

WIESŁAW GADEK, WŁODZIMIERZ BANACH*, IZABELLA FIOŁKA**

ZASTOSOWANIE MODELU GEOMORFOLOGICZNEGO DO WYZNACZANIA WEZBRAŃ HIPOTETYCZNYCH W ZLEWNIACH NIEKONTROLOWANYCH

APPLICATION OF A GEOMORPHOLOGICAL MODEL TO DETERMINATION OF DESIGN FLOODS IN UNGAUGED CATCHMENTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono porównanie wyników symulacji obliczeniowych metody wyznaczania wezbrań hipotetycznych w zlewniach niekontrolowanych opracowanej w Zakładzie Hydrologii Politechniki Krakowskiej z wynikami uzyskanymi dla danych rzeczywistych w przekrojach wodowskazowych z zastosowaniem metody opracowanej w Instytucie Inżynierii i Gospodarki Wodnej Politechniki Krakowskiej. Analizy dokonano dla trzech zlewni kontrolowanych: Prądnika, Żabniczanki oraz Żylicy.

Słowa kluczowe: fala hipotetyczna, SCS, hydrogram jednostkowy, program komputerowy Geom_WH

Abstract

This paper presents comparison of hypothetical flood wave simulation method for ungauged catchments developed at Division of Hydrology, Cracow University of Technology, with results calculated for measured data in gauged cross-sections using method developed at Institute of Water Engineering and Water Management, Cracow University of Technology. Three gauged catchments were analysed: Prądnik, Żabniczanka and Żylica.

Keywords: hypothetical flood wave, SCS unit hydrograph, computer programme GEOM_WH

* Dr inż. Wiesław Gądek, prof. PK, dr inż. Włodzimierz Banach, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

** Mgr inż. Izabella Fiołka, dyplomantka studiów II-go stopnia.

1. Wstęp

W projektowaniu obiektów i urządzeń hydrotechnicznych wykorzystywane są przepływy o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia. W zagadnieniach inżynierskich dotyczących budownictwa wodnego lub gospodarki wodnej jest to niewystarczająca informacja. Część tych brakujących danych może być dostarczona poprzez wezbrania hipotetyczne dla zadanej wysokości przepływu w kulminacji. Wezbrania takie oprócz przepływu w kulminacji określają objętość wezbrania oraz kształt wezbrania poprzez dokładnie sprecyzowane czasy wznoszenia i opadania. W przypadku zlewni kontrolowanych istnieją metody wyznaczania wezbrań hipotetycznych [3, 4], sytuacja jest odmienna w odniesieniu do zlewni niekontrolowanych. W artykule przedstawiono rezultaty obliczeń wykorzystujących zastosowanie modelu geomorfologicznego typu opad–odpływ do wyznaczania wezbrań teoretycznych dla zlewni niekontrolowanych.

W celu sprawdzenia, czy zaproponowana metoda wyznaczania wezbrań hipotetycznych w zlewniach niekontrolowanych [7] opracowana w Zakładzie Hydrologii Politechniki Krakowskiej jest godna polecenia, wyniki symulacji zostały porównane z wezbraniem hipotetycznymi uzyskanymi dla danych rzeczywistych w przekrojach wodowskazowych z zastosowaniem metody opracowanej w Instytucie Inżynierii i Gospodarki Wodnej Politechniki Krakowskiej [3]. Do porównań wybrano trzy małe zlewnie kontrolowane: Prądnik, Żabniczanka i Żylica.

2. Metoda Politechniki Krakowskiej wyznaczania fal hipotetycznych

W metodzie przyjęto następujące założenia:

- przepływ graniczny przyjmowany jest na poziomie przepływu medialnego $Q_p = 50\%$,
- w trakcie konstrukcji fali uwzględniane są parametry wezbrania, takie jak: przepływ kulminacyjny dla każdego wezbrania, czas wznoszenia, czas opadania, objętość wezbrania (na ich podstawie wyznaczane są związki korelacyjne pomiędzy: przepływem kulminacyjnym a objętością wezbrania oraz czasem wznoszenia i czasem bazowym),
- minimalna liczba wezbrań nie powinna być mniejsza niż 8–10,
- normalizacja wezbrań do zunifikowanych jednostkowych hydrogramów jest zbliżona do opracowanej w latach 70. metody Politechniki Warszawskiej [4].

