

ZASTOSOWANIE METODY AHP DO OCENY REPREZENTATYWNOŚCI STUDZIEN GŁĘBINOWYCH PIERWSZEGO POZIOMU WODONOŚNEGO

THE APPLICATION OF AHP FOR VALIDITY OF SHALLOW GROUNDWATER WELLS

MAREK KACHNIC¹

Abstrakt. W pracy wykorzystano metodę AHP w celu analizy reprezentatywności studzien w rejonie Unisławia, w których rozpoznano pierwszy poziom wodonośny. Do oceny reprezentatywności studzien przyjęto następujące kryteria: informacje o występowaniu lub braku warstwy wodonośnej, wydajność jednostkowa, rodzaj przeprowadzonej weryfikacji terenowej studzien i możliwość weryfikacji informacji o punkcie badawczym poprzez aktualny stan fizyczny studni. Wybrane kryteria nie zapewniają pełnej oceny wszystkich punktów opróbowania pierwszego poziomu wodonośnego (Ppw) pod kątem ich przydatności do wyznaczenia zasięgu Ppw. Wypracowanie metodyki oceny reprezentatywności i wiarygodności punktów rozpoznania hydrogeologicznego jest pierwszym etapem do opracowania rankingu informacji zamieszczonych na mapach hydrogeologicznych. Opracowany ranking punktów można odnieść do jednostki obszarowej, w której one występują, a następnie ocenić statystycznie, czy punkty te w wystarczającym stopniu spełniają wymogi, jakie zostaną ustalone dla badanej jednostki obszarowej. Procedury obliczeniowe realizowano w programie IDRISI.

Słowa kluczowe: pierwszy poziom wodonośny, reprezentatywność studzien, AHP, IDRISI.

Abstract. The AHP method was used for the simplified assessment of validity of wells from the Unisław area in Poland. Validity of wells is the degree of belief of wells which were used for evaluation of the area where shallow groundwater exists. To establish the degree of belief of wells, information about the top and bottom of the aquifer, technical conditions of wells and aquifer yield were used.

Key words: shallow groundwater, validity of wells, AHP, IDRISI.

WSTĘP

Metoda analizy hierarchii (AHP – *Analytical Hierarchy Process*) należy do grupy metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji (ang. *multicriteria decision analysis* lub *multicriteria decision making*). Metoda została wprowadzona przez Saaty'ego (1980, 1990) i doczekała się znacznej liczby opracowań naukowych (Malczewski, 2006) oraz szeregu zastosowań w praktyce. Zastosowanie metody AHP w hydrogeologii nie jest jak dotąd odnotowane w literaturze polskojęzycznej. Przykładem zastosowania z literatury zagranicznej jest praca wykorzystująca tę metodę do przyjęcia

wag i ustalenia rankingu dla kryteriów używanych w metodzie DRASTIC (Thirumalaivasan i in., 2003).

Celem metody AHP (w przypadku zastosowań kartograficznych²) jest znalezienie najlepszych obszarów z punktu widzenia ustalonego kryterium lub też określenie rankingu obszarów spełniających wymagane kryteria. W tym przypadku skupiamy się na jednym kryterium i wykonujemy mapę rozkładu przestrzennego lub punktowego parametru, który nas interesuje, po uwzględnieniu podatności obszaru na badane kryterium.

¹ Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Wydział Biologii i Nauk o Ziemi, ul. Gagarina 9, 87-100 Toruń; marek.kachnic@umk.pl

² Metoda AHP najczęściej jest wykorzystywana do opracowania rankingu wariantów. Ustalenie hierarchii wykonuje się z wielu różnych punktów widzenia (w różnych kategoriach), z uwzględnieniem priorytetów oceniającego, co pozwala na wybór wariantu najbardziej go satysfakcjonującego.

METODYKA BADAŃ

Algorytm metody AHP obejmuje cztery fazy: opracowanie hierarchicznej struktury procesu decyzyjnego, fazę oceny, tworzenie rankingu końcowego oraz weryfikację spójności macierzy hierarchii rozwiązań. Hierarchiczna struktura procesu decyzyjnego składa się (w minimalnym zakresie) z celu procesu (*goal*) i kryteriów oceny (*objectives*)³. Hierarchia powinna uwzględniać wszystkie kryteria, które mają znaczenie dla postawionego „celu”. Tworzenie hierarchii jest kluczowym etapem i wymaga rozległej wiedzy z zakresu analizowanej problematyki.

