

Andrzej Wałęga, Stanisław Krzanowski, Krzysztof Chmielowski

**WYKORZYSTANIE METODY ANALIZY SKUPIEŃ
DO IDENTYFIKACJI JEDNORODNYCH ZLEWNI
POD WZGLĘDEM INDEKSÓW POWODZIOWOŚCI
I WYBRANYCH CHARAKTERYSTYK
FIZJOGRAFICZNYCH**

***METHOD OF CLUSTER ANALYSIS IN HOMOGENOUS
CATCHMENTS IDENTIFICATION CONSIDERING FLOOD
INDEXES AND SELECTED PHYSIOGRAPHIC
CHARACTERISTICS***

Streszczenie

Jednym z celów działalności poznawczej jest charakterystyka, grupowanie oraz klasyfikacja zjawisk, przedmiotów i zachowań. Podział jakiegoś zbioru przedmiotów, obiektów lub urządzeń na podzbiory oddaje szczególne usługi w pracach normalizacyjnych. W wyniku obiektywnej analizy struktury badanego zbioru jest możliwe m.in. ustalenie wzajemnych powiązań między elementami tworzącymi dany zbiór. Jest to szczególnie istotne w hydrologii, a zwłaszcza w modelowaniu procesów zachodzących w zlewni czy dorzeczu. Relacje pomiędzy charakterystykami zlewni i parametrami modeli hydrologicznych są niezwykle ważne przy estymowaniu parametrów rozkładów statystycznych, oceny zmian w zlewniach i prognozowaniu zjawisk hydrologicznych w zlewniach niekontrolowanych. Znajomość przestrzennego rozkładu charakterystyk hydrologicznych jest coraz częściej wykorzystywana w gospodarce wodnej, a zwłaszcza podczas sporządzaniu planów gospodarowania wodami w obszarze zlewni czy dorzeczy. W celu oszacowania interesujących charakterystyk hydrologicznych w zlewniach niekontrolowanych często stosuje się metodę częstości regionalnych, dzięki której można wydzielić obszary o jednorodnym przebiegu analizowanego zjawiska. Do wydzielenia jednorodnych obszarów powszechnie wykorzystuje się również metody regresji dwu lub wielu zmiennych, analizy skupień, krigingu czy sztucznych sieci neuronowych. Metody skupiania bazują na wewnętrznym kryterium podzia-

łu, jakim jest matematycznie zdefiniowane podobieństwo między obiektami. Odpowiednie procedury skupiania tworzą grupy obiektów. W praktyce odległości między skupieniami określa się następującymi metodami: pojedynczego wiązania, pełnego wiązania, średnich połączeń, średnich połączeń ważonych, środków ciężkości, ważonych środków ciężkości i Warda.

Celem pracy jest analiza możliwości zastosowania metody analizy skupień do wydzielenia jednorodnych obszarów pod względem indeksu powodziowości i wybranych charakterystyk fizjograficznych zlewni w dorzeczu Wisły.

Materiał wyjściowy stanowiły dane hydrologiczne i wybrane charakterystyki fizjograficzne zlewni rzek w dorzeczu Wisły. W pracy wykorzystano dane z 33 zlewni rzek będących bezpośrednimi dopływami Wisły. Z charakterystyk fizjograficznych do analizy przyjęto: powierzchnię zlewni A i średnią jej wysokość na poziomie morza H_{sr} , stoczystość zlewni I , długość cieków głównego L i współczynnik kształtu zlewni R_f .

Analizy wykazały, że najlepsze rezultaty grupowania uzyskano stosując metodę Warda, gdzie wydzielono sześć jednorodnych zlewni z uwagi na indeks powodziowości, powierzchnię, średnią wysokość n.p.m. i stoczystość, długość cieków głównego oraz współczynnik kształtu. W każdym z wyróżnionych jednorodnych obszarów w odmiennym stopniu analizowane czynniki fizjograficzne wpływają na kształtowanie się indeksu powodziowości.

Słowa kluczowe: indeks powodziowości, zlewnia, grupowanie obiektów, analiza skupień

Summary

One of educating activities aims is characteristic, grouping and classification of phenomena, objects and behaviors. Division of some group of objects, subjects or devices into subgroups plays very important role in standardization operations. A result of objective analysis of the tested set structure is the possibility to determine mutual relations between elements which create the set. This is particularly important in hydrology, especially in modeling of processes that occur in catchments or drainage basins. Relations between catchments characteristics and hydrologic models' parameters are extremely important in estimation of parameters of statistic distributions, evaluation of changes in catchments and prognosis of hydrological phenomena in uncontrolled catchments. The knowledge of the spatial distribution of hydrological characteristics is more and more often used in water management, especially during water management plans creation in the area of catchments or drainage basins. In order to estimate interesting hydrological characteristics in uncontrolled catchments the method of regional frequency analysis is applied, which allows to allocate areas of homogenous type of the analyzed phenomenon. To allocate the homogenous areas methods of two or more variables regression, cluster analysis, kriging or artificial neural networks are applied, too. Grouping methods base on the internal division criterion, which is mathematic definition of similarity between the objects. The appropriate procedures of grouping create sets of objects. In practice distances between the sets are defined with the following methods: single linkage, full linkage, pair group average, weighted pair group average, center of gravity, weighted center of gravity and Ward method. The aim of the work is the analysis of possibilities of cluster analysis

method appliance to allocate homogenous areas regarding the flood index and selected physiographic characteristics of catchments in Vistula River drainage basin. The initial material was the hydrological data and chosen physiographic characteristics of rivers in Vistula River drainage basin. Data from 33 catchments of rivers which are direct Vistula inflows was used. The analysis took the following physiographic characteristics: the area of catchment (A) and its average height over the sea level (H_{av}), catchments inclination (I), length of the main stream (L) and the catchments' shape factor (R_f). The analyses have shown that the best grouping results were gained using the Ward method, in which six homogenous catchments were allocated regarding the flood index, area, average height over the sea level and inclination, main stream length and the shape factor. In each of the set homogenous areas analyzed physiographic factors influence the flood index in the different way and to the different degree.