Przy wyborze hydrogramów wezbrań jako danych wejściowych, pod uwagę brana jest wysokość przepływu w kulminacji. Wysokość kulminacji nie powinna być niższa od przepływu $Q_p = 40\%$. Wynika to z przyjętego wysokiego poziomu przepływu granicznego, który powoduje, że małe wezbrania nie wnoszą istotnych informacji do opracowywanego hydrogramu.

Do właściwej analizy brane są pod uwagę wezbrania jednodalne, czyli o jednej dominującej kulminacji. Na ich podstawie określone są następujące parametry charakteryzujące dane wezbranie, takie jak:

- Q_{\max} – wysokość przepływu maksymalnego [m^3/s],
- Q_{zred} – wysokość maksymalna przepływu powyżej poziomu granicznego ($Q_{\max} - Q_{50\%}$) [m^3/s],
- t_k – czas wznoszenia fali, dla przepływów powyżej $Q_p = 50\%$ [h],

- t_0 – czas opadania fali dla przepływów do $Q_p = 50\%$ [h],
 t_b – czas bazowy (czas podstawy fali przy przepływie $Q_p = 50\%$) [h],
 V – objętość całkowita fali [mln m³],
 V_{zred} – objętość fali powyżej przepływu $Q_p = 50\%$ [mln m³].

W przypadku wezbrań, których przepływ w kulminacji jest stały i wynosi kilka godzin, za czas wznoszenia przyjmowana jest wartość środkowa. Bardzo często mamy z taką sytuacją do czynienia w przypadku wezbrań w okresie zimowym lub wezbrań w przekrojach wodowskazowych leżących poniżej obiektów piętrzących.

W tej metodzie, w odróżnieniu od metody Politechniki Warszawskiej, czas wznoszenia jest wielkością niezależną od czasu opadania i dyskretyzacja obu gałęzi hydrogramu jest również przeprowadzana w sposób niezależny. Dla każdej z gałęzi przyjmowana jest wartość 1. Znormalizowany czas bazowy wynosi 2, chociaż krok dyskretyzacji części wznoszącej jest różny od kroku dyskretyzacji części opadającej.

Wartości znormalizowanego przepływu obliczane są dla dyskretyzacji czasowej:

- krzywej wznoszącej $t_i = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95; 1,0;$
- krzywej opadającej $t_i = 1,05; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0.$

Poszczególne parametry opisujące kolejne wezbrania są wykorzystywane do opracowania zależności: związku pomiędzy czasem wznoszenia t_k , a bazowym t_b oraz związku pomiędzy przepływem kulminacyjnym a objętością wezbrania. W tym ostatnim przypadku związek dotyczy wartości zredukowanych, czyli tej części wezbrania, która znajduje się powyżej przepływu granicznego $Q_0 = Q_p = 50\%$. Ostateczny przebieg hydrogramu hipotetycznego opracowywany jest na podstawie znormalizowanych jednostkowych hydrogramów, zależności pomiędzy czasem wznoszenia a czasem bazowym oraz zależności objętości zredukowanej wezbrania a przepływem maksymalnym.

Algorytm obliczeniowy polega na poszukiwaniu czasu wznoszenia, na podstawie którego wyznaczony hydrogram przy zadanym przepływie kulminacyjnym będzie miał objętość zgodną z objętością obliczoną z zależności $V_{zred} = f(Q_{zred})$. Algorytm obliczeniowy przebiega w następującej kolejności:

- A. Przyjmowany jest maksymalny przepływ kulminacyjny dla wybranego wodowskazu o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia w kulminacji $Q_{max} = Q_p^p$.
- B. Z zależności $V_{zred} = f(Q_{zred})$ określana jest objętość fali poszukiwanego wezbrania hipotetycznego.
- C. Na podstawie znormalizowanego jednostkowego hydrogramu hipotetycznego obliczane są poszczególne wartości przepływu (zarówno dla części wznoszącej, jak i opadającej) zgodnie z zależnością $Q_i = q_i Q_{zred}$.
- D. Przyjmowany jest czas wystąpienia kulminacji (czas wznoszenia) t_k oraz obliczany czas bazowy z zależności $t_b = f(t_k)$.
- E. Dla przyjętego czasu wznoszenia i opadania ustalany jest krok dyskretyzacji dla obu gałęzi wezbrania hipotetycznego.
- F. Obliczana jest objętość wyznaczonej fali hipotetycznej.
- G. Porównywana jest obliczona objętość fali V_h z objętością zadaną V_{zred} – w przypadku zgodności obu tych wartości proces wyznaczania fali hipotetycznej jest zakończony, w przypadku braku takiej zgodności ponownie określany jest czas wznoszenia i całą procedurę należy powtórzyć od punktu „D”.

