na glebę i zasoby przyrody Impact on soil and natural resources	3	1	1	0,456	0,22	0,443	0,456
Suma Sum	6,00	2,50	2,33	1,00	0,48	1,067	1,00
$\lambda_{\max}^{(k)} = 3,0210$		<i>CI</i> = 0,0105		<i>CR</i> = 0,0202			

TABELA 5. Wyniki porównań subkryteriów pod względem kryterium technicznego wraz z oszacowaniem indeksu spójności (*CI*) i współczynnika spójności (*CR*)

TABLE 5. Results of subcriteria comparisons in terms of technical criteria together with estimating cohesion factor (*CI*) and coefficient of consistency (*CR*)

×	Uwarunkowania hydro-geologiczne Hydro-geological conditions	Technologia robót Technology works	Materiały Materials	Wymagania techniczne Technical requirements	Priorytet lokalny Local priority	Priorytet globalny Global priority	Waga Weight	Waga uzyskana przez iteracje Weight obtained by iterations
Uwarunkowania hydro-geologiczne Hydro-geological conditions	1	1/2	1/5	1	0,110	0,03	0,125	0,110
Technologia robót Technology works	2	1	1	2	0,273	0,07	0,309	0,273
Materiały Materials	5	1	1	3	0,495	0,12	0,428	0,495
Wymagania techniczne Technical requirements	1	1/2	1/3	1	0,122	0,03	0,138	0,122
Suma Sum	9,00	3,00	2,53	7,00	1,00	0,25	1,000	1,000
$\lambda_{\max}^{(k)} = 4,1347$		<i>CI</i> = 0,0449		<i>CR</i> = 0,0505				

TABELA 6. Wyniki porównań subkryteriów pod względem kryterium ekonomicznego wraz z oszacowaniem indeksu spójności (*CI*) i współczynnika spójności (*CR*)

TABLE 6. Results of subcriteria comparisons in terms of the economic criterion, together with estimating cohesion factor (*CI*) and coefficient of consistency (*CR*)

×	Koszty robocizny (R) Labour costs	Koszty pracy maszyn (S) Costs of machines work	Koszty materiałów (M) Costs of materials	Koszty pośrednie (Kp) Indirect costs	Priorytet lokalny Local priority	Priorytet globalny Global priority	Waga Weight	Waga uzyskana przez iteracje Weight obtained by iterations
Koszty robocizny (R) Labour costs	1	2	1	1/2	0,264	0,05	0,246	0,264
Koszty pracy maszyn (S) Costs of machines work	1/2	1	1/2	1	0,140	0,03	0,177	0,140
Koszty materiałów (M) Costs of materials	1	2	1	1	0,270	0,05	0,282	0,270
Koszty pośrednie (Kp) Indirect costs	2	1	1	1	0,326	0,06	0,296	0,326
Suma Sum	4,50	6,00	3,50	3,50	1,00	0,20	1,000	1,000
$\lambda_{\max}^{(k)} = 4,2585$		<i>CI</i> = 0,0862		<i>CR</i> = 0,0968				

TABELA 7. Wyniki porównań subkryteriów pod względem kryterium społecznego wraz z oszacowaniem indeksu spójności (CI) i współczynnika spójności (CR)

TABLE 7. Results of subcriteria comparisons in terms of social criterion together with estimating cohesion factor (CI) and coefficient of consistency (CR)