Dla przykładowego zadania oceny reprezentatywności studzien głębinowych do wyznaczenia pierwszego poziomu wodonośnego⁴ (Ppw) kryteriami, które uwzględniono w **hierarchii**, są następujące parametry:

– kryterium A – informacje póljakościowe z bazy danych Banku HYDRO o ogólnych parametrach warstwy Ppw⁵ (strop, spąg, zawodnienie) lub braku występowania warstwy wodonośnej uzyskane w wyniku prac wiertniczych studzien ujmujących poziomy wodonośne poniżej Ppw;

– kryterium B – dane ilościowe o warstwie Ppw zapisane w bazach danych (Bank HYDRO, mapy PPW, MhP) i uzyskane w wyniku badań hydrogeologicznych po zafiltrowaniu warstwy Ppw (np. wydajność jednostkowa);

– kryterium C – rodzaj przeprowadzonej weryfikacji w ramach prac PSH podczas korekty bazy danych Banku HYDRO (weryfikacja typu A, B, C, brak);

– kryterium D – możliwość weryfikacji informacji o punkcie badawczym poprzez aktualny stan otworu (otwór istniejący, zlikwidowany, po rekonstrukcji, niezlokalizowany).

W **fazie oceny** preferencje decydenta określone są za pomocą charakterystycznej dla metody AHP postaci względnych ocen ważności kryteriów.

Kryteria porównuje się parami, nadając im odpowiednią ocenę za pomocą skali ustalonej przez Saaty’ego (tab. 1). Ustalenie przewagi jednego kryterium nad drugim jest subiektywne.

W wyniku porównań uzyskuje się symetryczną kwadratową macierz hierarchii rozwiązań (*pairwise comparison matrix*) – fig. 1. Macierz tę cechuje spójność parami, tzn.:

Tabela 1

Skala Saaty’ego
Saaty scale

Cecha nieważna				Cecha ważna				
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9

1/9 – pierwsze kryterium jest ekstremalnie mniej ważne od drugiego; 1/7 – pierwsze kryterium jest bardzo silnie mniej ważne od drugiego; 1/5 – pierwsze kryterium jest silnie mniej ważne od drugiego; 1/3 – pierwsze kryterium jest umiarkowanie mniej ważne od drugiego; 1 – oba kryteria są jednakowo ważne; 3 – pierwsze kryterium jest umiarkowanie ważniejsze od drugiego; 5 – pierwsze kryterium jest silnie ważniejsze od drugiego; 7 – pierwsze kryterium jest bardzo silnie ważniejsze od drugiego; 9 – pierwsze kryterium jest ekstremalnie ważniejsze od drugiego.

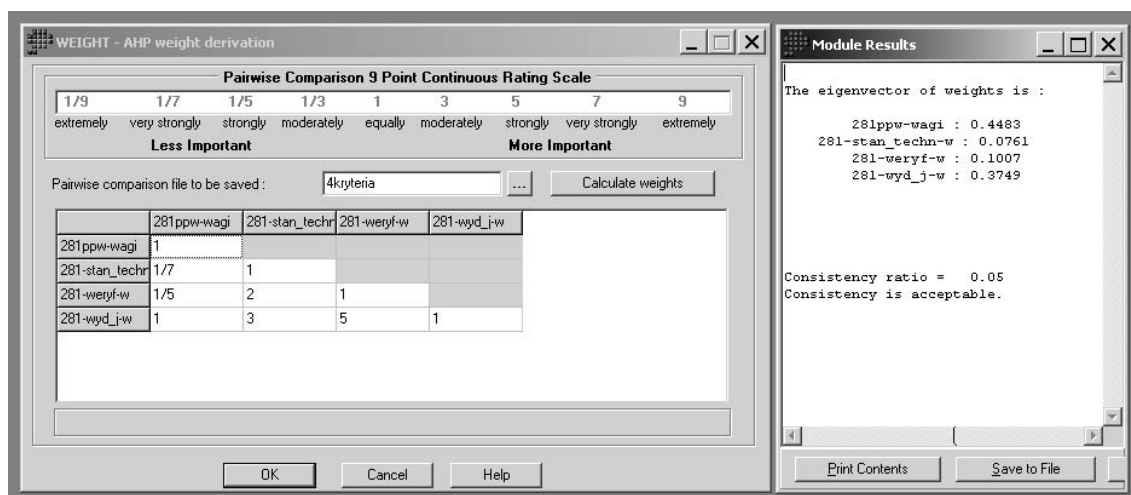


Fig. 1. Hierarchia rozwiązań dla kryteriów A–D (lewa część rysunku) wraz z obliczonym ogólnym indeksem niespójności (po prawej). Okno dialogowe programu IDRISI – moduł WIGHT

Pairwise comparison matrix for objectives A–D (on the left) with calculated consistency ratio (on the right).
Screen-shot from IDRISI program

³ W strukturze mogą (ale nie muszą) również występować podkryteria.