3. Metoda wyznaczania wezbrania hipotetycznego w zlewni niekontrolowanej

Wyznaczanie przebiegu hydrogramu wezbrania hipotetycznego dokonywane jest w dwóch niezależnych etapach. W pierwszym etapie wyznaczany jest hydrogram wezbrania, który powstanie w wyniku zaistnienia zadanego rozkładu godzinowego opadu dobowego o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia. W metodzie zakłada się, że objętość wezbrania hipotetycznego o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia w kulminacji jest równa objętości opadu efektywnego powstałego w wyniku wystąpienia opadu o tym samym prawdopodobieństwie przewyższenia, co przepływ w kulminacji. Obliczenia w zlewni prowadzone są za pomocą parametrów wyznaczonych na podstawie rodzaju gleb, zagospodarowania powierzchni terenu, wysokości opadów uprzednich oraz budowy sieci rzecznej. Rozkład czasowy dobowego opadu atmosferycznego o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia jest dowolny i jest definiowany przez użytkownika programu indywidualnie.

W drugim etapie wyznaczany jest hydrogram wezbrania hipotetycznego przy zadanej wartości przepływu w kulminacji i określonych w pierwszym etapie wartościach, tj. objętości wezbrania oraz czasu wznoszenia i opadania fali. Wysokość przepływu w kulminacji definiuje się jako przepływ o zadanej wartości przewyższenia, np. $Q_p = 1\%$.

Wyznaczanie hydrogramów hipotetycznych bazuje na modelu opadu efektywnego SCS CN [1, 5] oraz geomorfologicznym modelu odpływu ze zlewni [6]. Obliczenia rzędnych hipotetycznego hydrogramu odpływu ze zlewni dokonywane są w wyniku optymalizacji wybranych parametrów modelu geomorfologicznego. Do tego celu wykorzystano metodę optymalizacyjną „złotego podziału” [2]. Postać funkcji kryterialnej dostosowano w ten sposób, aby uzyskać najlepsze dopasowanie wysokości przepływu kulminacyjnego fali. Określona ona została następującym wzorem:

$$F_c = \min (Q_{\max o} - Q_{p\%})^2 \quad (1)$$

gdzie:

- F_c – wartość funkcji kryterialnej,
- $Q_{\max o}$ – przepływ kulminacyjny obliczonego hydrogramu odpływu (z optymalizacji) [m³/s],
- $Q_{p\%}$ – przepływ o zadanej wartości prawdopodobieństwa przewyższenia $p\%$ [m³/s].

Wyznaczenie wezbrania hipotetycznego dokonywane jest poprzez przekształcenie jednostkowych hydrogramów odpływu otrzymanych dla elementarnych zdarzeń opadowych z zadanego rozkładu opadu dobowego o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia poprzez zmianę czasu bazowego t_b . W metodzie przyjmuje się, że czasy bazowe poszczególnych hydrogramów jednostkowych zostaną pomnożone przez taką samą wartość liczbową tak, aby po wykonaniu superpozycji wszystkich hydrogramów elementarnych uzyskać najlepsze dopasowanie obliczonej wartości przepływu w kulminacji do przepływu o zadanej wartości przewyższenia. W tym sposobie wyznaczania fali hipotetycznej optymalizowanym parametrem jest wartość mnożnika mn . Podczas optymalizacji objętość hydrogramu jednostkowego nie ulega zmianie:

$$\frac{1}{2}q_p t_b = \frac{1}{2}q_{po} t_{bo} \quad (2)$$

gdzie:

- q_p – przepływ kulminacyjny obliczonego hydrogramu jednostkowego [mm],
 t_b – czas bazowy obliczonego hydrogramu jednostkowego [min],
 q_{po} – przepływ kulminacyjny transformowanego hydrogramu jednostkowego [mm],
 t_{bo} – czas bazowy transformowanego hydrogramu jednostkowego [min],

$$t_{bo} = t_b mn \quad (3)$$

mn – mnożnik [-].