Key words: *flood index, catchment, objects' subsets, cluster analysis*

WPROWADZENIE

Jednym z trudniejszych zadań, które praktyka stawia hydrologii inżynierskiej jest określenie wielkości i częstości występowania ekstremalnych zjawisk takich jak: powódzie, ulewne czy nawalne opady deszczu oraz susze. Z uwagi na to, że ekstremalne zjawiska hydrometeorologiczne występują stosunkowo rzadko, charakteryzujące je ciągi pomiarowe (przepływy, natężenia deszczu) są krótkie i stąd określenie ich częstości jest trudne. W takich przypadkach do dokładnego oszacowania poszukiwanych charakterystyk zjawisk hydrometeorologicznych stosuje się analizę częstości regionalnej, która pozwala na wydzielenie jednorodnych obszarów pod względem kształtowania się opisywanego zjawiska [Lin, Chen 2006]. Götzinger i Bárdossy [2007], za Vogelem podają, że do wydzielenia jednorodnych obszarów powszechnie wykorzystuje się metody regresji dwu lub wielu zmiennych, analizy skupień, krigingu czy sztucznych sieci neuronowych. W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie zwłaszcza metodami pozwalającymi na grupowanie obiektów o podobnych charakterystykach. Metody te mogą być wykorzystywane do wykrywania podobieństwa między zlewniami i wyboru zlewni analoga [Brzeziński 1995]. A więc stanowią one alternatywę dla tradycyjnie stosowanych metod doboru zlewni analoga opisywanych w pracach między innymi Byczkowskiego [1976, 1990] oraz nowych propozycji w tym temacie, np. bazujących na teorii zbiorów rozmytych [Tyszewski i in. 1993; Tyszewski, Byczkowski 1998]. W praktyce metody grupowania obiektów (analizy skupień) były stosowane przez Laaha i Blöschla [2006] do wydzielenia jednorodnych zlewni na obszarze Austrii pod względem czynników fizjograficznych i meteorologicznych kształtujących przepływy niskie o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 95\%$. Burn [1989] zastosował jedną z odmian technik grupowania obiektów (metodę k-średnich) do wydzielenia jednorodnych regionów pod względem częstości występowania powodzi.

Guttman [1993] i Guttman i inni [1993] zastosowali metodę analizy skupień (metodę Warda i L-momentów) w analizie regionów opadowych. Lin i Chen [2006] wykorzystali sztuczne sieci neuronowe (sieci Kohonena) do regionalizacji stacji opadowych na Tajwanie w postaci tak zwanych samoorganizujących map. Oprócz zastosowania w hydrologii i meteorologii metody grupowań znalazły także zastosowanie do charakterystyki obiektów drenarskich na terenie Wielkopolski [Bykowski, Miler 1997] oraz poszukiwania podobieństw pomiędzy ekosystemami leśnymi w zakresie ich zdolności retencyjnych [Grajewski 2006]. Metody analizy skupień mogą być także wykorzystywane w analizie wpływu katastrof naturalnych na powstawanie konfliktów o wodę [Kowalczak 2007].

Celem pracy jest analiza możliwości zastosowania metody analizy skupień do wydzielenia jednorodnych obszarów pod względem indeksu powodziowości i wybranych charakterystyk fizjograficznych zlewni w dorzeczu Wisły. Dodatkowym celem było porównanie różnych metod obliczania podobieństwa między obiektami i wskazania najlepszej z nich.

MATERIAŁ I METODY

Materiał wyjściowy stanowiły dane hydrologiczne i wybrane charakterystyki fizjograficzne zlewni rzek w dorzeczu Wisły. W pracy wykorzystano dane z 33 zlewni rzek będących bezpośrednimi dopływami Wisły. Jako kryterium wyboru zlewni przyjęto minimum 10-letni ciąg obserwacji maksymalnych rocznych przepływów. Zdecydowano przeprowadzić analizę powodziowości tylko w przekrojach ujściowych do Wisły. Zostało to podyktowane chęcią przedstawienia procesów wpływających na powodziowość rzek w odniesieniu do całej zlewni. Za miarę powodziowości przyjęto tzw. indeks powodziowości K , który bazuje na natężeniu przepływu i powierzchni zlewni, według zależności [Bartnik, Jokiel 2007]:

$$K = 10 \times \left(1 - \frac{\text{Log}Q_{\max} - 6}{\text{Log}A - 8} \right) \quad (1)$$

gdzie:

- K – indeks powodziowości,
- Q_{\max} – przepływ maksymalny, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- A – powierzchnia zlewni, km^2

Indeks K jest wielkością niemianowaną, pozwalającą porównać rozmiary kulminacji wezbrań w zlewniach o różnej wielkości. Im wyższą wartość przyjmuje indeks K , tym większa jest podatność zlewni danej rzeki na występowanie powodzi. We wzorze (1) jako przepływ maksymalny przyjmowano jego największą wartość z rozpatrywanego wielolecia. Z charakterystyk fizjograficznych przyjęto: powierzchnię zlewni A i średnią jej wysokość na poziomie morza H_{sr} .