⁴ Za pierwszy poziom wodonośny (Ppw) przyjęto występowanie w podłożu osadów okrucowych (zawodnionych i niezawodnionych) o miąższości powyżej 2 m, zalegające do głębokości 15 m, które mogą być kolektorem wody o zwierciadle swobodnym (lub pod niewielkim naporem).

⁵ Dla odróżnienia od kryteriów PPW wg ustaleń Państwowego Instytutu Geologicznego w artykule do oznaczenia pierwszego poziomu wodonośnego wg kryteriów autora stosowane jest oznaczenie Ppw.

– dany element macierzy jest równoważny względem samego siebie: $a_{i,i} = 1$;

– wartość oceny elementu b względem elementu a jest odwrotnością oceny a względem b .

Przykładowo, w procesie decyzyjnym oceny reprezentatywności otworów studziennych porównując cztery parametry (kryteria):

A) parametry pól jakościowe warstwy PPW uzyskane w wyniku prac wiertniczych (na [fig. 1](#), plik: 281-ppw_wagi),

B) stan techniczny studzien (281-stan_tech-w),

C) rodzaj przeprowadzonej weryfikacji w ramach prac PSH przy pracach nad danymi w Banku HYDRO (281-weryf-w),

D) wydajność jednostkowa na ostatnim stopniu próbnego pompowania uzyskana w wyniku badań hydrogeologicznych po zafiltrowaniu warstwy Ppw (281-wyd_j-w)

decydent może ustalić, że:

– kryterium B jest **istotnie mniej ważne** od kryterium A (w skali Saaty'ego jest to wartość 1/7),

– kryterium C jest **wyraźnie mniej korzystne** od kryterium A (1/5) i korzystniejsze od B (2),

– kryterium D jest **tak samo ważne** jak kryterium A (1), **nieznacznie korzystniejsze** od kryterium B (3) oraz **silnie korzystniejsze** od kryterium C (5).

Utworzoną macierz należy przeliczyć w celu obliczenia wag poszczególnych czynników. Wymaga to obliczenia tzw. wektora własnego macierzy (*eigenvector*). Można to wykonać za pomocą bezpłatnego oprogramowania (np. www.AHPproject.com) lub za pomocą programów komercyjnych (np. IDRISI lub ExpertChoice). Metoda wyznaczenia wektora własnego macierzy opisana jest w pracach Malczewskiego (1999) i Żaka (2005). Saaty uwzględnił w metodzie AHP skłonność człowieka do faworyzowania określonego kryterium oraz wprowadził zabezpieczenie przed wpisaniem wag w sposób losowy. Dlatego zaprojektowaną macierz należy zweryfikować na nielosowość wybranych współczynników wagowych, tzn. czy otrzymane wyniki nie naruszają zasady stałości preferencji – prawidłowego porównania kryteriów. W tym celu należy obliczyć ogólny indeks niespójności (tzw. *Consistency Ratio* – CR). Przy prawidłowo skonstruowanej macierzy indeks ten nie przekracza wartości 0,1.

Kolejna operacja to przygotowanie warstw tematycznych względem ustalonych kryteriów, które należy poddać standaryzacji do skali 0–255 (która najlepiej jest obrazowana w rastrowych systemach GIS).

PRZYKŁADOWE OBLICZENIA DLA OBSZARU ARKUSZA SMGP UNISŁAW

Obszar arkusza Unisław (nr 0281) ma rozpoznanie geologiczne i hydrogeologiczne na poziomie szczegółowym (Kozłowska, Kozłowski, 1996; Zambrzycka, 2002). W 2005 r. została wykonana Mapa pierwszego poziomu wodonośnego – PPW (Krawczyński, 2005). Przez wschodnią część arkusza przebiega granica między dwoma wyraźnymi jednostkami fizycznogeograficznymi: doliną Wisły i Wysoczyzną Chełmińską. Dla obszaru arkusza Unisław wyróżniono jednostkę PPW powiązaną z doliną Wisły (typ jednostki: dolina zalewowa i nadzalewowa) o powierzchni 97 km².