4. Eksperyment numeryczny

4.1. Podstawowe parametry zlewni

Eksperyment numeryczny przeprowadzono dla trzech małych zlewni kontrolowanych: Prądnika, Żabniczanki i Żylica. Podstawowe parametry tych zlewni przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

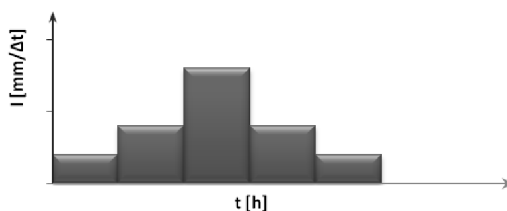
Podstawowe parametry charakteryzujące zlewnie

Parametr	Jednostki	Prądnik	Żabniczanka	Żylica
Wodowskaz	[-]	Ojców	Żabnica	Łodygowice
Powierzchnia zlewni	[km ²]	67,5	22,8	47,8
Długość cieków głównego	[km]	11,54	5,14	18,12
Długość cieków najwyższego rzędu	[km]	0,48	0,55	11,79
Spadek podłużny cieków najwyższego rzędu	[%]	0,208	1,865	1,739
Szerokość koryta zastępczego	[m]	16	8	13
Współczynnik szorstkości	[m ^{1/3} /s]	0,03	0,03	0,03
Wysokość opadu rocznego	[mm]	700	1000	950
Opad o prawdopodobieństwie $p = 1\%$	[mm]	90	150	175
Przepływ $Q_{1\%}$	[m ³ /s]	39,5	74,2	74,2
Przepływ $Q_{50\%}$	[m ³ /s]	1,5	9,5	12,0

4.2. Rozkład opadów

Zmienność czasowa natężenia deszczu obok czasu trwania i sumy opadu ma zasadniczy wpływ na przebieg wezbrania. Do analiz wybrano trójkątny rozkład o maksymalnej wartości natężenia występującej w środku zdarzenia (rys. 1).

Przyjęto trzy scenariusze opadowe o zadanym czasie trwania: 24, 48 i 72 godziny, wysokości opadów przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 1. Przyjęty rozkład opadów z maksymalnym natężeniem w środku zdarzenia
 Fig. 1. Assumed precipitation temporal distribution with maximal intensity in the centre of event

