

IDENTYFIKACJA WIELOKRYTERIALNEGO MODELU ISTOTNOŚCI POMPOWNI MELIORACYJNYCH NA TERENIE POLSKI

Wojciech Sałabun, Michał Napierała, Jerzy Bykowski

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. Niniejsza praca omawia istotny problem związany z klasyfikacją i właściwym zdefiniowaniem wielkości pompowni melioracyjnych. Podstawowa definicja wielkości jest bardzo szeroka, zatem ze względu na liczbę objaśniających ją parametrów wymaga precyzyjnego uściślenia. W dotychczasowych ocenach rozmiarów pompowni melioracyjnych posługiwano się na ogół wrażeniami osobistymi opartymi na subiektywnym odczuciu, które z kolei jest oparte na nieznannej liczbie parametrów. Pojawiające się przy tym trudności z określeniem przynależności obiektów do danej grupy wielkości wynikały głównie z luk informacyjnych dotyczących właściwej granicy podziału pomiędzy poszczególnymi grupami. W niniejszej pracy, do klasyfikacji i podziału pompowni według ich wielkości zastosowano takie ich parametry jak: moc nominalna pompowni P w kW, wydajność całkowita Q w $\text{m}^3 \cdot \text{s}$ oraz zasięg oddziaływania pompowni Fp w ha, dla 270 losowo wybranych obiektów melioracyjnych w Polsce. Do rozwiązania problemu wykorzystano jedną z wielokryterialnych metod podejmowania decyzji (MCDM), opartą na mechanizmach logiki rozmytej, noszącą nazwę metody obiektów charakterystycznych (COMET).

Słowa kluczowe: klasyfikacja pompowni melioracyjnych, wielokryterialna analiza decyzyjna, teoria zbiorów rozmytych, metoda COMET

WSTĘP

Jednym z istotnych problemów eksploatacji urządzeń melioracyjnych jest obiektywne określenie wielkości i klasyfikacja obiektów według ich parametrów i związane z tym ustalenie ich znaczenia w systemie melioracyjnym [Szafranski i in. 1998, Bykowski i in. 2013, 2014]. W odniesieniu do obiektów drenarskich próby takie z zastosowaniem metod hierar-

Adres do korespondencji – Corresponding authors: mgr inż. Wojciech Sałabun, Katedra Metod Sztucznej Inteligencji i Matematyki Stosowanej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Żołnierska 49, 71-210 Szczecin; dr inż. Michał Napierała, dr hab. inż. Jerzy Bykowski, prof. UP, Instytut Melioracji, Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94, 60-649 Poznań, e-mail: michnap@up.poznan.pl, jurbykos@up.poznan.pl.

chicznych prowadzono już wcześniej [Bykowski i Miler 1997]. Problem ten dotyczy także pompowni melioracyjnych odgrywających istotną rolę w ochronie przeciwpowodziowej [Przybyła i in. 2014]. W literaturze można spotkać różne sposoby klasyfikowania pompowni melioracyjnych [CBSiPBW 1971, Schröder 1972, Prochal i in. 1987, Klugiewicz 1992, Cebulak 1996, Rusetsky 2009]. W praktyce jednak często użytkownicy pompowni kierują się ogólnym wrażeniem wizualnym, co może prowadzić do pewnych nieporozumień. Dlatego też pojęcie wielkości wymaga precyzyjnego określenia. Właściwa klasyfikacja pompowni według tego kryterium nasuwa pomysł wieloaspektowego podejścia do omawianego problemu. Wynika to przede wszystkim z samej definicji wielkości, która według literatury [Dictionary... 2014, CED 2014, OED 2014] ma wiele znaczeń. W stosunku do obiektów inżynierskich, jakim są pompownie melioracyjne, wielkość oznacza pewną właściwość obiektu, którą można określić ilościowo, czyli zmierzyć. Nie ma jednak sztywnej definicji wielkości. Dlatego też w pracy zaproponowano zastosowanie wielokryterialnej metody wspomagania decyzji MCDM (z ang. – *multi-criteria decision-making*), zwanej też metodą wielokryterialnego podejmowania decyzji, opartej na logice rozmytej, wykorzystującej podstawowe parametry fizyczne pompowni. Metody tego typu umożliwiają agregowanie wielu kryteriów w celu ewaluacji rozważanych obiektów. Ułatwiają uzyskanie rozwiązań złożonych problemów badawczych, dzięki zastosowaniu usystematyzowanej fuzji wiedzy eksperta [Pedrycz i in. 2011]. Wiedza ta najczęściej jest reprezentowana poprzez określenia rozmyte oraz niepewne, które są subiektywne i zależą od konkretnego oceniającego [Piegat i in. 2012, Sałabun 2012]. Przykładowo sformułowanie „duża pompownia” może być postrzegane w różny sposób, w zależności od rozmiaru budowli, ilości i gabarytów pomp, ich mocy, zasięgu oddziaływania. W literaturze naukowej ewaluacja jest najczęściej dokonywana przez zastosowanie jednej z wielu modyfikacji metod: AHP, TOPSIS oraz ELECTRE [Hokkanen i Salminen 1997, Bender i Simonovic 2000, Figueira i in. 2005, Hajkowicz i Collins 2007, Srdjevic 2007, Srdjevic i Medeiros 2008, Behzadian i in. 2012, Minatour i in. 2014]. Wskutek tego końcowe wyniki są ściśle uzależnione od liczby oraz wartości atrybutów rozważanych obiektów poddawanych ocenie. Oznacza to, że w przypadku oceny kolejnego nowego obiektu cała procedura ewaluacji musi zostać powtórzona od nowa, a uprzednio uzyskane wyniki ulegną zmianie. Należy zwrócić uwagę na to, iż ocena obiektu A będzie miała inną wartość, gdy będzie on oceniany w grupie składającej się kolejno z 2, 3, 4 lub n obiektów. Zmiana wartości może być na tyle wysoka, iż zmieni się nawet kolejność ocenionych obiektów (tzw. *rank reversal*). Celem prowadzonych badań jest wykorzystanie teorii zbiorów rozmytych m.in. do oceny wpływu analizowanych parametrów na koszty utrzymania i użytkowania pompowni melioracyjnych.

METODYKA BADAŃ

Badania oparto na informacji zebranej z 16 wojewódzkich Zarządów Melioracji i Urzędzeń Wodnych administrujących łącznie 586 pompowniami melioracyjnymi. Analizy przeprowadzono w oparciu o 3 podstawowe parametry pompowni, tj.: łączną wydajność pomp Q w $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, moc całkowitą agregatów P w kW oraz powierzchnię odwadniania F_p w ha. Obszarem badań objęto zbiór losowo wybranych 270 stacji pompowych, stanowiących nieco ponad 45% ogólnej liczby pompowni melioracyjnych w Polsce [GUS 2013]. W tym zbiorze znalazły się pompownie o:

- wydajności całkowitej Q z przedziału od 0,001 do 25,6 m³ · s⁻¹;
- całkowitej mocy nominalnej agregatów pompowych z przedziału od 1 do 1150 kW;
- powierzchni odwadniającej z przedziału od 2 do 23 500 ha.