W obszarze badań wykonano około 80 otworów studziennych, zarejestrowanych w Banku HYDRO. Ponadto zostało wykonanych około 50 otworów badawczych bez opróbowania hydrogeologicznego. Były to otwory na potrzeby rozpoznania złóż węgla brunatnego (11 otworów o głęb. ok. 100 m), złóż ropy i gazu (dwa otwory o głęb. 2506 i 4790 m), 13 otworów o głębokości 40 m pod projektowany w latach 70. stopień wodny oraz 2 otwory kartograficzne.

W celu oceny jakości rozpoznania hydrogeologicznego pierwszego poziomu wodonośnego (Ppw) w obszarze arkusza wykonano ocenę reprezentatywności otworów studziennych pod kątem udokumentowania pierwszej warstwy wodonośnej. Do oceny reprezentatywności studzien wybrano kryteria A, B, C, D opisane wyżej. Ograniczono się do warunków wodonośnych pierwszego poziomu wodonośnego, które zalegają płytko (do 15 m) i w których występuje zwierciadło swobodne (lub pod niewielkim naporem).

Przygotowanie warstw informacyjnych

Warstwy informacyjne przygotowano na podstawie danych z Banku HYDRO, bazy MhP i map PPW. Obszar arkusza został zdyskretyzowany kwadratową siatką 100 m. W bazie studzien w przyjętym obszarze badań sprawdzono występowanie w profilu studzien płytkiej warstwy wodonośnej o zwierciadle swobodnym. Dla każdej studni weryfikowano, czy do głębokości 15 m występowała warstwa osadów okruchowych o miąższości minimum 2 m (nawet, gdy nie była ona zawodniona).

Wagi do kryterium A:

- dla studzien, w których zafiltrowano Ppw: 255 (maksymalna),
- dla studzien, w których nie zafiltrowano Ppw: 125,
- dla studzien, w których „warstwa” Ppw jest niezawodniona: 60,
- dla studzien, w których nie stwierdzono Ppw: 50,
- w przypadku braku profilu geologicznego do głębokości 15 m przyjęto wagę 1.

Wagi do kryterium B (studnie z obliczoną wydajnością jednostkową) były analogiczne do uzyskanej wydajności w m³/h. Przy braku danych przypisano studniom wartość „0”.

Wagi do kryterium C (studnie z weryfikacją PSH):

- dla studzien z weryfikacją C: 255,
- dla studzien z weryfikacją B: 125,
- dla studzien z weryfikacją A: 50,
- dla studzien z zapisem: „brak danych” lub „brak”: 0.

Wagi do kryterium D (możliwość weryfikacji informacji o punkcie badawczym z uwagi na aktualny stan otworu):

- otwór istniejący (awaryjny, czynny, nieczynny): 250,
- otwór zlikwidowany: 25,
- otwór niezlokalizowany: 5.

Rastrowe warstwy informacyjne w formie map zostały przygotowane w programie IDRISI po dołączeniu informacji z bazy danych, w której zawarte były współrzędne studzien i przypisane im wagi.

Ostatnim etapem procedury była agregacja danych w systemie GIS, która została zrealizowana metodą ważonej kombinacji liniowej (WLC – *Weighted Linear Combination*). Metoda ta polega na pomnożeniu przygotowanych warstw (rastrow) przez odpowiadające im wagi, a następnie zsumowaniu wyników. W efekcie przekształceń otrzymujemy wyników mapę rastrową, w której piksele reprezentujące studnie otrzymują wartość w umownej skali od 0 do 255. Ponieważ uzyskana mapa była słabo czytelna w wersji papierowej (zbyt mała wielkość pikseli), dlatego końcowy wynik przedstawiono w formie histogramu (fig. 2). Na histogramie zaznaczono dwa zbiory studzien, odpowiadające lokalizacji studzien na obszarze wysoczyzny morenowej lub na obszarze jednostki PPW (zasięg obszaru wysoczyzny przeniesiono z mapy PPW w skali 1:50 000). Wartości pikseli na osi rzędnej odpowiadają wyliczonym wartościom „oceny” studni pod kątem reprezentatywności do potwierdzenia (lub braku) „Ppw”. Na osi odciętych zaznaczono liczbę wystąpień piksela na mapie.