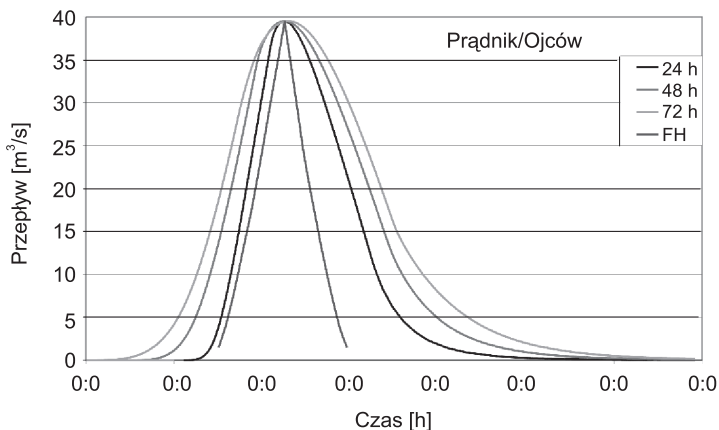
Tabela 2

Sumaryczna wysokość opadu dla określonego czasu ich trwania

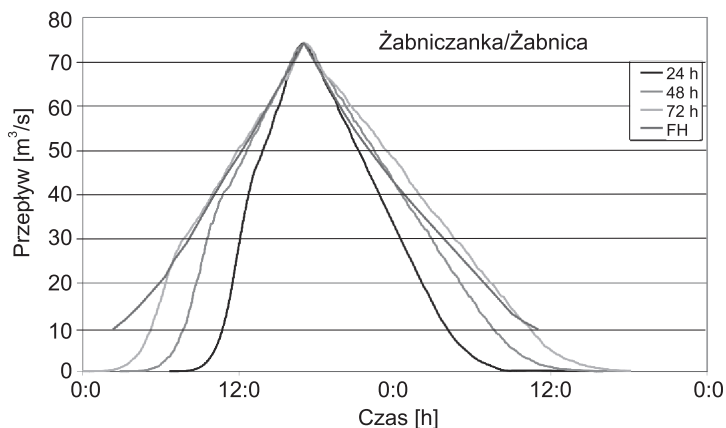
Zlewnia:	Prądnik	Żabniczanka	Żylica
Sumaryczna wysokość opadu [mm] o czasie trwania:			
– 24 godziny	90	150	175
– 48 godzin	114	196	227
– 72 godziny	130	229	270

4.3. Wyznaczanie fal hipotetycznych

Do wyznaczania hydrogramów hipotetycznych opracowano program komputerowy Geom_Wh bazujący na modelu opadu efektywnego SCS CN oraz geomorfologicznym modelu odpływu ze zlewni. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 2–4 oraz w tabeli 3 i 4.

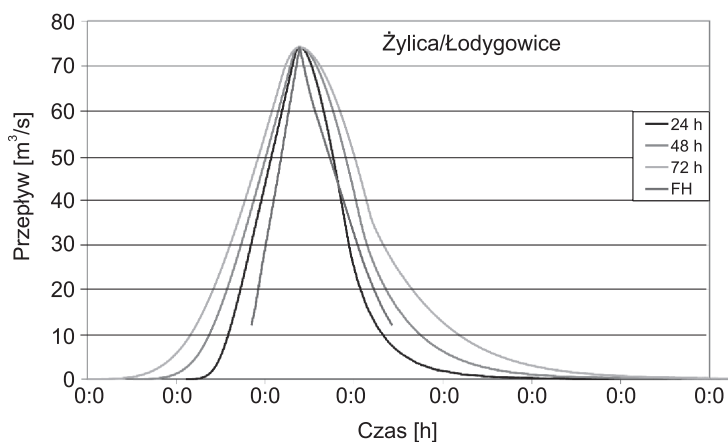


Rys. 2. Wykres zoptymalizowanych hydrogramów dla zadanych czasów trwania opadu 24 h, 48 h, 72 h oraz fali hipotetycznej FH dla rzeki Prądnik w przekroju wodowskazowym Ojców
 Fig. 2. Optimized hydrographs for 24 h, 48 h, 72 h durations and hypothetical wave FH for river Prądnik in Ojców cross-section



Rys. 3. Wykres zoptymalizowanych hydrogramów dla zadanych czasów trwania opadu 24 h, 48 h, 72 h oraz fali hipotetycznej FH dla rzeki Żabniczanka w przekroju wodowskazowym Żabnica

Fig. 3. Optimized hydrographs for 24 h, 48 h, 72 h durations and hypothetical wave FH for river Żabniczanka in Żabnica cross-section



Rys. 4. Wykres zoptymalizowanych hydrogramów dla zadanych czasów trwania opadu 24 h, 48 h, 72 h oraz fali hipotetycznej FH dla rzeki Żylica w przekroju wodowskazowym Łodygowice

Fig. 4. Optimized hydrographs for 24 h, 48 h, 72 h durations and hypothetical wave FH for river Żylica in Łodygowice cross-section

Tabela 3

Zestawienie wyników obliczenia wezbrań hipotetycznych modelem geomorfologicznym

Czas opadu [h]	Prądnik			Żabniczanka			Żylica		
	objętość fali powyżej $Q_{50\%}$ [mln m ³]	t_k [h]	t_b [h]	objętość fali powyżej $Q_{50\%}$ [mln m ³]	t_k [h]	t_b [h]	objętość fali powyżej $Q_{50\%}$ [mln m ³]	t_k [h]	t_b [h]
24	3,918	21	65	2,145	7	18	4,477	20	40
48	5,265	31	89	2,926	10	25	5,857	24	54
72	6,223	36	107	3,484	12	30	7,202	29	68