Do oceny wielkości pompowni melioracyjnych zastosowano metodę COMET, która jest całkowicie odporna na zjawisko *rank reversal*, ponieważ raz zidentyfikowany model stale zwraca te same wartości ocen dla wszystkich ocenianych obiektów [Sałabun 2014a]. Metoda ta bazuje na mechanizmach zbiorów rozmytych [Zadeh 1965], które wielokrotnie były stosowane do opracowania modeli eksperckich [Sałabun 2014b]. Podejście to zakłada przeprowadzenie pięciu etapów postępowania [Sałabun 2014c].

Etap 1. Zdefiniowanie przestrzeni problemu.

Pierwszym krokiem jest określenie wymiarowości problemu poprzez wskazanie liczby r kryteriów C_1, C_2, \dots, C_r . Następnie, należy wskazać zbiór trójkątnych liczb rozmytych dla każdego pojedynczego kryterium C_i w następującej postaci: $\tilde{C}_{i1}, \tilde{C}_{i2}, \dots, \tilde{C}_{ic_i}$. W ten sposób otrzymujemy przestrzeń rozważanego problemu o następującej postaci:

$$\begin{aligned} C_1 &= \{ \tilde{C}_{11}, \tilde{C}_{12}, \dots, \tilde{C}_{1c_1} \} \\ C_2 &= \{ \tilde{C}_{21}, \tilde{C}_{22}, \dots, \tilde{C}_{2c_2} \} \\ &\dots\dots\dots \\ C_r &= \{ \tilde{C}_{r1}, \tilde{C}_{r2}, \dots, \tilde{C}_{rc_r} \} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

c_1, c_2, \dots, c_r – liczba zbiorów rozmytych (trójkątnych liczb rozmytych) odpowiednio dla wszystkich kryteriów C_1, C_2, \dots, C_r .

Etap 2. Wygenerowanie obiektów charakterystycznych

Obiekty charakterystyczne są otrzymywane poprzez zastosowanie iloczynu kartezjańskiego na zbiorach jąder trójkątnych liczb rozmytych wszystkich wskazanych kryteriów:

$$CO = C(C_1) \times C(C_2) \times \dots \times C(C_r) \quad (2)$$

W rezultacie otrzymuje się uporządkowany zbiór wszystkich obiektów charakterystycznych w postaci:

$$\begin{aligned} CO_1 &= \{ C(\tilde{C}_{11}), C(\tilde{C}_{21}), \dots, C(\tilde{C}_{r1}) \} \\ CO_2 &= \{ C(\tilde{C}_{11}), C(\tilde{C}_{21}), \dots, C(\tilde{C}_{r2}) \} , \\ &\dots\dots\dots \\ CO_t &= \{ C(\tilde{C}_{1c_1}), C(\tilde{C}_{2c_2}), \dots, C(\tilde{C}_{rc_r}) \} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

t – liczba uzyskanych obiektów charakterystycznych:

$$t = \prod_{i=1}^r c_i \quad (4)$$

Etap 3. Rankowanie i ocena obiektów charakterystycznych

Należy wyznaczyć macierz ocen eksperckich (MEJ – *Matrix of Expert Judgment*), która powstaje poprzez porównanie parami wszystkich obiektów charakterystycznych. W rezultacie struktura macierzy MEJ przyjmuje formę (5):

$$MEJ = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1t} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{t1} & \alpha_{t2} & \dots & \alpha_{tt} \end{pmatrix} \begin{matrix} CO_1 \\ CO_2 \\ \dots \\ CO_t \end{matrix}, \quad (5)$$

gdzie:

α_{ij} – wartość wynikająca z porównania obiektów charakterystycznych CO_i oraz CO_j dokonanej przez eksperta.

Silniej preferowany obiekt, w porównywanej parze, otrzymuje jeden punkt, a drugi obiekt zero punktów. Jeżeli preferencje obu obiektów są w przybliżeniu równe, wówczas każdy z nich otrzymuje po połowie punktu. Proces oceniania jest uzależniony wyłącznie od wiedzy eksperta i może zostać przedstawiony formalnie jako:

$$\alpha_{ij} = f(CO_i, CO_j) = \begin{cases} 0.0, & f_{\text{exp}}(CO_i) < f_{\text{exp}}(CO_j) \\ 0.5, & f_{\text{exp}}(CO_i) = f_{\text{exp}}(CO_j), \\ 1.0, & f_{\text{exp}}(CO_i) > f_{\text{exp}}(CO_j) \end{cases} \quad (6)$$

gdzie:

f_{exp} – funkcja mentalna oceny eksperta.

Funkcja ta nie jest jednoznacznie określona, zależy bowiem od wiedzy i doświadczenia konkretnego eksperta. Ważną właściwością f_{exp} jest to, że porównanie $\alpha_{ii} = f(CO_i, CO_i)$ nie wnosi żadnych istotnych informacji. Może być zatem automatycznie uzupełnione zerem punktów. Liczba porównań niezbędnych do powstania macierzy MEJ nie wynosi t^2 ze względu na zależność $\alpha_{ji} = 1 - \alpha_{ij}$, która redukuje liczbę niezbędnych porównań do p zapytań:

$$p = \binom{t}{2} = \frac{t(t-1)}{2} \quad (7)$$

Następnie wyznaczany jest pionowy wektor SJ , który sumuje liczbę uzyskanych punktów przez każdy obiekt charakterystyczny. Dokonuje się tego poprzez zsumowanie każdego wiersza macierzy MEJ :

$$SJ_i = \sum_{j=1}^t \alpha_{ij} \quad (8)$$

Ostatnim krokiem, w tym etapie, jest przypisanie dla każdego obiektu charakterystycznego aproksymowanej wartości preferencji. W wyniku powstaje pionowy wektor P , gdzie wartość z i -tego wiersza oznacza wartość preferencji przybliżoną za pomocą reguły nierozróżnialności Laplace'a dla i -tego obiektu charakterystycznego. Dokładny algorytm jest zaprezentowany poniżej jako fragment kodu w języku programowania pakietu obliczeniowego Matlab:

```

1: k = length(unique(SJ));
2: P = zeros(t,1);
3: for i = 1:k
4: ind = find(SJ == max(SJ));
5: P(ind) = (k - i) / (k - 1);
6: SJ(ind) = 0;
7: end
    
```

W linii numer 1 obliczana jest liczba niepowtarzalnych wartości należących do wektora SJ . W linii numer 2 tworzony jest wektor P o identycznej wymiarowości jak wektor SJ , ale wypełniony samymi zerami. Linia numer 3 rozpoczyna pętlę, której ciało zostanie wywołane k -krotnie. W linii numer 4 wyszukiwany jest indeks z największą wartością z wektora SJ . W linii numer 5 indeks ten jest wykorzystywany do wyznaczenia preferencji na podstawie reguły nierozróżnialności Laplace'a. W linii numer 6 zerowana jest maksymalna wartość wektora SJ .