Wyniki obliczeń

Wyniki obliczeń zamieszczone na figurze 2 przedstawiają ranking studzien głębinowych występujących na obszarze arkusza Unisław. Zdecydowana liczba studzien ($n = 78$) dokumentuje brak pierwszego poziomu wodonośnego. Ich pozycja w rankingu jest oczywiście słabsza od studzien, w których stwierdzono pierwszy poziom wodonośny (Ppw). Wśród tych studzien tylko jedna ma ocenę bliską wartości 100, czyli najprawdopodobniej jest to studnia, w której stwierdzono pierwszy poziom wodonośny, ale jest zlokalizowana poza wyznaczoną jednostką PPW. Jest to studnia ujęcia w Topolnie (37.1973-60.5⁶), która ujmuje głębszy poziom wodonośny. W profilu geologicznym tej studni stwierdzono występowanie Ppw. Gdyby takich otworów było więcej, byłaby to wskazówka co do możliwej błędnej interpretacji hydrogeologicznej.

Siedem studzien dokumentuje Ppw z „zadowalającą” jakością opróbowania (czyli z „oceną” powyżej 100 punktów⁷). Jedna studnia uzyskała ocenę słabszą – 98 punktów. Jest to studnia w Grabowie (31.1971-43), która została zlokalizowana na tarasie nadzalewowym Wisły (jednostka PPW), ale pobiera wodę z głębszych warstw neogenu. Na słabą pozycję w rankingu miał tu wpływ brak opróbowania hydrogeologicznego pierwszej warstwy wodonośnej oraz brak wiarygodnej lokalizacji.

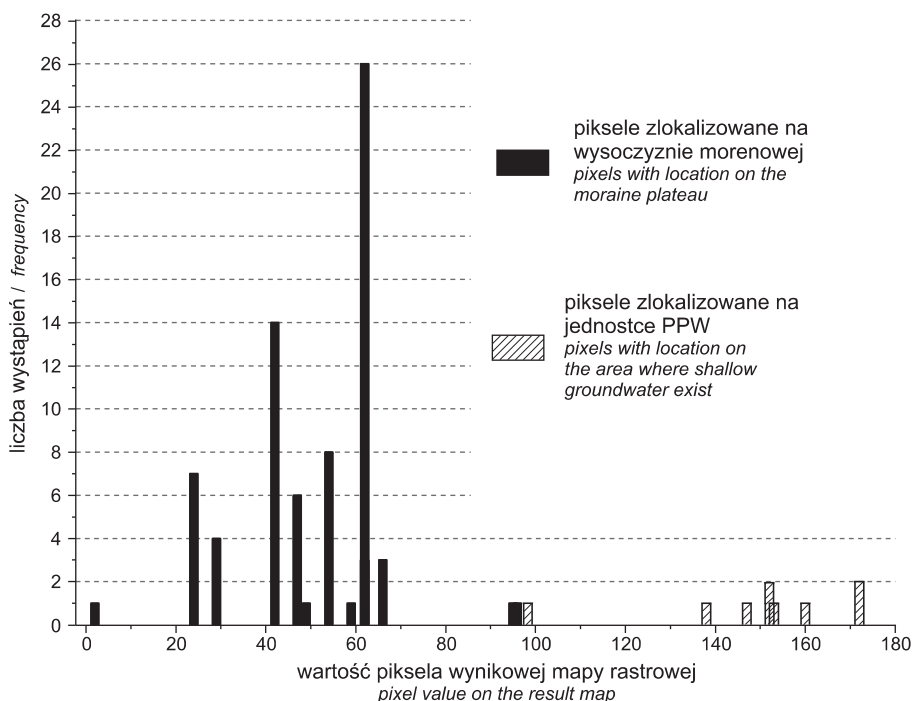


Fig. 2. Histogram wartości pikseli na mapie wynikowej. Wartość piksela odpowiada uzyskanemu rankingowi studni pod kątem wiarygodności

Histogram of pixel value on the result map. Pixel value represent rank of well due to their reliability

⁶ Zapis wybranych informacji o otworze wg zmodyfikowanej propozycji Kachnic (2005), gdzie: 37 – numer w RBDH; 1973 – rok wykonania; 60,5 – głębokość całkowita studni w [m].