stoczystość zlewni I , długość cieków głównego L i współczynnik kształtu zlewni R_f . Między wielkością powierzchni zlewni a wartościami przepływów istnieje silna zależność kształtująca się różnie dla poszczególnych rzek czy dorzeczy, zgodnie z ich różnymi warunkami terenowymi. Stoczystość zlewni oraz średnia jej wysokość także odgrywają istotną rolę w kształtowaniu się przepływów, bowiem kształt hydrogramów wezbrań będzie różny w zlewniach np. górskich - charakteryzujących się znacznymi spadkami, niż w nizinnych (niewielka średnia wysokość zlewni, łagodne spadki). W analizie jako zmienną niezależną przyjęto także współczynnik kształtu zlewni. Jak podaje Chow, kształt zlewni może odgrywać dużą rolę w przebiegu wezbrań. I tak, w przypadku długich, wąskich zlewni z dużym wskaźnikiem bifurkacji mogą występować łagodne hydrogramy wezbrań, natomiast w zlewniach o kształcie zaokrąglonym i niskim wskaźniku bifurkacji fale wezbraniowe osiągają gwałtowne kulminacje. Analizą nie objęto wskaźnika opadowego P w rozpatrywanych zlewniach z uwagi na brak jednoznacznego związku pomiędzy tym czynnikiem a przepływem maksymalnym w profilu zamykającym zlewnię oraz zmienną genezą wyselekcjonowanych kulminacji przepływów (roztopowe i opadowe). Dane odnośnie przepływów maksymalnych pochodziły z Roczników Hydrologicznych z okresu minimum 10-cio, a maksimum 33-lecia. Charakterystyki fizjograficzne analizowanych zlewni ustalono na podstawie map topograficznych, a także z pracy Stachy'ego [1966]. Dane do analizy zestawiono w tabeli 1. Grupowanie obiektów można zaliczyć do metod analiz wielowymiarowych. Istnieją dwa zasadnicze typy grupowania: metody klasyfikacji i skupiania. W przypadku klasyfikacji gdzie dysponuje się określoną liczbą grup obiektów, zadanie polega na przydzieleniu określonych obiektów do odpowiadających im grup. Metody skupiania bazują na wewnętrznym kryterium podziału, jakim jest matematycznie zdefiniowane podobieństwo między obiektami. Odpowiednie procedury skupiania tworzą grupy obiektów [Marek 1989]. W artykule odległości między skupieniami określono następującymi metodami: pojedynczego wiązania, pełnego wiązania, średnich połączeń, średnich połączeń ważonych, środków ciężkości, ważonych środków ciężkości i Warda. Zdecydowano się na wybór wielu metod celem porównania uzyskanych wyników i wyboru najlepszej z nich. Metoda pojedynczego wiązania odległości między dwoma skupieniami jest określana jako odległość między dwoma najbliższymi obiektami należącymi do różnych skupień. A więc jest to najmniejsza odległość spośród wszystkich odległości pomiędzy obiektami należącymi do poszczególnych skupień. Metoda pełnego wiązania jest przeciwieństwem poprzednio omówionej metody. Odległość między skupieniami jest równa największej odległości między dwoma dowolnymi obiektami należącymi do różnych skupień. Z kolei w metodzie średnich połączeń odległość między dwoma skupieniami oblicza się za pomocą średniej arytmetycznej wyznaczonej ze wszystkich odległości obiektów należących do dwóch różnych skupień. Modyfikacja tej metody oparta jest na uwzględnieniu

w obliczeniach wielkości poszczególnych skupień (liczby zawartych w nich obiektów) jako wag. Kolejne dwie metody oparte są na odległościach między środkami ciężkości skupień, przy czym modyfikacja polega na określeniu wag, czyli liczby obiektów zawartych w skupieniu.

Tabela 1. Zestawienie danych wyjściowych do analizy
Table 1. Comparison of analysis' initial data

Lp.	Rzeka River	Profil Cross-section	Kod zlewni Code of catchment	Okres obserwacji Q_{\max} Period of Q_{\max} observation	A km ²	Q_{\max} m ³ ·s ⁻¹	L km	R_f	H_{sr} m n.p.m.	I ‰
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Łownica	Czechowice-Dziedzice	C_1	1956–1983	194	164	25	0,310	421	13,2
2	Biała	Czechowice-Bestwina	C_2	1973–1983	118	96	29,6	0,135	330	60,7
3	Pszczynka	Międzyrzecze	C_3	1971–1983	285	28,5	39,7	0,181	262	2,2
4	Gostynia	Bojszowy	C_4	1974–1983	329	56,2	28,1	0,417	255	3,9
5	Przemsza	Jeleń	C_5	1961–1983	1995	68,2	74,6	0,358	321	4,3
6	Soła	Oświęcim	C_6	1951–1983	1385	1300	85,9	0,188	552	25,4
7	Skawa	Zator	C_7	1971–1983	1154	610	91,6	0,138	484	30,1
8	Prądnik	Olsza	C_8	1973–1983	193	7,22	31,2	0,198	312	15,7
9	Dłubnia	Zesławice	C_9	1951–1983	264	49,5	42,4	0,147	360	12,2
10	Raba	Proszówki	C_10	1951–1983	1470	1390	110,2	0,121	439	20,7
11	Szreniawa	Biskupice	C_11	1961–1983	682	80	71	0,135	280	2,8
12	Uszwica	Borzęcin	C_12	1956–1983	265	293	44,9	0,131	350	26,7
13	Dunajec	Żabno	C_13	1956–1983	6735	3500	208,5	0,155	606	21,4
14	Nida	Wiślica	C_14	1973–1983	3630	159	128	0,222	290	4
15	Breń	Wampierzów	C_15	1956–1983	661	261	44,4	0,335	198	2,8
16	Czarna	Połaniec	C_16	1951–1983	1354	238	56,2	0,429	233	7,6
17	Wisłoka	Mielec	C_17	1951–1983	3915	1190	144,5	0,187	338	7,8
18	Koprzywianka	Koprzywica	C_18	1951–1983	498	113	54,6	0,167	247	12,7
19	Łęg	Kępie Zaleszczańskie	C_19	1951–1983	822	264	71,6	0,160	208	2,8
20	San	Radomyśl	C_20	1951–1983	16834	2480	423,8	0,094	305	6,5
21	Opatówka	Dwikozy	C_21	1951–1983	256	108	47,1	0,115	242	13
22	Kamienna	Czekarzewice	C_22	1971–1983	1878	105	123,7	0,123	243	6,7
23	Wieprz	Kośmin	C_23	1951–1983	10231	591	285,3	0,126	194	1,8
24	Wilga	Wilga	C_24	1951–1983	569	67,8	64,3	0,138	156	3,2
25	Pilica	Białobrzegi	C_25	1951–1983	8664	471	273,7	0,116	251,5	2,9
26	Świder	Wólka Mładzka	C_26	1961–1983	845	119	74,3	0,153	162,5	0,9