Etap 4. Tworzenie bazy reguł

Każdy obiekt charakterystyczny wraz z jego aproksymowaną wartością preferencji przekształcany jest w regułę rozmytą zgodnie z tautologią Uogólniony Modus Ponens:

$$IF CO_i THEN P_i \tag{9}$$

co można przedstawić w formie szczegółowej jako:

$$IF C(\tilde{C}_{1i}) AND C(\tilde{C}_{2i}) AND... THEN P_i \tag{10}$$

Kompletna baza reguł powstaje po przekształceniu wszystkich dostępnych obiektów charakterystycznych i można ją zapisać jako:

$$\begin{array}{l}
 IF CO1 THEN P1 \\
 IF CO2 THEN P2 \\
 \\
 IF COt THEN Pt
 \end{array} \tag{11}$$

Etap 5. Wnioskowanie rozmyte i otrzymanie końcowego rankingu

Każda alternatywa jest zdefiniowana jako zbiór ostrych wartości, które odpowiadają poszczególnym kryteriom modelu C_1, C_2, \dots, C_r . Przykładowo i -ta alternatywa może zostać zapisana jako:

$$A_i = \{a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{ri}\}, \tag{18}$$

przy zastrzeżeniu spełnienia następujących warunków:

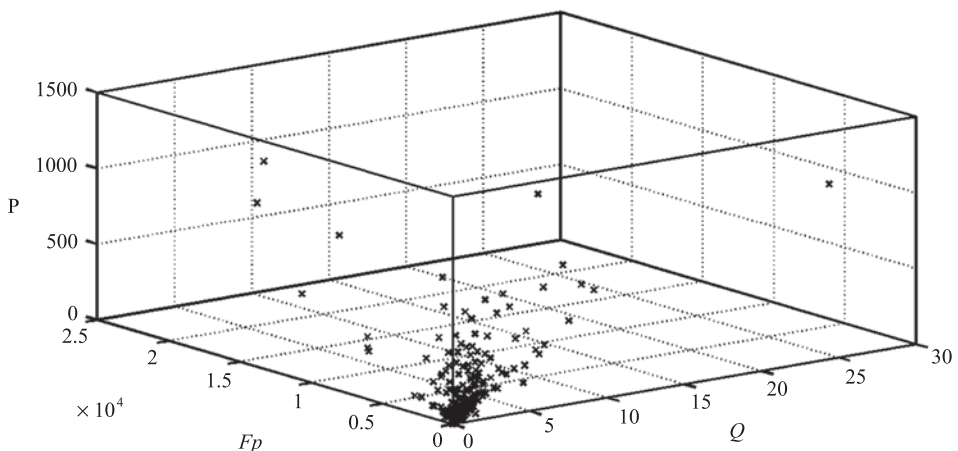
$$\begin{aligned} a_{li} &\in [C(\tilde{C}_{11}), C(\tilde{C}_{1a_i})] \\ a_{li} &\in [C(\tilde{C}_{21}), C(\tilde{C}_{2c_2})] \\ &\dots\dots\dots \\ a_{ri} &\in [C(\tilde{C}_{r1}), C(\tilde{C}_{rc_r})] \end{aligned} \quad (19)$$

Każda alternatywa aktywuje określoną liczbę reguł, dla których określa się stopień aktywacji jako iloczyn stopnia przynależności wszystkich przesłanek. Suma wszystkich stopni aktywacji reguł rozmytych wynosi jeden. Wartość preferencji każdej alternatywy jest natomiast wyliczana jako suma produktu stopnia aktywacji wszystkich aktywowanych reguł oraz ich aproksymowanej wartości preferencji. Ostateczny ranking alternatyw uzyskuje się poprzez sortowanie uzyskanych stopni preferencji.

WYNIKI

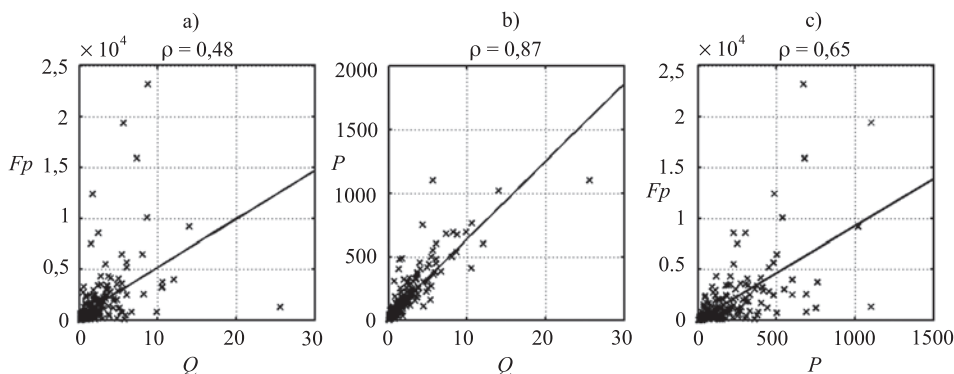
Jak wynika z założeń metodycznych, w pierwszym etapie określano wymiarowość problemu poprzez wskazanie liczby rozpatrywanych kryteriów. Problem oceny wielkości pompowni melioracyjnych jest zdefiniowany w niniejszym opracowaniu w oparciu o podstawowe parametry eksploatacyjne (atrybuty) 270 stacji pompowych funkcjonujących na terenie całej Polski, tj. łączna wydajność pomp Q w $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, moc całkowita P w kW, oraz obszar oddziaływania Fp w ha. Wizualizację analizowanych obiektów przedstawiono w przestrzeni trójwymiarowej (ryc. 1). Dzięki temu możliwe było lepsze zaobserwowanie charakterystyk zależności pomiędzy poszczególnymi obiektami poddawanych ewaluacji.

Możliwe jest również rzutowanie problemu na poszczególne podprzestrzenie, co ilustruje ryc. 2. Jest to szczególnie przydatne w momencie, gdy wymiarowość problemu



Ryc. 1. Wizualizacja 270 pompowni melioracyjnych w przestrzeni stanu problemu

Fig. 1. The visualization of 270 drainage pumping stations in the state space of the problem



Ryc. 2. Zrzutowanie problemu trójwymiarowego na podprzestrzeń dwuwymiarową: (a) – wydajność Q oraz powierzchnia oddziaływania Fp , (b) – wydajność Q oraz łączna moc pomp P , (c) – łączna moc pomp P oraz powierzchnia oddziaływania Fp

Fig. 2. Discharge of a three-dimensional problem to a two-dimensional subspace, including 270 pairs of attributes for pumping stations: (a) – the total efficiency of pumps Q and the total area of impact Fp , (b) – the total efficiency of pumps Q and the total power of pumps P , (c) – the total power of pumps P and the total area of impact Fp

przekracza liczbę trzech kryteriów, gdyż wówczas nie ma możliwości jednoczesnego ich wizualizowania. Największa zależność liniowa występuje pomiędzy mocą P a wydajnością pomp Q (współczynnik korelacji Pearsona 0,8632), a najmniejsza pomiędzy powierzchnią oddziaływania Fp i wydajnością pomp Q (współczynnik korelacji Pearsona 0,4753).