\times	Bezpieczeństwo pracy ludzi i sprzętu Work safety of people and equipment	Koszty zajęcia pasa drogowego The costs of occupied roadway	Koszty ponoszone przez społeczeństwo poprzez utrudniony transport Costs borne by society through the difficult transportation	Priorytety lokalne Local priorities	Priorytety globalne Global priorities	Waga Weight	Waga uzyskana przez iteracje Weight obtained by iterations
Bezpieczeństwo pracy ludzi i sprzętu Work safety of people and equipment	1	1/5	1	0,161	0,01	0,422	0,161
Koszty zajęcia pasa drogowego The costs of occupied roadway	5	1	3	0,664	0,05	0,655	0,664
Koszty ponoszone przez społeczeństwo poprzez utrudniony transport The costs borne by society through the difficult transportation	1	1/3	1	0,174	0,01	0,187	0,174
Suma Sum	7,00	1,53	5,00	1,00	0,08	1,264	1,000
$\lambda_{\max}^{(k)} = 3,0336$		$CI = 0,0168$		$CR = 0,0323$			

z tym, że dla macierzy $\mathbf{A}^{(k)I}$. Uzyskanie wektora wag $W^{(k)II}$.

5. Odejmowanie wektora wag $W^{(k)II}$ od wektora wag $W^{(k)I}$. Sprawdzenie, czy wartości wektora wag różnią się więcej od siebie niż 0,001. Jeżeli różnica wartości wag w kolejnych procedurach wynosi powyżej 0,001, procedurę kontynuuje się, przechodząc do punktu 6. Jeżeli nie, to przyjmuje się wartości wag uzyskane w ostatniej iteracji.
6. Powtórzenie operacji mnożenia wyrazów nowej macierzy $\mathbf{A}^{(k)I}$ przez
7. samą siebie w następnej iteracji i uzyskanie kolejnej macierzy $\mathbf{A}^{(k)II}$.
7. Powtórzenie operacji określenia wartości wagowych, według punktu 1, tym razem dla macierzy $\mathbf{A}^{(k)II}$. Uzyskanie wektora wag $W^{(k)III}$.
8. Odejmowanie wektora wag $W^{(k)III}$ od wektora wag $W^{(k)II}$. Sprawdzenie, czy wartości wektora wag nadal różnią się więcej od siebie niż 0,001. Jeżeli różnica wartości wag w kolejnych procedurach jest większa od 0,001, procedurę kontynuuje się, przechodząc do pętli zaczynającej

TABELA 8. Wyniki porównań parami wariantów decyzyjnych pod względem subkryteriów należących do kryterium technicznego

TABLE 8. Results of pairwise comparisons of decision variants in terms of subcriteria belonging to the technical criterion

×	Studnia opuszczana Dug well	Ścianka szczelna Sheet pile wall	Waga Weight	Priorytety lokalne Local priorities
Uwarunkowania hydro-geologiczne Hydro-geological conditions				
Studnia opuszczana Dug well	1	1/2	0,333	0,333
Ścianka szczelna Sheet pile wall	2	1	0,667	0,667
Suma Sum	3,00	1,50	1,00	1,00
Technologia robót Technology works				
Studnia opuszczana Dug well	1	1/3	0,25	0,250
Ścianka szczelna Sheet pile wall	3	1	0,75	0,750
Suma Sum	4,00	1,33	1,00	1,00
Materiały Materials				
Studnia opuszczana Dug well	1	1	0,50	0,500
Ścianka szczelna Sheet pile wall	1	1	0,50	0,500
Suma Sum	2,00	2,00	1,00	1,00
Wymagania techniczne Technical requirements				
Studnia opuszczana Dug well	1	2	0,67	0,667
Ścianka szczelna Sheet pile wall	1/2	1	0,33	0,333
Suma Sum	1,50	3,00	1,00	1,00

się w punkcie 6, i kończy na punkcie 8, rozpoczynając oczywiście kolejną iterację. Jeżeli wartości wag wyliczone w iteracjach nie różnią się więcej niż 0,001, to przyjmuje się wartości wag uzyskane w ostatniej iteracji.

9. Po osiągnięciu wag o założonej dokładności obliczenia przeprowadzono w celu wyznaczenia wartości współczynników *CI* i *CR*, jeżeli wynosiły mniej niż 0,1, tj. 10%, wówczas przyjmowano, że podane macierze porównań ekspertów są właściwe i spójne.