Lp.	Rzeka River	Profil Cross-section	Kod zlewni Code of catchment	Okres obserwacji Q_{\max} Period of Q_{\max} observation	A km ²	Q_{\max} m ³ s ⁻¹	L km	R_f	H_{sr} m n.p.m.	I %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
27	Narew	Dębe	C 27	1971–1983	69642	3450	464	0,323	137,5	0,28
28	Bzura	Sochaczew	C 28	1951–1983	6281	480	138,5	0,327	130	1,9
29	Skrwa (prawa)	Parzeń	C 29	1951–1983	1534	191	93,1	0,177	125	0,9
30	Zgłowiączka	Przyruda	C 30	1951–1983	1462	64	72,6	0,277	89	1,6
31	Wda	Kraplewice	C 31	1971–1983	2022	44,6	176,7	0,065	159,8	4,1
32	Osa	Rogoźno	C 32	1951–1983	1135	39,3	78,1	0,186	86	2
33	Wierzyca	Brody Pomorskie	C 33	1951–1983	1544	48,8	142,2	0,076	140	2,03

Metoda Warda różni się od pozostałych, ponieważ odległości między skupieniami określane są w oparciu o analizę wariancji. Polega ona na minimalizacji sumy kwadratów odchyleń wewnątrz skupień. Na każdym etapie spośród wszystkich możliwych dołączenia par skupień wybiera się tę, która w rezultacie łączenia daje skupienie o minimalnym zróżnicowaniu [Stanisz 2007].

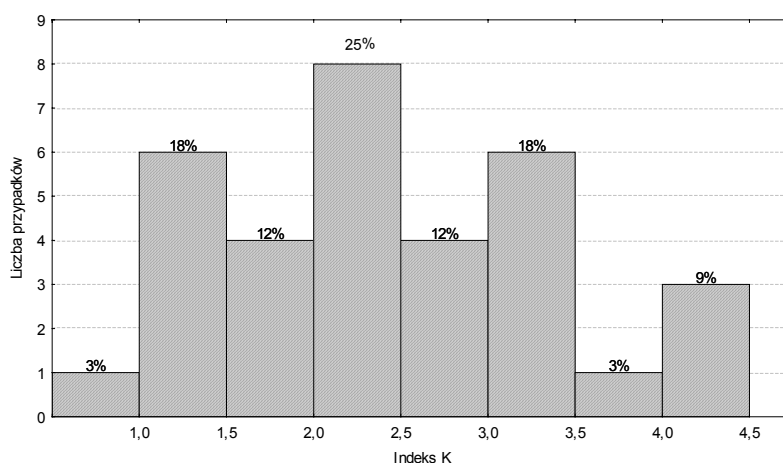
Przed przystąpieniem do analizy dokonano standaryzacji wszystkich zmiennych. Jako miarę odległości między skupieniami przyjęto odległość euklidesową. Wszystkie obliczenia wykonano w programie *STATISTICA 8.0*.

ANALIZA WYNIKÓW

Rezultaty obliczeń współczynnika K przedstawiono w postaci histogramu na rysunku 1. Najczęściej (24% przypadków) wartości indeksu zawierały się w przedziale od 2,0 do 2,5, przy czym aż w 85% przypadków zawierał się on w granicach 1,0–3,5. Zaledwie 9% analizowanych zlewni miało wartość indeksu K powyżej 4,0. Były to zlewnie zaliczane do karpaccich dopływów Górnej Wisły, a więc Soły, Raby i Dunajca. Z uwagi na znaczne spadki terenu ($I > 20,0$ ‰), dominację utworów fliszowych, niskich walorów hydrologicznych gleb (przewaga gleb o małej przepuszczalności) i dużej zmienności opadów atmosferycznych obserwuje się duże wahania przepływu, a co za tym idzie występowanie ekstremalnych zjawisk hydrologicznych, w tym powodzi [Tuszko 1984; Węclawik 1991; Adamczyk 1991; Niedźwiedz, Obrębska-Starkłowa 1991]. Stąd w tych zlewniach obserwuje się największe indeksy powodziowości. W tym miejscu należy jednak zwrócić uwagę, że wartości indeksu K, zwłaszcza

w zlewni Raby i Dunajca, mogą być nieco niższe od wyliczonych z uwagi na oddanie do eksploatacji zbiornika w Dobczycach na Rabie (1988 r.) i kaskady zbiorników Czorsztyń-Niedzica-Sromowce Wyżne na Dunajcu (1997 r.), które pełnią między innymi funkcje przeciwpowodziowe. Przeprowadzona analiza nie uwzględnia wpływu tych obiektów, gdyż dostępne dane kończą się na roku 1983.