Istotny poziom współczynnika korelacji pomiędzy mocą (P) i wydajnością (Q) wynika przede wszystkim z równania:

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta_c} \quad [\text{kW}] \quad (20)$$

gdzie:

- P – moc pomp, kW,
- Q – wydajność układu pompowego, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- H – wysokość podnoszenia, m,
- ρ – gęstość cieczy, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
- g – przyspieszenie ziemskie, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,
- η_c – sprawność całkowita układu pompowego.

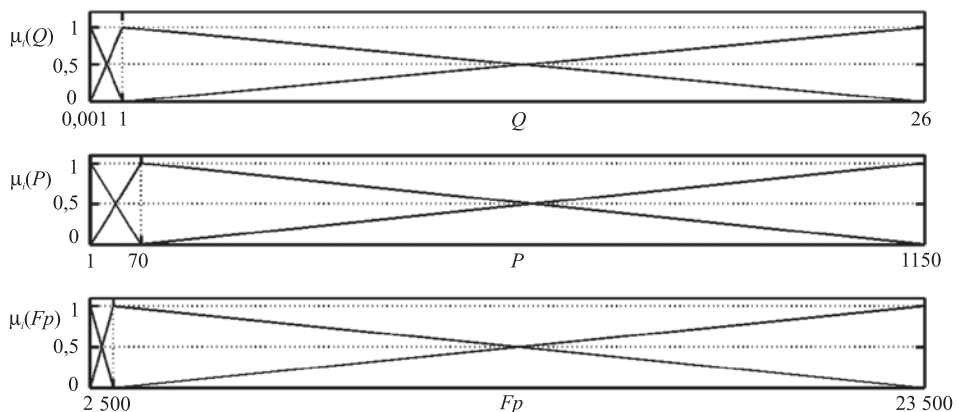
Wysoki współczynnik korelacji pomiędzy parametrami P i Q świadczy więc o niewielkim wpływie istotności wysokości podnoszenia H i sprawności η_c na poziom zdefiniowania wielkości pompowni. Niski współczynnik korelacji pomiędzy powierzchnią oddziaływania Fp i wydajnością pomp Q wynika natomiast z innych nieokreślonych w pracy warunków, decydujących o splywie powierzchniowym, a w konsekwencji o całkowitej wydajności pompowni Q . Wśród nich można wymienić takie czynniki jak na przykład: ukształtowanie terenu, rodzaj gleb czy też sposób gospodarowania na obszarze oddziaływania pompowni. Do dalszej analizy wyznaczana jest, na podstawie wiedzy eksperta oraz

charakterystyk rozpatrywanych obiektów, domena dla każdego kryterium. W ten sposób jest ustalana dolna oraz górna granica wartości poszczególnych atrybutów, dla których stworzony model jest w stanie oszacować wartość oceny, które zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości graniczne dla trzech rozpatrywanych kryteriów definiujące ich domeny
Table 1. Limit values for three considered criteria that define domains

Nazwa kryterium criterion	Wartość minimalna Minimum value	Wartość Maximum value
Wydajność Q , $\text{m}^3 \cdot \text{s}$ Capacity Q , $\text{m}^3 \cdot \text{s}$	0,001	26
Łączna moc pomp P , kW, The total power of pumps P , kW,	1	1150
Powierzchnia oddziaływania Fp , ha the total area of impact Fp , ha	2	23500

Są to jednocześnie podstawowe wartości charakterystyczne rozpatrywanych kryteriów. Liczba obiektów charakterystycznych, jakie mogą być wygenerowane z wartości charakterystycznych, jest równa łącznemu iloczynowi liczby tych wartości (czyli w tym przypadku 2^3). W celu zwiększenia dokładności modelu kolejne wartości charakterystyczne zostają wskazane przez eksperta, ale w oparciu o dane z ryc. 1 oraz ryc. 2. W ten sposób, dla każdego kryterium jest wyznaczana wartość typowa. Wartość typowa wydajności pompowni jest oszacowana na poziomie $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, łącznej mocy pomp na poziomie 70 kW oraz powierzchni oddziaływania na poziomie 500 ha. Na bazie tych wartości wyznaczone zostają funkcje przynależności, które będą potrzebne do przeprowadzenia wnioskowania w piątym etapie. Funkcje przynależności zostały przedstawione na ryc. 3.



Ryc. 3. Funkcje przynależności opisujące trójkątne liczby rozmyte dla wydajności pomp Q w $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, powierzchni oddziaływania Fp w ha oraz łącznej mocy pomp P w kW

Fig. 3. Triangular membership functions of fuzzy numbers for the total efficiency of pumps Q in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, the area of impact Fp in ha and the total power of pumps P in kW

Drugim etapem jest wygenerowanie, na podstawie wartości typowych oraz wartości granicznych, 27 obiektów charakterystycznych, jako iloczyn kartezjański trzech zbiorów reprezentujących kolejne kryteria. Przykładowo pierwszy obiekt charakterystyczny to kombinacja $0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 2 ha, 1 kW; drugi odpowiada kombinacji $0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 2 ha, 70 kW; reszta obiektów charakterystycznych i przypadające im kombinacje zostały zaprezentowane w tabeli 2. Następnie w trzecim etapie dochodzi do ewaluacji obiektów charakterystycznych. Każdy obiekt charakterystyczny jest porównywany przez eksperta ze wszystkimi pozostałymi obiektami charakterystycznymi. W wyniku przeprowadzonego turnieju dochodzi do 351 porównań. Jeżeli wielkość jednego z obiektów referencyjnych jest większa, to otrzymuje on jeden punkt, natomiast drugi obiekt referencyjny otrzymuje zero punktów. W przypadku problemów z podjęciem decyzji przyznaje się każdemu obiektowi po pół punktu. Nie ma potrzeby porównywać dwóch tych samych obiektów (dlatego liczba porównań wynosi 351, a nie 378). Po zakończeniu turnieju punkty dla każdego obiektu charakterystycznego są sumowane. Najwięcej punktów (26 punktów) otrzymuje 27 obiekt charakterystyczny, który określa największą możliwą pompownię melioracyjną w rozważanej przestrzeni. Najmniej punktów (0 punktów) otrzymuje pierwszy obiekt charakterystyczny, który określa jednocześnie najmniejszą pompownię. Szczegółowe zestawienie zsumowanych punktów znajdują się w kolumnie *S* w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie 27 obiektów charakterystycznych CO_iTable 2. The summary of 27 characteristic objects CO_i

CO _i	<i>Q</i>	<i>F_p</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>K</i>
CO ₁	0,001	2	1	0,0	23	⁰ / ₂₂
CO ₂	0,001	2	70	3,5	20	³ / ₂₂
CO ₃	0,001	2	1150	10,0	14	⁹ / ₂₂
CO ₄	0,001	500	1	6,0	18	⁵ / ₂₂
CO ₅	0,001	500	70	9,0	15	⁸ / ₂₂
CO ₆	0,001	500	1150	17,0	6	¹⁷ / ₂₂
CO ₇	0,001	23500	1	11,5	11	¹² / ₂₂
CO ₈	0,001	23500	70	16,5	7	¹⁶ / ₂₂
CO ₉	0,001	23500	1150	23,0	2	²¹ / ₂₂
CO ₁₀	1	2	1	1,0	22	¹ / ₂₂
CO ₁₁	1	2	70	3,0	21	² / ₂₂
CO ₁₂	1	2	1150	11,0	12	¹¹ / ₂₂
CO ₁₃	1	500	1	6,5	17	⁶ / ₂₂
CO ₁₄	1	500	70	10,5	13	¹⁰ / ₂₂
CO ₁₅	1	500	1150	16,5	7	¹⁶ / ₂₂

Tabela 2. cd.
Table 2 cont.