W tabeli 8 przedstawiono jedynie macierz porównań parami wariantów decyzyjnych pod względem wyszczególnionych subkryteriów: uwarunkowania hydro-geologiczne, technologia robót, stosowane materiały oraz wymagania techniczne należących do kryterium technicznego.

Wartości wag w tabeli 8, w odróżnieniu od procedury wyznaczania wartości wag dla tabel 3–7, zostały uzyskane poprzez zastosowanie punktu 1 algorytmu przedstawionego wcześniej.

Oczywiście dla całości obliczeń należy jeszcze podać macierze porównań parami wariantów decyzyjnych dla pozostałych subkryteriów, co zostało zilustrowane w następnym podrozdziale.

Wyniki analizy AHP i wnioski

W tabeli 9 zostały zaprezentowane ostateczne wyniki dla wybranego przykładu obliczeniowego obejmującego porównanie, który wariant jest lepszy do zastosowania na komorę mikrotunelową – czy studnia opuszczana, czy ścianka szczelna. Na podstawie uzyskanych rezultatów można stwierdzić, iż lepsze jest zastosowanie ścianek szczelnych niż studni opuszczanych jako komór mikrotunelowych do zabezpieczenia stateczności wykopu. Zsumowane wyniki częściowe wartości priorytetów globalnych dla wyszczególnionych wariantów decyzyjnych, które określają udział poszczególnych wariantów w realizacji założonego celu, wynoszą dla studni opuszczanych tylko $\Sigma = 0,458$, a dla ścianki szczelnej $\Sigma = 0,542$.

Wynik powyższej analizy metodą AHP potwierdza ogólną tendencję, że

komory mikrotunelowe w zdecydowanej większości przypadków realizowane są w technologii ścianek szczelnych.

Dzięki metodzie AHP można, opierając się na matematycznych podstawach metody, dokonać oceny ilościowej, pozwalającej wybrać najkorzystniejszy wariant pod względem zaproponowanych kryteriów i subkryteriów. Oczywiście podział zastosowany w niniejszym artykule jest jak najbardziej subiektywny, gdyż można jeszcze bardziej uszczegółwić analizowane zagadnienie, różniąc więcej przypadków subkryteriów lub inaczej określić drzewo priorytetów.

Na koniec należy podkreślić znaczenie analizy wrażliwości parametru CR , która jest bardzo istotna dla określenia prawidłowości metody, czy nie są generowane zbyt duże błędy. Analiza wrażliwości służy oszacowaniu na wyniki końcowe wpływu zmian wartości współczynników w macierzy porównań parami. Wadą metody AHP jest bardzo duża wrażliwość na wszelkie, nawet niewielkie, zmiany wartości macierzy porównań. W celu określenia pełnej analizy wrażliwości najlepiej posłużyć się komercyjnymi programami obliczeniowymi (MakeItRationalDecision, 2015). W niniejszym artykule autorzy przedstawili analizę wrażliwości wpływu „jednego czynnika” na relacje wpływu na współczynnik zgodności (CR) dla czterech kryteriów środowiskowych i technicznych, kryteriów technicznych i ekonomicznych, kryteriów środowiskowych i ekonomicznych oraz kryteriów środowiskowych i społecznych (rys. 3). Wpływ „jednego czynnika” oznacza uzyskiwanie parametru CR dla macierzy $A^{(k)}$ ($k = 1, 2, \dots, m$) poprzez zmianę rangi danego kryterium, np. kryterium

TABELA 9. Wyniki obliczeń priorytetów globalnych dla przyjętych wariantów decyzyjnych
 TABLE 9. The results of calculations of global priorities for the adopted decision variants