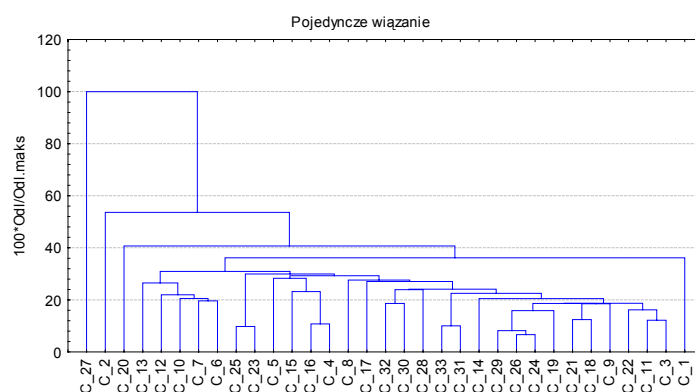
Przeciętna wartość indeksu K w dorzeczu Wisły wynosi 2,4, natomiast maksymalna – 4,11 (w zlewni Dunajca, profil – Żabno). Jak podaje literatura [Bartnik, Jokiel 2007], na rzekach Polski, których zlewnie są większe od 1000 km² wartości indeksu K są zróżnicowane, ale nie przekraczają wartości 4,5. Byczkowski [1996] podaje, że również w małych zlewniach ($A < 100 \text{ km}^2$) wartości indeksu K sporadycznie przekraczają wartość 4,5. Za wyjątkiem najwyższych wartości indeksu K, którym charakteryzują się rzeki górskie, w pozostałych przypadkach trudno jest posegregować zlewnie w jednorodne ugrupowania pod względem tego wskaźnika. W tym celu obok indeksu powodziowości K wykorzystano wybrane charakterystyki fizjograficzne zlewni, które odgrywają znaczącą rolę w formowaniu się ekstremalnych przepływów.



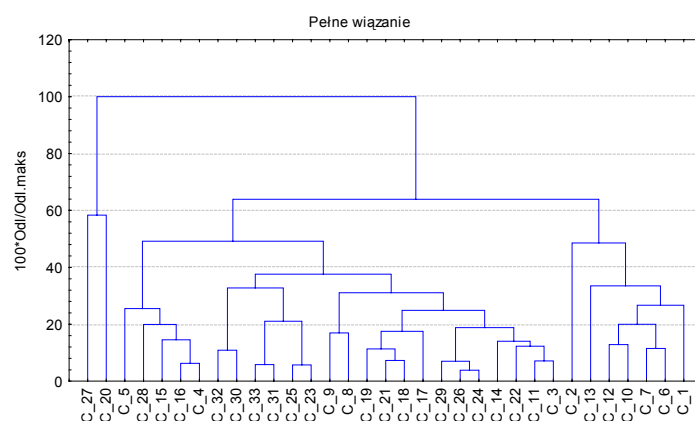
Rysunek 1. Histogram indeksu powodziowości K dla zlewni rzek w dorzeczu Wisły
Figure 1. Histogram of flood indexes (K) for river catchment in Vistula River drainage basin

Na rysunkach 2–8 przedstawiono rezultaty grupowania pod względem kształtowania się indeksu K i wybranych charakterystyk fizjograficznych zlewni. Aglomeracja metodą pojedynczego wiązania cechuje się tym, że obiekty formują skupienia, łącząc się w „sznur”, w rezultacie skupienia tworzą „łańcuchy”. Widoczne jest to na rysunku 2. Na około 40% maksymalnej odległości wiązania wyodrębniły się cztery ugrupowania, z których trzy pierwsze skupiają

po jednym obiekcie. Wyodrębnienie trzech skupień z pojedynczymi obiektami wynika z faktu, iż charakteryzują się one parametrami odbiegającymi od pozostałych. I tak w przypadku pierwszego skupienia (rzeka Narew – przekrój Dębe) decydował o tym najmniejszy spadek ($I = 0,28 \%$) spośród wszystkich obiektów, w drugim (rzeka Biała – przekrój Czechowice-Bestwina) największy spadek ($I = 60,7 \%$), natomiast trzecim (rzeka San – przekrój Radomyśl) bardzo mały współczynnik kształtu $R_f = 0,094$. Czwarte skupienie obejmuje pozostałe zlewnie, bez względu na ich cechy fizjograficzne. Duże zróżnicowanie rozpatrywanych parametrów analizowanych zlewniach nie pozwala stosować metody pojedynczego wiązania do wyraźnego wyodrębnienia grup obiektów.



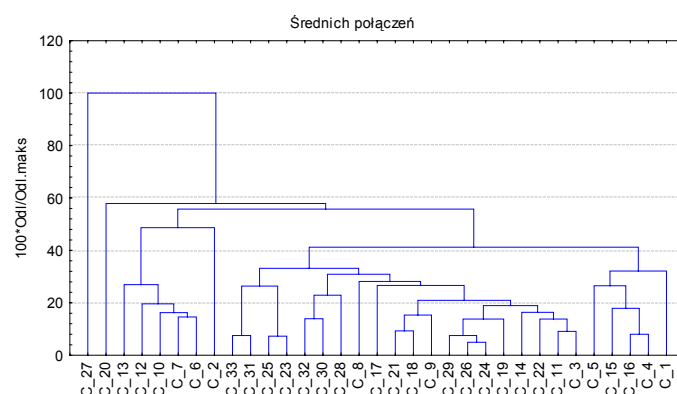
Rysunek 2. Aglomeracja metodą pojedynczego wiązania
Figure 2. Agglomeration of single banding method



Rysunek 3. Aglomeracja metodą pełnego wiązania
Figure 3. Agglomeration of complete banding method

Odmienne przebieg procesu skupiania widoczny jest w metodzie pełnego wiązania (rys. 3). W 60% maksymalnej odległości wiązania uformowały się trzy skupienia – pierwsze zawierające dwa obiekty (rzeka Narew i San), drugie 24 obiekty i trzecie – 7 obiektów. Pierwsze skupienie obejmuje zlewnie o największej powierzchni i podobnej długości cieku głównego, drugie – zlewnie o największych indeksach powodziowości, a tym samym charakteryzujące się największymi przepływami ekstremalnymi i największym spadkiem i trzecie obejmujące pozostałe obiekty. W metodzie pełnego wiązania nastąpiło wyraźne wyodrębnienie zlewni górskich, w których często dochodzi do wezbrań i powodzi opadowych, a rzeki charakteryzują się dużą zmiennością przepływu.