CO_i	Q	Fp	P	S	R	K
CO_{16}	1	23500	1	14,5	8	$^{15}/_{22}$
CO_{17}	1	23500	70	19,0	5	$^{18}/_{22}$
CO_{18}	1	23500	1150	23,0	2	$^{21}/_{22}$
CO_{19}	26	2	1	5,5	19	$^4/_22$
CO_{20}	26	2	70	7,5	16	$^7/_22$
CO_{21}	26	2	1150	14,0	9	$^{14}/_{22}$
CO_{22}	26	500	1	13,5	10	$^{13}/_{22}$
CO_{23}	26	500	70	17,0	6	$^{17}/_{22}$
CO_{24}	26	500	1150	22,5	3	$^{20}/_{22}$
CO_{25}	26	23500	1	20,5	4	$^{19}/_{22}$
CO_{26}	26	23500	70	23,0	2	$^{21}/_{22}$
CO_{27}	26	23500	1150	26,0	1	$^{22}/_{22}$

S – suma punktów uzyskanych w turnieju obiektów charakterystycznych – the sum of points, R – miejsce w rankingu obiektów charakterystycznych – position in the ranking of characteristic objects, K – ocena wielkości pompowni (1 – pompownia największa, 0 – pompownia najmniejsza) – evaluation of the size of the pumping station (1 – the largest, 0 – the smallest)

Na tej podstawie ustalany jest ranking obiektów charakterystycznych. Pierwsze miejsce otrzymuje obiekt największy, a ostatnie najmniejszy. Obiekty charakterystyczne 9, 18, 26 mają identyczną sumę punktów, dlatego też zajmują one w równej mierze drugie miejsce. W efekcie takich remisów ranking zawiera 23 miejsca, a nie 27. Na podstawie zasady nierozróżnialności Laplace'a obliczana jest odległość pomiędzy kolejnymi obiektami charakterystycznymi. Odległość tą wyznacza się jako iloraz jedyńki oraz liczby miejsc w rankingu pomniejszonych o jeden ($^1/_22$). Obiekt z pierwszym miejscem w rankingu otrzymuje wartość 1, z drugim miejscem $^{21}/_{22}$, z trzecim miejscem $^{20}/_{22}$, ..., a z ostatnim 23 miejscem $^0/_22$. Każdy obiekt charakterystyczny generuje następnie dokładnie jedną regułę zgodnie z formułami (9)–(11). W ten sposób otrzymujemy kompletną bazę reguł, która definiuje model rozmyty wielkości pompowni melioracyjnych. Baza ta składa się z następujących 27 reguł:

R_1 : IF $Q \sim 0,001$ AND $Fp \sim 2$ AND $P \sim 1$
THEN $^0/_22$

R_2 : IF $Q \sim 0,001$ AND $Fp \sim 2$ AND $P \sim 70$
THEN $^3/_22$

R_3 : IF $Q \sim 0,001$ AND $Fp \sim 2$ AND $P \sim 1150$
THEN $^9/_22$

R_{15} : IF $Q \sim 1$ AND $Fp \sim 500$ AND $P \sim 1150$
THEN $^{16}/_{22}$

R_{16} : IF $Q \sim 1$ AND $Fp \sim 23500$ AND $P \sim 1$
THEN $^{15}/_{22}$

R_{17} : IF $Q \sim 1$ AND $Fp \sim 23500$ AND $P \sim 70$
THEN $^{18}/_{22}$

R_4 : IF $Q \sim 0,001$ AND $Fp \sim 500$ AND $P \sim 1$
THEN $^{5/}_{22}$

R_5 : IF $Q \sim 0,001$ AND $Fp \sim 500$ AND $P \sim 70$
THEN $^{8/}_{22}$

R_6 : IF $Q \sim 0,001$ AND $Fp \sim 500$ AND
 $P \sim 1150$ THEN $^{17/}_{22}$

R_7 : IF $Q \sim 0,001$ AND $Fp \sim 23500$ AND
 $P \sim 1$ THEN $^{12/}_{22}$

R_8 : IF $Q \sim 0,001$ AND $Fp \sim 23500$ AND
 $P \sim 70$ THEN $^{16/}_{22}$

R_9 : IF $Q \sim 0,001$ AND $Fp \sim 23500$ AND
 $P \sim 1150$ THEN $^{21/}_{22}$