×		Priorytety Priorities		Oceny Rates		Wyniki Results		
		Priorytety lokalne Local priorities	Priorytety globalne Global priorities	Studnia opuszczana Dug well	Ścianka uszczelna Sheet pile wall	Studnia opuszczana Dug well	Ścianka uszczelna Sheet pile wall	
Środowiskowe Environmental	Wpływ na wody gruntowe	0,172	0,083	0,500	0,500	0,042	0,042	
	0,483	Wpływ na wody powierzchniowe	0,372	0,180	0,500	0,500	0,090	0,090
	Wpływ na glebę i zasoby przyrody	0,456	0,220	0,500	0,500	0,110	0,110	
Techniczne Technical	Uwarunkowania hydro-geologiczne	0,110	0,027	0,333	0,667	0,009	0,018	
	0,243	Technologia robót	0,273	0,066	0,250	0,750	0,017	0,050
	Materiały	0,495	0,120	0,500	0,500	0,060	0,060	
	Wymagania techniczne	0,122	0,030	0,667	0,333	0,020	0,010	
Ekonomiczne Economic	Koszty robocizny (R)	0,264	0,052	0,167	0,833	0,009	0,043	
	0,196	Koszty pracy maszyn (S)	0,140	0,027	0,500	0,500	0,014	0,014
	Koszty materiałów (M)	0,270	0,053	0,333	0,667	0,018	0,035	
	Koszty pośrednie (Kp)	0,326	0,064	0,500	0,500	0,032	0,032	
Społeczne Social	Bezpieczeństwo pracy ludzi i sprzętu	0,161	0,013	0,500	0,500	0,006	0,006	
	0,078	Koszty zajęcia pasa drogowego	0,664	0,052	0,500	0,500	0,026	0,026
	Koszty ponoszone przez społeczeństwo poprzez utrudniony transport	0,174	0,014	0,500	0,500	0,007	0,007	
				Suma Sum		0,458	0,542	

techniczno-ekonomicznego (w zakresie wartości rang od 9 do 1/9). Inaczej mówiąc, „jeden czynnik” oznacza, że rangi między kryteriami są powiązane w macierzy porównań parami formułą a_{km} i $1/a_{km}$) i mają istotny wpływ na wartość współczynnika CR i pozostałe kryteria, takie jak kryteria społeczne, kryterium środowiskowe. Analogicznie wpływ czynnika „kryterium środowiskowo-ekonomicznego” pozwala określić analizę wrażliwości na wartość CR , a poprzez to również wpływ na pozostałe kryteria, tzn. kryterium techniczne i kryterium społeczne.

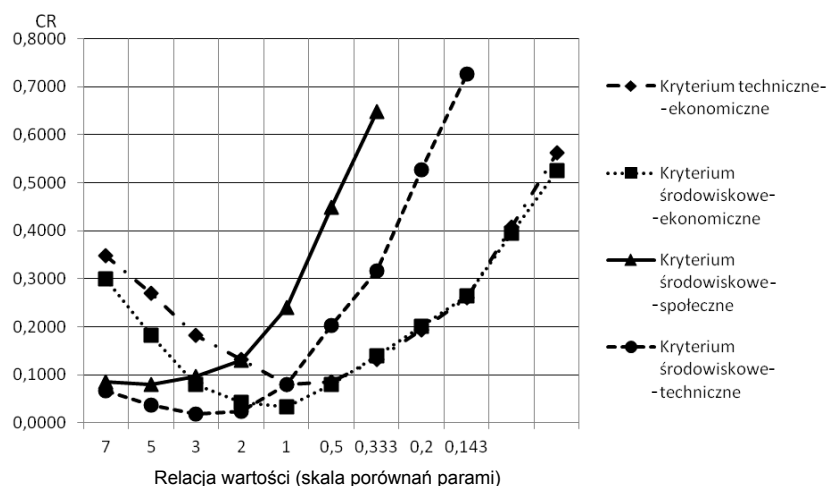
Wyniki z tabeli 9 pozwalają stwierdzić, iż:

1. Komora wykonana z zastosowaniem technologii studni opuszczanych generuje zwiększone nakłady finansowe w stosunku do komory mikrotunelowej, wykonanej za pomocą ścianki szczelnej.