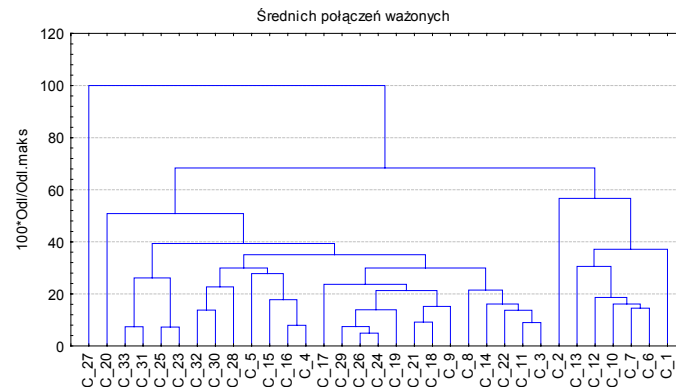
W metodzie średnich połączeń w połowie maksymalnej odległości wiązania wyodrębnić można cztery skupienia (rys. 4). Pierwsze dwa są ugrupowaniami jednoelementowymi charakteryzującymi, podobnie jak w metodzie pojedynczego wiązania, dorzecza o najmniejszym spadku głównego cieku i bardzo małym współczynniku kształtu. Ugrupowanie trzecie, podobnie jak w metodzie pełnego wiązania, obejmuje zlewnie górskie o największym indeksie powodziowości. Czwarte skupienie obejmuje pozostałe zlewnie. Podobnie jak w przypadku wcześniejszych metod grupowania, w metodzie średnich połączeń tworzone są ugrupowania różniące się wyraźnie liczebnością.



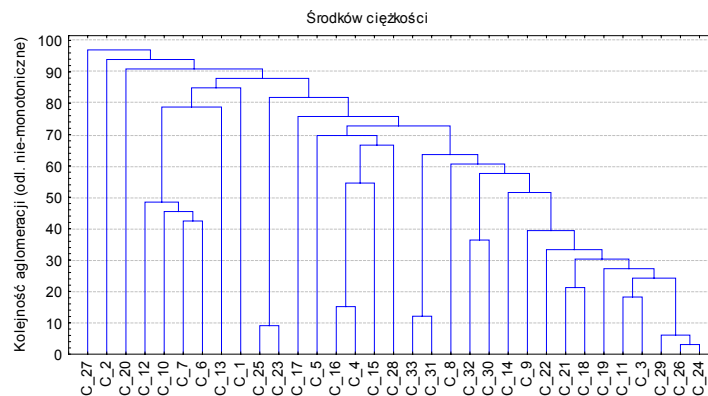
Rysunek 4. Aglomeracja metodą średnich połączeń
Figure 4. Agglomeration of average connections method

Podobny przebieg aglomeracji jak w metodzie średnich połączeń występuje w przypadku średnich połączeń ważonych (rys. 5). Różnica w przebiegu aglomeracji w stosunku do poprzedniej metody polega na tym, że w obliczeniach uwzględniana jest wielkość odpowiednich skupień. Stąd zaleca się ją stosować wówczas, gdy podejrzewamy, że liczebności skupień są różne [Grajewski 2006]. W połowie odległości wiązania wyróżnić można pięć skupień, przy czym trzy są jednoelementowe, które charakteryzują zlewnie o bardzo

dużym spadku, powierzchni oraz małym współczynnikiem kształtu. Jedno ugrupowanie składające się z sześciu elementów charakteryzuje, podobnie jak w przypadku metody średnich połączeń i pełnego wiązania, zlewnie górskie o dużym indeksie powodziowości. W kolejnych dwóch metodach grupowania – metodzie środków ciężkości i ważonych środków ciężkości (rys. 6, 7), przebieg aglomeracji zdecydowanie odbiega od pozostałych omawianych metod. W tych dwóch metodach trudno jest wyodrębnić wyraźne skupienia elementów, a dendryty przybierają w znacznym stopniu kształt „łańcucha”.

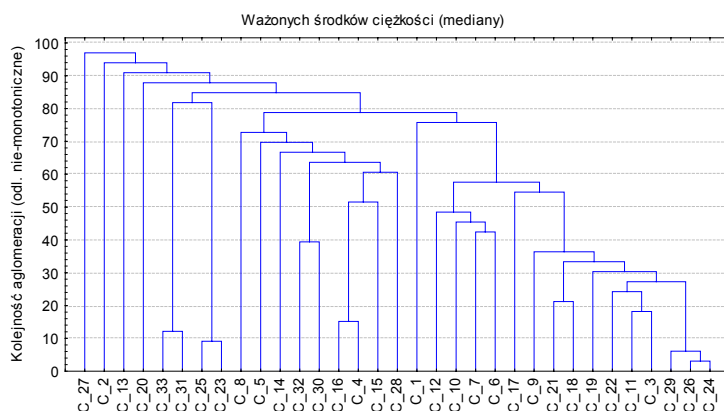


Rysunek 5. Aglomeracja metodą średnich połączeń ważonych
Figure 5. Agglomeration of weight average connections method



Rysunek 6. Aglomeracja metodą środków ciężkości
Figure 6. Agglomeration of centre means method