R_{10} : IF $Q \sim 1$ AND $Fp \sim 2$ AND $P \sim 1$
THEN $^1/_{22}$

R_{11} : IF $Q \sim 1$ AND $Fp \sim 2$ AND $P \sim 70$
THEN $^2/_{22}$

R_{12} : IF $Q \sim 1$ AND $Fp \sim 2$ AND $P \sim 1150$
THEN $^{11/}_{22}$

R_{13} : IF $Q \sim 1$ AND $Fp \sim 500$ AND $P \sim 1$
THEN $^6/_{22}$

R_{14} : IF $Q \sim 1$ AND $Fp \sim 500$ AND $P \sim 70$
THEN $^{10/}_{22}$

R_{18} : IF $Q \sim 1$ AND $Fp \sim 23500$ AND $P \sim 1150$
THEN $^{21/}_{22}$

R_{19} : IF $Q \sim 26$ AND $Fp \sim 2$ AND $P \sim 1$ THEN
 $^{4/}_{22}$

R_{20} : IF $Q \sim 26$ AND $Fp \sim 2$ AND $P \sim 70$
THEN $^7/_{22}$

R_{21} : IF $Q \sim 26$ AND $Fp \sim 2$ AND $P \sim 1150$
THEN $^{14/}_{22}$

R_{22} : IF $Q \sim 26$ AND $Fp \sim 500$ AND $P \sim 1$
THEN $^{13/}_{22}$

R_{23} : IF $Q \sim 26$ AND $Fp \sim 500$ AND $P \sim 70$
THEN $^{17/}_{22}$

R_{24} : IF $Q \sim 26$ AND $Fp \sim 500$ AND $P \sim 1150$
THEN $^{20/}_{22}$

R_{25} : IF $Q \sim 26$ AND $Fp \sim 23500$ AND $P \sim 1$
THEN $^{19/}_{22}$

R_{26} : IF $Q \sim 26$ AND $Fp \sim 23500$ AND $P \sim 70$
THEN $^{21/}_{22}$

R_{27} : IF $Q \sim 26$ AND $Fp \sim 23500$ AND
 $P \sim 1150$ THEN 1

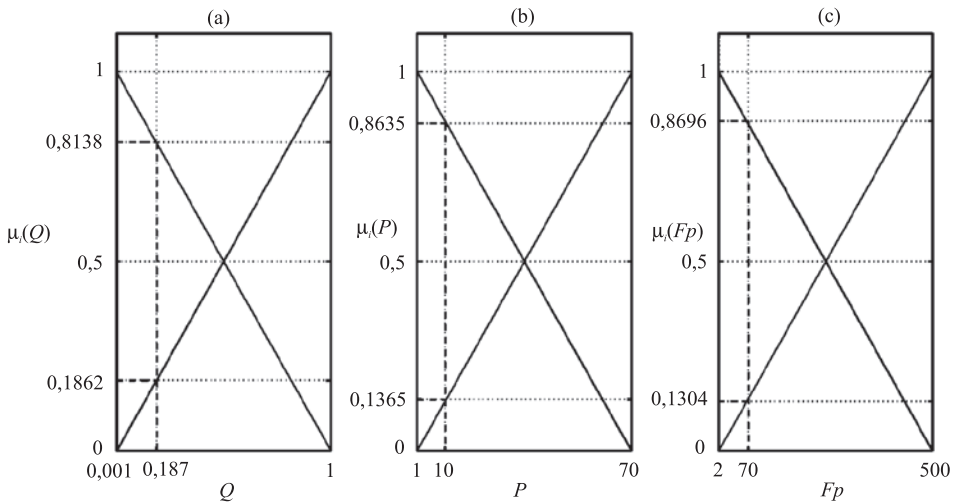
Ostatni etap metody COMET polega na zastosowaniu uzyskanego modelu do oceny rzeczywistych obiektów. Rozważmy zatem sytuację oceny pojedynczej pompowni melioracyjnej. Przy ocenie pompowni Bródki ($Q = 0,187 \text{ m}^3 \cdot \text{s}$, $Fp = 70 \text{ ha}$, $P = 10 \text{ kW}$) aktywowanych jest 8 reguł: R_1 , R_2 , R_4 , R_5 , R_{10} , R_{11} , R_{13} oraz R_{14} . Stopnie przynależności dla wszystkich rozważanych parametrów pompowni Bródki zostały wyznaczone w sposób graficzny na ryc. 4.

Przykładowo łączna moc P pompowni Bródki wynosi 10 kW, co oznacza przynależności do wartości ~ 1 w stopniu 0,8635 oraz 0,1365 do wartości ~ 70 . Czym większy stopień podobieństwa do ocenianego obiektu posiada reguła (wygenerowana z obiektu charakterystycznego), tym wyższy stopień aktywacji danej reguły. Stopnie aktywacji poszczególnych reguł są wyliczane jako iloczyny stopni przynależności poszczególnych wartości. Przykładowo wartość aktywacji reguły R_1 jest wyznaczana jako iloczyn stopni przynależności liczb rozmytych $\sim 0,001$, ~ 1 oraz ~ 2 . Zatem wartość aktywacji 0,6110 powstaje jako iloczyn stopni przynależności 0,8138, 0,8635 oraz 0,8696. Oceny częściowe uzyskuje się poprzez wymnożenie wartości oceny K przez stopień aktywacji. Ocena końcowa jest uzyskiwana poprzez zsumowanie wszystkich ocen częściowych i wynosi 0,0555. Zestawienie aktywowanych reguł, stopni ich aktywacji oraz ocen częściowych dla pompowni Bródki jest przedstawione w tabeli 3.

Aktywowane zostały tylko te reguły, których wartości charakterystyczne leżą na krańcu przedziału, w jakim znajdują się poszczególne atrybuty. W prezentowanym powyżej przykładzie nie rozpatruje się reguł, gdzie wartość Q wynosiła ~ 26 , wartość

$P \sim 1150$ oraz wartość $Fp \sim 23500$. Stopień przynależności dla tych wartości rozmytych jest równy zero, a więc reguły odnoszące się do tych wartości posiadają zerowy stopień aktywacji. W podobny sposób za pomocą przedstawionego modelu można dokonać ewaluacji wszystkich pozostałych pompowni. Przykładowe oceny dla 5 losowo wybranych pompowni zostały przedstawione w tabeli 4.

Wartości te pozwalają na uszeregowanie pompowni od najmniejszych (wartość 0) do największych (wartość 1) obiektów.



Ryc. 4. Graficzne wyznaczenie stopni przynależności dla atrybutów pompowni Bródki, (a) wydajność pomp Q , $\text{m}^3 \cdot \text{s}$, (b) powierzchnia oddziaływania Fp , ha, oraz (c) łączna moc pomp P , kW

Fig. 4. Graphical determination of membership degrees for attributes of drainage pumping Bródki, (a) the total efficiency of pumps Q , $\text{m}^3 \cdot \text{s}$, (b) the area of impact Fp , ha, and (c) the total power of pumps P , kW

Tabela 3. Ocena pompowni melioracyjnej Bródki

Table 3. The evaluation of the pumping station Bródki

Reguła Rule	R_1	R_2	R_4	R_5	R_{10}	R_{11}	R_{13}	R_{14}
Wartość oceny Value assesment	0,000	0,136	0,227	0,363	0,045	0,090	0,272	0,454
Stopień aktywacji Degree of activation	0,611	0,091	0,096	0,014	0,139	0,021	0,022	0,003
Ocena częściowa Partial evaluation	0,000	0,012	0,0220	0,0053	0,0064	0,0019	0,0060	0,0015

Wszystkie obliczenia wykonano z dokładnością do czwartego miejsca po przecinku; ostateczna ocena pompowni melioracyjnej Bródki wynosi 0,0555 – All calculations made with an accuracy of 4 decimal places; the final evaluation of the pumping station Bródki is 0,0555

Tabela 4. Przykładowe wyniki ocen istotności K pompowni melioracyjnych Bródki, Brody, Urad II, Głuchów oraz Sadowa pod względem ich wielkości w odniesieniu do wydajności pomp Q , $m^3 \cdot s$, powierzchni oddziaływania Fp , ha, oraz łącznej moc pomp P , kW

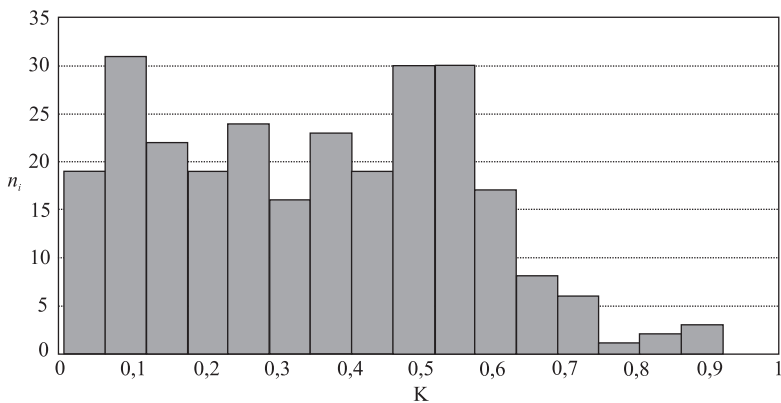
Table 4. Examples of final assessments of drainage pumping stations Bródki, Brody, Urad II, Głuchów oraz Sadowa in terms of their size in relation to the total efficiency of pumps Q , $m^3 \cdot s$, the total area of impact Fp , ha and the total power of pumps P , kW