⁷ Ustalenie właściwych kryteriów „zadowalającej” jakości opróbowania badanego poziomu wodonośnego wymaga znacznie szerszych badań, najlepiej przetestowanych na dobrze rozpoznanym obszarze.

PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki obliczeń uzyskano po zastosowaniu uproszczonej procedury analizy reprezentatywności studzien, przygotowanej na potrzeby zapoznania z metodą AHP. Wybrane do artykułu kryteria nie zapewniają pełnej oceny wszystkich punktów opróbowania Ppw pod kątem ich przydatności do wyznaczenia zasięgu Ppw. Z uwagi na szczupłość miejsca, spośród obiektów o charakterze punktowym nie uwzględniono hierarchii rozwiązań dla: otworów badawczych, inżynierskich, sond wykonanych na potrzeby SMGP oraz studzien kopanych i źródeł. Wśród kryteriów obszarowych (poligonowych) brakuje uwzględnienia jednostek geomorfologicznych: dolin rzecznych, wysoczyzn, zasięgów jezior oraz przebiegu rzek.

Wypracowanie metodyki oceny reprezentatywności i wiarygodności punktów rozpoznania hydrogeologicznego jest

pierwszym etapem do opracowania rankingu informacji zamieszczonych na mapach hydrogeologicznych (np. pierwszego poziomu wodonośnego). Opracowany ranking punktów można odnieść do jednostki obszarowej, w której one występują, a następnie ocenić statystycznie, czy punkty te w wystarczającym stopniu spełniają wymogi, jakie zostaną ustalone dla badanej jednostki obszarowej.

Przedstawioną metodykę należy traktować jako głos w dyskusji nad sposobem opisu „jakości” informacji zawartych w bazach danych i na mapach hydrogeologicznych.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2009 jako projekt badawczy nr N525 008 32/1075.

LITERATURA

- KACHNIC M., 2005 – Propozycja uzupełniającego kodowania studzien i otworów obserwacyjnych. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 12: 793–795. Wyd. UMK, Toruń. <http://www.home.umk.pl/~kach/art2005b/Marek-Kachnic-XIIWPHg-komunikat.pdf>
- KOZŁOWSKA M., KOZŁOWSKI I., 1996 – Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Unisław. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KRAWCZYŃSKI J., 2005 – Baza danych GIS Mapy hydrogeologicznej Polski 1:50 000 – pierwszy poziom wodonośny występowanie i hydrodynamika. CAG, Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MALCZEWSKI J., 1999 – GIS and multicriteria decision analysis. J. Wiley & Sons, New York.
- MALCZEWSKI J., 2006 – GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science.*, **20**, 7: 703–726.
- SAATY T.L., 1980 – The analytic hierarchy process: planning priority setting. Resources allocation. McGraw-Hill, New York.
- SAATY T.L., 1990 – How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, **48**, 1: 9–26.
- THIRUMALAIIVASAN D., KARMEGAM M., VENUGOPAL K., 2003 – AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. *Environmental Modelling & Software*, **18**: 645–656.
- ŻAK J., 2005 – Wielokryterialne wspomaganie decyzji w transporcie drogowym. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- ZAMBRZYCKA M., 2002 – Mapa hydrogeologiczna Polski wraz z objaśnieniami 1:50 000, ark. Unisław. Wersja elektroniczna. Państw. Inst. Geol., Warszawa, <http://psh.gov.pl>

SUMMARY

In this study the AHP method was used to establish validity of wells in the postglacial area of northern Poland. To evaluate the quality of wells (understood as reliability and usability of wells) the following criteria were considered: a) information about the extent of shallow aquifer; b) technical conditions of wells; c) present state of data verification in the database (HYDRO Bank); and d) specific yield of the aquifer. The IDRISI program was used to prepare the pairwise comparison matrix (see Fig. 1) and raster maps. Four raster layers were aggregated using the Multi-criteria evaluation

(MCE) with the Weighted Linear Combination (WLC) procedure. Due to unreadable result map on the paper, the histogram of pixel value was contained (Fig. 2). The main set of pixels represents wells located in the moraine plateau where the shallow groundwater is absent. Only few pixels refer to wells situated in the Vistula River valley, although they are good markers for the shallow groundwater (value pixel >100). An important goal of this study is to provide help to try to illustrate data quality in hydrogeological maps.