

WPŁYW PRZYJĘTYCH ROZKŁADÓW CZASOWYCH ZMIENNOŚCI DESZCZU NA WYNIKI MODELOWANIA OPAD-ODPŁYW

Radosław Stodolak^{1*}, Jeremi Baran², Ewa Knap²

¹ Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

² Studenckie Koło Naukowe Hydrologów i Hydrotechników, ul. Norwida 25, 50-375 Wrocław

* Autor do korespondencji: radoslaw.stodolak@upwr.edu.pl

STRESZCZENIE

Praca dotyczy doboru rozkładu czasowego opadu wykorzystanego do procesu modelowania typu opad-odpływ. Jako obszar badawczy wykorzystano zlewnię Bystrzyca, będącej lewostronnym dopływem Nysy Kłodzkiej. Dla realizacji założeń konieczne było stworzenie kilku wariantów możliwego rozkładu czasowego deszczu, w tym jednego wykorzystującego szeroko stosowaną metodę opartą na zaleceniach Niemieckiego Związku Gospodarki Wodnej i Melioracji DVWK. Do weryfikacji i kalibracji wyników modelowania wykorzystano dane opadowe oraz pomierzone wartości przepływów pozyskane z zasobów IMGW-PIB. Dane związane z zagospodarowaniem terenu oraz rozkładem gleb na terenie zlewni, które zostały wykorzystane w procesie modelowania, wymagały analizy przy użyciu narzędzi pozwalających na przetwarzanie informacji przestrzennej w środowisku GIS. Proces modelowania został przeprowadzony w programie HEC-HMS 4.2 za pomocą zaimplementowanego w nim modelu NRCS-UH (dawniej SCS-CN) opracowanego przez Amerykańską Służbę Ochrony Gleb (Soil Conservation Service SCS). Celem modelowania było sprawdzenie, który z przyjętych rozkładów czasowej zmienności opadu wygeneruje falę hipotetyczną najbardziej zbliżoną do fali rzeczywistej z 13.06.2015 roku. Jako niezależne miary dopasowania hydrogramu symulowanego względem obserwowanego wykorzystano statystyki w postaci: współczynnika efektywności modelu Nash-Sutcliffe (NS), średniego błędu bezwzględny MAE oraz pierwiastka błędu średniokwadratowego RMSE. Na podstawie kalibracji modelu przeprowadzonego na podstawie wezbrania z 2015 roku wskazano na wariant z rozkładem czasowym opadu, w którym kulminacja przypada na 12 godzinę opadu.

Słowa kluczowe: modelowanie, opad-odpływ, HEC-HMS, Bystrzyca

THE INFLUENCE OF RAIN TEMOPRATION ON THE RESULTS OF RAINFALL-RUNOFF MODEL

ABSTRACT

The paper concerns the selection of precipitation time distribution used in the process of development rainfall-runoff model. The Bystrzyca catchment area, which is a left-bank tributary of the Nysa Kłodzka River, was used as a research area. In order to achieve the assumptions, it was necessary to create several variants of possible rainfall time distribution, including one using a widely used method based on the recommendations of the German Association for Water Management and Land Melioration DVWK. To verify and calibrate the modeling results,



SIAR
SIĘĆ NA RZECZ
INNOWACJI W ROLNICTWIE
I NA OBSZARACH WIEJSKICH



Krajowa Sieć
Obszarów Wiejskich



Program
Rozwoju
Obszarów
Wiejskich
na lata 2014-2020

„Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich: Europa inwestująca w obszary wiejskie”.

Artykuł opracowany na zlecenie Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie.

Artykuł współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach II Schematu Pomocy Technicznej

„Krajowa Sieć Obszarów Wiejskich” Program Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020.

Instytucja Zarządzająca Programem Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014-2020

– Minister Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

rainfall data and measured values of flow obtained from the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute resources were used. Data related to land use and soil arrangement in the catchment area, which were used in the modelling process, required analysis with the use of tools enabling the processing of spatial information in the GIS environment. The modelling process was carried out in HEC-HMS 4. 2 using the NRCS-UH model (formerly SCS-CN) implemented by the American Soil Conservation Service (SCS). The aim of the modeling process was to check which of the assumed distributions of time variation of precipitation will generate the hypothetical wave closest to the actual wave of 13. 06. 2015. Independent measures of the simulated hydrogramme's adjustment to the observed one, included statistics in the form of: Nash-Sutcliffe (NS) coefficient of performance, mean absolute error of the MAE, and the root mean square error of the RMSE model. On the basis of the calibration of the model carried out on the basis of the increase of the rainfall in 2015, a variant with the precipitation time distribution was indicated, in which the culmination falls on the 12th hour of precipitation.