Parametry Parameters	Pompownia Pumping station					
	Bródki	Brody	Urad II	Głuchów	Sadowa	
Q	0,187	1	2,2	3,33	25,6	
Fp	70	220	776	5480	1300	
P	10	60	110	225	1100	
K	0,0555	0,2349	0,4839	0,5925	0,9032	

DYSKUSJA

Na podstawie zidentyfikowanego modelu można dokonać oceny wielkości analizowanych 270 pompowni melioracyjnych, a rozkład wyników dla tej grupy przedstawiono na ryc. 5. Uzyskany model pozwala również na ocenę pozostałych pompowni, które nie zostały uwzględnione w poniższym badaniu. Nie wymaga to ponownego zastosowania całej procedury metody COMET, gdyż wystarczy przeprowadzić dla dodatkowych obiektów etap 5. Na tym etapie dochodzi się wyłącznie do wnioskowania na podstawie wcześniej zidentyfikowanego modelu.

Rozkład zaprezentowany na ryc. 5 ułatwia zatem określenie wartości lingwistycznych: *mały*, *średni*, *duży*, przeznaczonych do opisu wielkości pompowni melioracyjnych. Tabela 5 dostarcza w tym celu dodatkowych informacji, które mają na celu ułatwić ekspertowi identyfikację wartości rozmytych.



Ryc. 5. Rozkład wartości oceny wielkości 270 wybranych losowo pompowni na terenie Polski pod względem ich wielkości

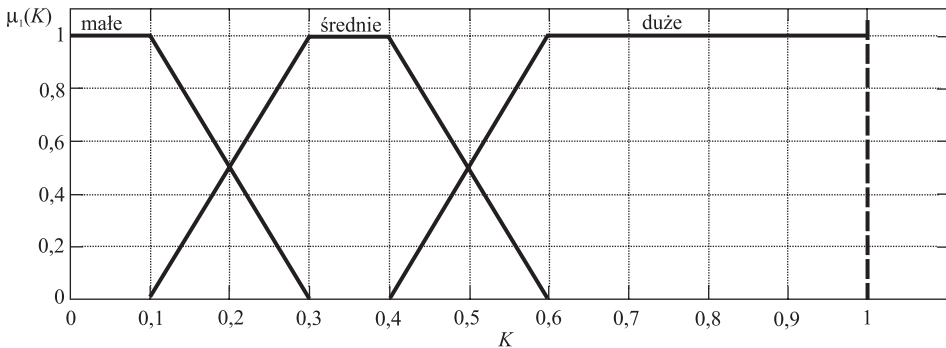
Fig. 5. Assessment of the size distribution of 270 randomly selected pumping stations in Poland in terms of size

Tabela 5. Podstawowe miary statystyki opisujące rozkład ocen wielkości 270 pompowni melioracyjnych.

Table 5. Basic measures of statistics describing the distribution of the size of 270 drainage pumping stations.

Miary statystyczne Statistical measures	Średnia arytmetyczna Arithmetic average	Odchylenie standardowe Standard deviation	Wartość środkowa The median	Pierwszy kwartył The first quartile	Drugi kwartył The second quartile
Wartości Values	0,3523	0,2083	0,3589	0,1713	0,5182

Na początku należy określić, kiedy z całą pewnością możemy stwierdzić, iż mamy do czynienia z odpowiednio małą, średnią lub dużą pompownią. Ekspert zakłada, iż pompownie o ocenie poniżej 0,1 z całą pewnością są małe, od 0,3 do 0,4 są średnie, a powyżej 0,6 są to duże obiekty. Na tej podstawie można przedstawić funkcje przynależności do tych trzech wartości lingwistycznych z wykorzystaniem liczb rozmytych trapezoidalnych (ryc. 6).



Ryc. 6. Definicje funkcji przynależności wartości lingwistycznych mały, średni, duży, odnoszących się do pompowni melioracyjnych na terenie Polski

Fig. 6. Membership functions of linguistic values: small, medium, large, relating to pumping station in Poland

Wobec tak zdefiniowanych wartości lingwistycznych możemy dokonać klasyfikacji wcześniej ocenionych 270 pompowni melioracyjnych. Spośród tej liczby 41 pompowni w całości przynależy do określenia mała, 33 można określić jako średnią, a 29 jako dużą. Pozostałe 167 pompowni posiada dwa niezerowe stopnie przynależności do dwóch wartości lingwistycznych. Oznacza to, iż ich charakterystyki wskazują na podobieństwo (w różnym stopniu) do dwóch sąsiadujących ze sobą wartości lingwistycznych, 77 pompowni posiada niezerową przynależność do wartości lingwistycznej *mała* oraz *średnia*, a 90 do *średnia* oraz *duża*. Obiekty te uzyskały ocenę, która należy do przedziału od 0,1 do 0,3 lub od 0,4 do 0,6. Pompownie Bródki i Sadowa, które były szczegółowo rozpatrywane w tabeli 4, posiadają pełną przynależność odpowiednio do

wartości lingwistycznych *mała* i *duża*. Wynik uzyskany przez obiekt Bródki wynosił zaledwie 0,0555 (pełna przynależność do wartości lingwistycznej *mała*), z kolei Sadowa uzyskała wynik 0,9032 (pełna przynależność do wartości lingwistycznej *duża*). Natomiast pompownia Brody w stopniu 0,3255 przynależy do wartości lingwistycznej *mała* pompownia, a w stopniu 0,6745 do wartości lingwistycznej *średnia*. Oznacza to, iż jej wynik nie jest klasyfikowany w sposób ostry, gdyż pompownia ta posiada częściowy stopień przynależności do obu wartości lingwistycznych, jednak bardziej zbliżona jest do wartości *średnia*.

PODSUMOWANIE

W pracy na podstawie danych dotyczących 270 losowo wybranych pompowni zlokalizowanych na terenie Polski zaproponowano model służący do oceny przynależności do wartości lingwistycznej tych obiektów pod względem ich wielkości. Zastosowana metoda COMET zapewnia powtarzalność wyników i ich niezmiennosc przy zastosowaniu trzech podstawowych parametrów w postaci wydajności pomp Q w $\text{m}^3 \cdot \text{s}$, powierzchni oddziaływania F_p w ha oraz łącznej mocy pomp P w kW. Uzyskane wyniki posłużyły następnie do stworzenia definicji trzech pojęć lingwistycznych (*mała*, *średnia*, *duża*) opisujących wielkość danego obiektu za pomocą zbiorów rozmytych. W ten sposób dowolna liczba pompowni melioracyjnych należąca do przestrzeni rozważań problemu może zostać poddana ocenie istotności, na podstawie której zostanie ona następnie sklasyfikowana do odpowiednich pojęć lingwistycznych, z odpowiednim stopniem podobieństwa.