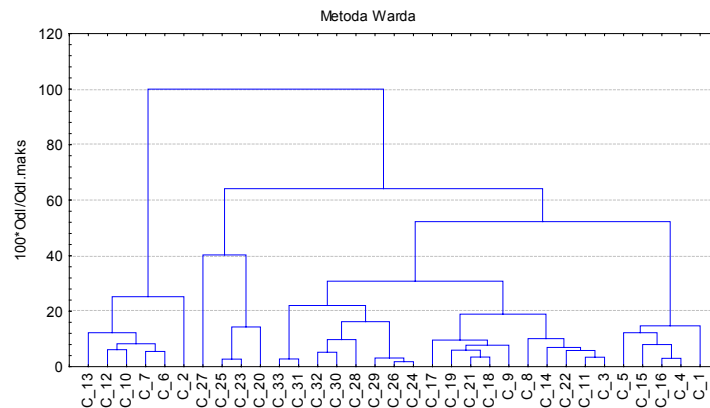
Wyraźnie odmiennie od dotychczas omawianych metod skupiania przedstawiają się wyniki w metodzie Warda (rys. 8). W 30% odległości wiązania na dendrogramie uwidacznia się sześć grup obiektów. W pierwszej znajdują się zlewnie rzek górskich o największych spadkach i indeksach powodziowości rzędu 3,22–4,11. Skupienie to tworzą rzeki: Biała, Soła, Skawa, Raba, Uszwica i Dunajec, które są prawostronnymi dopływami Wisły. W obrębie wymienionych zlewni występują duże deniwelacje terenu co stwarza sprzyjające warunki do szybkiego spływu śródpokrywowego i powierzchniowego, a w dalszej kolejności do formowania się fal wezbraniowych. Dodatkowo, powstawaniu fal wezbraniowych w tych zlewniach sprzyja mała przepuszczalność podłoża. Średnia wysokość zlewni w obrębie tego skupienia wynosi 460 m n.p.m, średnia stoczystość – 30,8 ‰, a współczynnik kształtu zlewni – 0,145. Drugie skupienie tworzą zlewnie rzek Sanu, Wieprza i Pilicy. Indeks powodziowości kształtuje się tu w granicach 1,81-3,09, średnia wysokość zlewni jest równa 250 m n.p.m., stoczystość – 3,73 ‰, a współczynnik jej kształtu jest na poziomie 0,112.



Rysunek 7. Aglomeracja metodą ważonych środków ciężkości
Figure 7. Agglomeration of weight centre means method

Duży indeks powodziowości jaki charakteryzuje rzekę San ($K = 3,09$), w porównaniu z pozostałymi rzekami w analizowanym skupieniu, wywołany jest m.in. dominacją gleb mało i średnio przepuszczalnych i znacznymi deniwelacjami, głównie w jego partiach źródłowych. Niewątpliwy wpływ na podwyższone przepływy Sanu mają także opady deszczu o dużej intensywności. Trzecia grupa charakteryzuje dorzecza tzw. dolnej Wisły, w której występują niewielkie spadki rzędu 0,9-4,1 ‰ i średnie wysokości zlewni w granicach 86 do 162,5 m n.p.m. Indeks powodziowości kształtują się od 0,73 (rzeka Wda) do 2,26 (rzeka Świder). Czwarta grupa obejmuje 9 zlewni zlokalizowanych w dorzeczu Górnej Wisły i 1 w dorzeczu Wisły Środkowej (rzeka Kamienna). Z pośród 10 zlewni

tworzących czwarte skupienie, aż 8 stanowią lewostronne dopływy Wisły. W zlewniach rzek położonych w pasie Wyżyn Śląsko-Małopolskich i Lubelsko-Wołyńskich będących lewostronnymi dopływami Wisły, orografia, typ rzeźby i osadów czwartorzędowych nie odgrywa istotnej roli w kształtowaniu ekstremalnych zjawisk w całym dorzeczu Górnej Wisły. Głęboka infiltracja, ługowanie i tworzenie zasobnych zbiorników wód podziemnych następuje zarówno w obrębie wyżyn zbudowanych z wapieni, margli i gipsów, jak i kotlin wysłanych warstwami piasków o znacznej miąższości [Starkel 1991]. Zlewnie tworzące analizowane skupienie charakteryzują się średnią wysokością 278,2 m n. p. m., stoczystością – 8,0 ‰ i współczynnikiem kształtu zlewni – 0,164. Indeks powodziowości zawiera się w granicach 1,0 do 3,36. Dorzecza o największym współczynniku kształtu i stosunkowo krótkich ciekach (do około 75 km) tworzą ugrupowanie piąte. Zlokalizowane są one całkowicie w obrębie dorzecza Górnej Wisły. Trzy rzeki (Gostynia, Przemsza i Czarna) są lewostronnymi dopływami Wisły, natomiast pozostałe dwie: Iłownica i Breń to prawostronne dopływy Wisły. Średnia wysokość zlewni w piątym skupieniu wynosi 285,6 m n. p. m., stoczystość – 6,4 ‰, współczynnik kształtu – 0,370, a indeks powodziowości waha się w granicach od 1,14 (rzeka Przemsza) do 3,37 (rzeka Iłownica). Oddzielne skupienie jednoelementowe tworzy zlewnia Narwii. Decyduje o tym największa jej powierzchnia spośród wszystkich analizowanych zlewni ($A = 69642 \text{ km}^2$) przy jednoczesnym najmniejszym spadku ($I = 0,28 \text{ ‰}$).



Rysunek 8. Aglomeracja metodą Warda
Figure 8. Agglomeration of Ward's method

WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych analiz można wysunąć następujące wnioski:

1. Przeciętna wartość indeksu powodziowości w dorzeczu Wisły wynosi 2,4. Maksymalne jego wartości ($K > 4,0$) występowały w trzech zlewniach karpackiego dorzecza Górnej Wisły: Soły – przekrój Oświęcim, Raby – przekrój Proszówki i Dunajca – przekrój Żabno. W zlewniach tych występują najkorzystniejsze warunki meteorologiczne i fizjograficzne do formowania się przepliwów maksymalnych.