Tabela 4

Zestawienie wyników obliczenia wezbrań hipotetycznych na podstawie danych rzeczywistych

Prądnik			Żabniczanka			Żylica		
objętość fali powyżej $Q_{50\%}$ [mln m ³]	t_k [h]	t_b [h]	objętość fali powyżej $Q_{50\%}$ [mln m ³]	t_k [h]	t_b [h]	objętość fali powyżej $Q_{50\%}$ [mln m ³]	t_k [h]	t_b [h]
2,102	19	36	3,352	16	34	3,880	14	39

5. Wnioski

Wyniki uzyskane z obliczeń modelem GEOM porównano z wezbrzeniami hipotetycznymi wyznaczonymi metodą stosowaną na Politechnice Krakowskiej dla rzeczywistych zarejestrowanych w historii wezbrań. Pod uwagę wzięto objętość i przebieg wyznaczonego wezbrania hipotetycznego:

- Ze względu na objętość fali hipotetycznej największą zgodność uzyskano dla potoku Żabniczanka w przekroju wodowskazowym Żabnica dla opadu o czasie trwania 72 h.
- Dla najczęściej stosowanego scenariusza opadowego, czyli dla opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$ i czasie trwania 24 h, dla zlewni potoku Żabniczanka stwierdzono 36% niedoszacowanie objętości wezbrania, w pozostałych przekrojach występuje przeszacowanie objętości: dla Żylicy o 15%, a dla Prądnika aż o 86%.
- Wszystkie wyniki symulowanych hydrogramów obiegają od przebiegów hydrogramów wyznaczonych dla wezbrań rzeczywistych.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że dla zlewni o powierzchni około 20 km² należy uwzględnić opad o zadanym prawdopodobieństwie i czasie trwania dłuższym od 24 h. Wraz ze wzrostem powierzchni zlewni zadany czas trwania opadu powinien zmniejszać się nawet do kilkugodzinnych scenariuszy. Jest to jednak za daleko idący wniosek. Na podstawie przeanalizowanych trzech zlewni nie można takiego wniosku stawiać. Wina za niewłaściwe oszacowanie objętości wezbrania może wynikać z zastosowania metody SCS CN, która z dużym przybliżeniem szacuje wartości opadu efektywnego, może być następstwem zastosowania

modelu dla zlewni przekraczającej 30 km² (zlewnia Prądnika i Żylicy). Błąd też może być konsekwencją źle wyznaczonych opadów o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia dla obszarów górskich.

Analizując wyniki, stwierdzono brak wyraźnych zależności między wysokością opadu o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia a wysokością odpływu wezbrania hipotetycznego opracowanego na podstawie rzeczywistych wartości przepływów. Wykorzystanie modelu geomorfologicznego w tej sytuacji, tj. przy braku zgodności objętości opadu o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia z objętością wezbrania hipotetycznego i braku poprawnego odwzorowania fali hipotetycznej jest raczej niewskazane. Należy zatem poszukiwać innych metod umożliwiających wyznaczenie wezbrań hipotetycznych dla zlewni niekontrolowanych.

Literatura

- [1] Banasik K., *Model sedimentogramu wezbrania opadowego w malej zlewni rolniczej*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 1994.
- [2] Findenisen W., *Metody obliczeniowe optymalizacji*, PWN, Warszawa 1970.
- [3] Gądek W., *Fale hipotetyczne o zadanym prawdopodobieństwie przepływu w kulminacji*, Hydrologia w Inżynierii i Gospodarce Wodnej, t. 1, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Środowiska, monografia nr 68, Warszawa 2010.
- [4] Hydroprojekt, *Przykłady obliczeń hydrologicznych do opracowań wodno-melioracyjnych*, Praca studialna nr 126, Warszawa 1971.
- [5] Ignar S., *Metoda SCS i jej zastosowanie do wyznaczania opadu efektywnego*, Przegląd Geofizyczny, XXXIII, z. 4., 1988.
- [6] Rodriguez-Iturbe I., Valdes J.B., *The geomorphologic structure of hydrologic response*, Water Resour. Res., vol. 15, 1979.
- [7] Banach W., *Determination of synthetic flood hydrograph in ungauged catchments*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Zeszyt 12, Kraków 2011 – praca w druku.