LITERATURA

- Balcerzak, W., Generowicz, A., Mucha, Z. (2014). Application of Multi-Criteria Analysis for Selection of a Reclamation Method for a Hazardous Waste Landfill. *Pol. J. Environ. Stud.*, 23(3), 983–987.
- Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., Ignatius, J.A. (2012). state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17).
- Bender, M.J., Simonovic, S.P. (2000). A fuzzy compromise approach to water resource systems planning under uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*, 115(1), 35–44.
- Bykowski, J., Miler, A. (1997). Zastosowanie metod grupowań hierarchicznych do charakterystyki obiektów drenarskich w Wielkopolsce. *Rocz. AR w Poznaniu*, 294, Mel. Inż. Środ. 19, 233–240.
- Bykowski, J., Przybyła, Cz., Napierała, M., Ossig, R. (2013). Wskaźnikowa ocena potrzeb konserwacji cieków i kanałów melioracyjnych w planowaniu robót. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 12(2), 23–32.
- Bykowski, J., Przybyła, Cz., Napierała, M., Mroziak, K., Pęciak, A. (2014). Ocena stanu technicznego infrastruktury wodno-melioracyjnej na polderze Zagórów. *Inż. Ekol.*, 39, 42–50.
- Cebulak K. 1966. Stacje pomp dla potrzeb melioracji. Materiały konferencyjne. Zielona Góra, 21–43.
- Centralne Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego [CBSiPBW] (1971). Wytuczne instruktażowe projektowania budowli wodno-melioracyjnych – pompownie. Materiały pomocnicze 7/71. Zakład Reprodukcyjny i WDB, Warszawa, ss. 70.
- Collins English Dictionary [CED]. Complete & Unabridged 10th Edition (2014). HarperCollins Publishers, <http://dictionary.reference.com/browse/size>.

- Dictionary.com Unabridged [D] (2014). Random House, Inc. <http://dictionary.reference.com> (23.09).
- Figueira, J., Mousseau, V., Roy, B. (2005). ELECTRE methods. [W:] Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys. Springer, New York, 133–153.
- Główny Urząd Statystyczny [GUS] (2013). Rocznik statystyczny rolnictwa. Warszawa, ss. 389.
- Hajkowicz, S., Collins, K. (2007). K.A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resour. Manag.*, 21(9), 1553–1566,
- Hokkanen, J., Salminen, P. (1997). Choosing a solid waste management system using multicriteria decision analysis. *Europ. J. Operat. Res.*, 98(1), 19–36.
- Klugiewicz J. 1992. Polderyzacja terenów depresyjnych. TWWP, Bydgoszcz, ss. 458.
- Minatour, Y., Bonakdari, H., Zarghami, M., Bakhshi, M.A. (2014). Water supply management using an extended group fuzzy decision-making method: a case study in north-eastern Iran. *Appl. Water Sci.*, 1–14.
- Online Etymology Dictionary [OED] (2014). Douglas Harper, Historian. <http://dictionary.reference.com> (dostęp: 23.09).
- Pedrycz, W., Ekel, P., Parreiras, R. (2011). Fuzzy Multicriteria Decision-making: Models, Methods and Applications. John Wiley & Sons, Chichester.
- Piegat, A., Sałabun, W. (2012). Nonlinearity of human multicriteria in decision-making. *J. Theor. Appl. Comput. Sci.*, 6(3), 36–49.
- Prochal, P. (1987). Podstawy melioracji rolnych. T. II. PWRiL, Warszawa, ss. 418.
- Przybyła, Cz., Kozdrój, P., Bykowski, J., Napierała, M., Mrozik, K. (2014). Techniczno-ekonomiczna analiza efektywności energetycznej pompowni melioracyjnych. *Inż. Ekol.*, 39, 114–122.
- Rusetski, A.P. (2009). Floods and High Waters, Using Polders for Protecting Agricultural Lands from the Floods. *Agric. Land Improv.: Amelioration and Reclamation*, 2.
- Sałabun, W. (2012). The use of Fuzzy logic to evaluate the nonlinearity of human multi-criteria used in decision making. *Przeegl. Elektrotech.*, 88, 10b, 235–238.
- Sałabun, W. (2014a). Application of the Fuzzy Multi-criteria Decision-Making Method to Identify Nonlinear Decision Models. *Intern. J. Comput. Appl.*, 89(15), 1–6.
- Sałabun, W. (2014b). Reduction in the Number of Comparisons Required to Create Matrix of Expert Judgment in the Comet Method. *Manag. Product. Engin. Rev.*, 5(3), 62–69.
- Sałabun, W. (2014c). The Characteristic Objects Method: A New Distance-based Approach to Multicriteria Decision-making Problems. *J. Multi-Crit. Decis. Analys.*, 22(1–2), 37–50.
- Schröder, G. (1972). Melioracje wodne w rolnictwie. Wyd. 4. Arkady, Warszawa.
- Srdjevic, B. (2007). Linking analytic hierarchy process and social choice methods to support group decision-making in water management. *Decis. Support Syst.*, 42(4), 2261–2273.
- Srdjevic, B., Medeiros, Y.D.P. (2008). Fuzzy AHP assessment of water management plans. *Water Resour. Manag.*, 22(7), 877–894.
- Szafranski, Cz., Bykowski, J., Fiedler, M. (1998). Rola melioracji w zrównoważonym rozwoju obszarów wiejskich. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie*, 335(59), 47–55.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.

THE IDENTIFICATION OF MULTI-CRITERIA MODEL OF THE SIGNIFICANCE OF DRAINAGE PUMPING STATIONS IN POLAND

Summary. In the paper authors identify the multi-criteria model of the significance of drainage pumping stations in Poland. The identified model will allow to classification of drainage pumping stations in terms of their significance in water management of the country. The Characteristic Objects method COMET, which is one of the methods of multi-

criteria decision analysis (MCDA), was used to build the model. In many scientific articles, issues related to the water management are frequently resolved by using MCDA methods. However, majority of MCDA methods are exposed to the rank reversal paradox, which has a negative effect with respect to the reliability of the final result. In contrast to other MCDA methods, the COMET method identifies the complete model in the space of the problem and not only discrete values for selected objects. The COMET approach identifies the expert model taking to account local feedbacks by using fuzzy logic mechanisms. Three parameters were used to build the expert model for drainage pumping stations, such as drainage efficiency, total output of aggregates and surface drainage. The result is 27 fuzzy rules that define the exact model. Subsequently, this model is used to assess the significance of 270 selected drainage pumping stations in the country. Then, the empirical method to verify the correctness of the results is also presented. On the basis of the results, the primary classification of drainage pumping stations is made in terms of their significance in water management of the country.

Key words: the classification of drainage pumping stations, multi-criteria decision-analysis, the theory of fuzzy set, the COMET method

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.09.2015

Do cytowań – For citation: Sałabun, W., Napierała, M., Bykowski, J. (2015). Identyfikacja wielokryterialnego modelu istotności pompowni melioracyjnych na terenie Polski. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 14(3), 147–163.