2. Realizacja komory mikrotunelowej w osłonie ze studni opuszczanej wpływa podobnie jak wykonawstwo za pomocą ścianek szczelnych na środowisko i koszty społeczne.
3. Komora wykonana w technologii studni opuszczanych, szczególnie o niewielkich średnicach (gabarytach), jest zdecydowanie łatwiejsza do wykonania niż komora ze ścianek szczelnych.

Otrzymane wykresy przedstawione na rysunku 3 pozwalają stwierdzić, że najmniejsze wartości współczynnika CR uzyskuje się dla kryteriów:

- techniczno-ekonomicznego, jeżeli kryteria ekonomiczne i techniczne mają równą wagę (wartość ze skali porównań parami równe są 1) $CR = 0,0798$,
- środowiskowo-ekonomicznego, gdy kryteria środowiskowe i ekonomiczne są równoważne (wartość ze



RYSUNEK 3. Analiza wrażliwości wskaźnika zgodności (CR) przy zmieniających się wartościach ze skali porównań parami Saaty'ego

FIGURE 3. Sensitivity analysis rate of compliance (CR) with the changing values of Saaty's scale pairwise comparisons

- skali porównań parami równe są 1)
 $CR = 0,0331$,
- środowiskowo-społecznego, jeżeli kryteria środowiskowe są z dużą (silną) przewagą nad kryteriami społecznymi (wartość ze skali porównań parami wynosi 5) $CR = 0,0798$,
 - środowiskowo-technicznego, jeśli kryteria techniczne dominują nad kryteriami środowiskowymi w sposób słaby, z umiarkowaną przewagą (wartość ze skali porównań parami wynosi 3) $CR = 0,0172$.

Uzyskane wartości współczynników CR pozwalają określić przedział ważności, dla których uzyskane rozwiązanie mają sens i nie prowadzą do zbyt dużych błędów metody AHP. Jak już wspomniano, jeżeli uzyskane funkcje analizy wrażliwości dla poszczególnych kryteriów znajdują się powyżej wartości rzędnej 0,10 lub bardziej restrykcyjnie 0,08 (tj. 10 lub 8%), oznacza to, że wartości eksperckie rang w macierzy porównań parami, poza tym zakresem, nie mają sensu w metodzie, gdyż są wątpliwe pod względem „jakości” i „spójności” danych. Dla otrzymanych rezultatów na rysunku 3 można stwierdzić, że sensowne wydają się rangi dla kryterium np. techniczno-ekonomicznego w zakresie od 1 do 0,33, a dla kryterium środowiskowo-technicznego zakres rang od 7 do 1. Analogicznie dla kryterium środowiskowo-społecznego zakres rang powinien być w granicach od 7 do 3, a dla kryterium środowiskowo-ekonomicznego od 3 do 0,5. Poza tym zakresem uzyskuje się zbyt duże wartości współczynnika $CR (>0,1)$, a zatem „wątpliwe” w ocenie metody AHP.