2. Większość z zastosowanych metod aglomeracji w 40-60% odległości wiązania dzieli analizowane zlewnie na 3-4 skupienia podobnych do siebie pod względem indeksu powodziowości i analizowanych charakterystyk fizjograficznych.

3. Najlepsze rezultaty grupowania uzyskano stosując metodę Warda, gdzie wydzielono sześć jednorodnych zlewni z uwagi na indeks powodziowości, powierzchnię, średnią wysokość n. p. m. i stoczystość, długość cieków głównego oraz współczynnik kształtu. W każdym z wyróżnionych jednorodnych obszarów w odmiennym stopniu analizowane czynniki fizjograficzne wpływają na kształtowanie się indeksu powodziowości.

4. Metody środków ciężkości oraz ważonych środków ciężkości nie są przydatne do identyfikacji jednorodnych zlewni z uwagi na występującą tendencję do tworzenia mało przejrzystych skupień w formie długich „łańcuchów”.

BIBLIOGRAFIA

- Adamczyk B. *Gleby* [W:] Dorzecze Górnej Wisły. Cz. I. Praca zbiorowa pod redakcją I. Dynowskiej i M. Maciejewskiego, Wyd. PWN, Warszawa-Kraków, 1991, 55-67.
- Bartnik A., Jokił P. *Odpywy maksymalne i indeksy powodziowości rzek europejskich*. Gospodarka Wodna 1, 2007, 28-32.
- Brzeziński J. *Obiektywizacja doboru zlewni podobnej*. Gospodarka Wodna 12, 1995, 163-167.
- Burn D. H. *Cluster analysis as applied to regional flood frequency*. Journal of Water Resources Planning and Management 115, 1989, 567-582.
- Byczkowski A. *Określenie odpływu w zlewniach niekontrolowanych w oparciu o związki przepływów lub odpływów jednostkowych*. Zesz. Nauk. Politechniki Krakowskiej 3, Budownictwo Wodne i Inżynieria Sanitarna 24, 1976, 293-307.
- Byczkowski A. *Miara podobieństwa odpływów jednostkowych jako kryterium doboru zlewni-analogi*. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Melioracja XXXIV, 189, 1990, 111-127.
- Byczkowski A. *Hydrologia*. T. 2. Wyd. SGGW, Warszawa, 1996.
- Bykowski J., Miler A. *Zastosowanie metod grupowań hierarchicznych do charakterystyki obiektów drenarskich w Wielkopolsce*. Roczniki AR w Poznaniu – CCXCIV, Melior. Inż. Środ. 19, cz. 2, 1997, 233-240.
- Göttinger J., Bárdossy A. *Comparison of four regionalization methods for a distributed hydrological model*. Journal of Hydrology 333, 2007, 374-384.

- Grajewski S. *Zastosowanie analizy skupień w porównawczych badaniach zdolności retencyjnych ekosystemów leśnych*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich 3, 1, 2006, 155–169.
- Guttman N. B. *The use of L-moments in the determination of regional precipitation climates*. Journal of Climate 6, 1993, 2309–2325.
- Guttman N. B., Hosking J. R. M., Wallis J. R. *Regional precipitation quantile values for the continental US computed from L-moments*. Journal of Climate 6, 1993, 2326–2340.
- Kowalczak P. *Konflikty o wodę*. Wyd. Kurpisz S. A. Przeźmierowo, 2007.
- Laacha G., Blöschl G. *A comparison of low flow regionalisation methods – catchment grouping*. Journal of Hydrology 323, 2006, 193–214.
- Lin G. F., Chen L. H. *Identification of homogenous regions for regional frequency analysis using the self-organising map*. Journal of Hydrology 324, 2006, 1–9.
- Marek T. *Analiza skupień w badaniach empirycznych*. Metody SAHN. Wyd. PWN, Warszawa, 1989.
- Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B. *Klimat [w:] Dorzecze Górnej Wisły*. Cz. I. Praca zbiorowa pod redakcją I. Dynowskiej i M. Maciejewskiego, Wyd. PWN, Warszawa-Kraków, 1991, 68–84.
- Stachy J. *Rozmieszczenie odpływu średniego na obszarze Polski*. Prace PIHM 88, Warszawa, 1966, 3–42.
- Stanisz A. *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny*. T. 3. Analizy wielowymiarowe. StatSoft, Kraków, 2007.
- Starkel L. *Rzeźba terenu*. [w:] Dorzecze Górnej Wisły. Cz. I. Praca zbiorowa pod redakcją I. Dynowskiej i M. Maciejewskiego, Wyd. PWN, Warszawa-Kraków, 1991, 42–54.
- Tuszek A. *Wisła*. Książka i Wiedza, Warszawa, 1984.
- Tyszewski S., Byczkowski A., Okruszko T., Mandes B. *Teoria zbiorów rozmytych jako obiektywna podstawa oceny podobieństwa zlewni rzecznych*. Wiad. IMGW, z. 3, T. XVI (XXXVII), 1993, 21–35.
- Tyszewski S., Byczkowski A. *Obliczanie przepływów w zlewniach niekontrolowanych z wykorzystaniem metody rozmytego prawdopodobieństwa* [w:] Hydrologia u progu XXI wieku, Red. A. Magnuszewski i U. Soczyńska, Mądralin k. Warszawy 24-27.IX. 1996, 1998, 303–316.
- Węclawik S. *Budowa geologiczna*. [W:] Dorzecze Górnej Wisły. Cz. I. Praca zbiorowa pod redakcją I. Dynowskiej i M. Maciejewskiego, Wyd. PWN, Warszawa-Kraków, 1991, 30–41.

Dr inż. Andrzej Wałęga
Prof. dr hab. inż. Stanisław Krzanowski
Dr inż. Krzysztof Chmielowski
Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
e-mail: awalega@ar.krakow.pl

Recenzent: Prof. dr hab. Jerzy Kowalski