Literatura

- Adamus, W. i Gręda, A. (2005). Wspomaganie decyzji wielokryterialnych w rozwiązywaniu wybranych problemów organizacyjnych i menedżerskich. *Badania operacyjne i decyzje*, 2, 5-36.
- Adamus, W. i Łasak, P. (2010). Zastosowanie metody AHP do wyboru umiejscowienia nadzoru nad rynkiem finansowym. *Bank i Kredyt*, 41 (4), 73-100.
- Bykowski, J. i Joachimczak, I. (2010). Struktura wartości i ceny kosztorysowej w przetargach na roboty kanalizacyjne. *INSTAL. Teoria i Praktyka w Instalacjach*, 5, 59-62.
- Bykowski, J., Jakubowicz, J. i Napierała, M. (2013). Analiza finansowa zajęcia pasa drogowego w robotach sieciowych. *Gaz, Woda Tech. Sanit.*, 8, 321-327.
- Dietrich, A. (2010). Zastosowanie metody hierarchii analitycznej (AHP) do oceny poziomu bezpieczeństwa technicznego gazociągów. *NAFTA – GAZ*, 66 (12), 1123-1131.
- Ignatowicz, R.L., Górski, K., Mazur, R., Maszurkiewicz, J., Kujawiak, S. i Chmist, J. (2014). Technologiczne aspekty projektowania komór mikrotunelowych. *INSTAL*, 9 (354), 65-69.
- Kempiński J., Parzonka W., Aigner D., Eckstädt H., Eymontt A., Jedlitschka J., Schütte M., Smilgin Z., Roediger M. (2008). Zastosowanie metody AHP przy wyborze systemu kanalizacyjnego. W J. Kempniński (red.). *Współczesne problemy inżynierii środowiska. Systemy transportu ścieków na terenach o rozproszonej zabudowie* (strony 43-51). Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
- Michalska, E. i Pośpiech, E. (2011). Niepełna informacja liniowa w zagadnieniach wielokryterialnego wspomaganie decyzji. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i Zarządzanie*, 57, 259-270.
- Prusak, A. i Stefanów, P. (2014). *AHP – analityczny proces hierarchiczny*. Warszawa: Wydawnictwo C.H.Beck.
- Saaty, T.L. (2008). Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network

Process, RACSAM. *Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat.*, 102 (2), 251-318.

Żurek, J., Ciszak, O., Cieślak, R. i Suszyński, M. (2011). Ocena i wybór robota przemysłowego metodą AHP. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 31 (2), 201-211.

MakeItRationalDecision (2015). Pobrano z lokalizacji MakeItRationalDecision: <http://makeitrational.com/> MakeItRational Decision-Making Software.

Streszczenie

Zastosowanie metody AHP do projektowania komór mikrotunelowych. Projektowanie komór mikrotunelowych związane jest z podejmowaniem wielu niezależnych decyzji dotyczących zagadnień technicznych, technologicznych, ekonomicznych i społecznych. Jedną z metod pomocnych w tym zakresie, aby podjąć racjonalne i przemyślane decyzje, jest metoda AHP (analityczny proces hierarchiczny). W artykule przedstawiono procedurę określenia wspomaganego podjęcia decyzji przez projektanta na podstawie metodyki AHP wraz z przykładem obliczeniowym. Na podstawie uzyskanych rezultatów można stwierdzić, która z metod jest „lepsza” do zastosowania przy projektowaniu komory mikrotunelowej, uwzględniając wszystkie analizowane kryteria i subkryteria. Metoda AHP pozwala również określić „jakość” oceny rzeczoznawcy poprzez wartości oszacowanych parametrów *CR* i *CI*.

Summary

Application of AHP method to design microtunneling shafts. Designing microtunnelling chambers is associated with mak-

ing many independent decisions concerning technical, technological, economic and social issues. One of the methods to assist in this regard, to take reasonable decisions is the method of AHP (Analytical Hierarchical Process). The article presents the procedure for determining support the decision by the designer based on AHP methodology and an example calculation. Based on the results obtained can be determine which method is “best” for use in the design of microtunneling shaft. AHP method also allows you to define “quality” assessment of the expert by the estimated parameters *CR* and *CI*.

Authors' addresses:

Krzysztof Górski
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska
Instytut Budownictwa i Geotechniki
ul. Piątkowska 94E, 60-649 Poznań
Poland

Rahmund L. Ignatowicz
Politechnika Wroclawska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Konstrukcji Metalowych
ul. Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
Poland

Jerzy Bykowski
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska
Instytut Melioracji, Kształtowania Środowiska i Geodezji
ul. Piątkowska 94E, 60-649 Poznań
Poland

e-mail: kgorski@up.poznan.pl
rajmund.ignatowicz@pwr.edu.pl
jurbykos@up.poznan.pl