Keywords: modeling, rainfall-runoff, HEC-HMS, Bystrzyca

WPROWADZENIE

Jedną ze współczesnych metod stosowanych w gospodarce wodnej do prognozowania procesów, jakie zachodzą na obszarze zlewni jest modelowanie hydrologiczne. Modelem zjawiska opad-odpływ (symulacyjny model matematyczny) określa się metodę matematycznego zdefiniowania wszystkich procesów, jakie składają się na zjawisko formowania odpływu wywołanego opadem.

Sporym osiągnięciem w rozwoju modeli odpływu uwzględniających opad było opracowanie przez Soil Conservation Service (SCS) metody wykorzystującej pojęcie opadu efektywnego [Soil Conservation Service, 1972, 1986]. Stanowi on część opadu całkowitego w postaci nadwyżki zasobów wodnych, która przekształcana jest w odpływ powierzchniowy po wypełnieniu retencji początkowej zlewni, strat związanych z intercepcją i parowaniem. Do jego obliczenia zastosowano parametr Curve Number (CN), który stanowi zmienną zróżnicowanych typów pokrycia terenu w odniesieniu do hydrologicznych grup glebowych. Metoda SCS-CN znalazła powszechne zastosowanie w modelowaniu hydrologicznym, jako składowa transformacji opadu efektywnego w odpływ bezpośredni. Miler opisuje tą metodę, jako opartą na ustaleniu retencyjności zlewni poprzez przypisanie jej odpowiedniego numeru krzywej na podstawie danych dotyczących zagospodarowania i gruntu znajdującego się w opisywanym obszarze [2012]. Wynika stąd, że im bardziej zlewnia jest uszczelniona i znajduje się na nieprzepuszczalnych gruntach, tym większy będzie generowany z niej odpływ.

Jednym z najtrudniejszych etapów w dążeniu do prawidłowego oszacowania ilości wód opadowych jest wyznaczenie deszczu, który będzie reprezentatywny na potrzeby obliczeń (nazywany

deszczem miarodajnym lub obliczeniowym). Zasadniczym problemem jest prawidłowe odwzorowanie rozpatrywanego zjawiska opadu w czasie. Proces transformacji opadu w odpływ należy do zjawisk niustalonych. Charakter opadów (ich intensywność i rozmieszczenie przestrzenne) podczas trwania pełnego epizodu opadowego zmienia się w czasie. Na nierównomierność obszarową opadu w zależności od czasu jego trwania i powierzchni zlewni zwrócili uwagę Chow i in. [1988]. Ten sam niustalony charakter dotyczy formowania się spływu powierzchniowego oraz przepływu w kanałach odprowadzających.

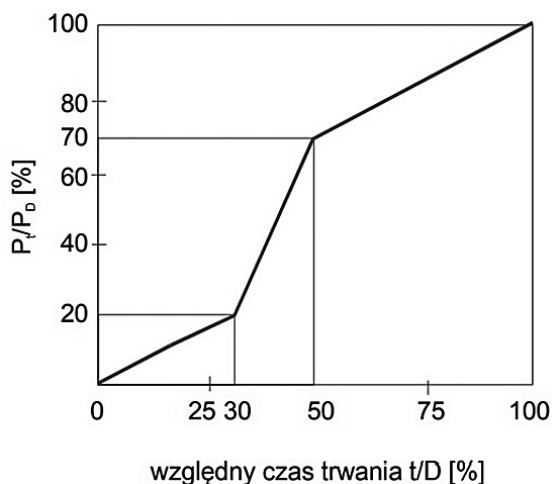
Można wyróżnić dwa zasadnicze typy rozkładu wysokości opadu: blokowy ze stałym natężeniem oraz z natężeniem maksymalnym, które może wystąpić na początku, w środku oraz na końcu badanego czasu. Zgodnie z zaleceniami DVWK, najlepszą alternatywą jest przyjęcie takiego rozkładu deszczu, który swoją kulminację ma w środkowej części okresu.

Wedle tych założeń w pierwszych chwilach trwania deszczu (30% czasu trwania) spada około 20% sumy opadu. W następnych 20% czasu spada 50% opadu, w pozostałych 50% czasu trwania opadu spada ostatnie 30% sumy deszczu [DVWK, 1984]. Zależność ta zaprezentowana została na rysunku 1.

Wyniki Banasika [2009] i Wałęgi [2012] wskazały, iż całkowicie powinno się wykluczyć opad blokowy, gdyż ten posiada zakłamaną wielkość przepływu kulminacyjnego, który jest znacznie niższy w porównaniu do innych rozkładów.

OPIS OBSZARU BADAWCZEGO

Obszarem testowania problemu badawczego jest rzeka Bystrzyca, która stanowi lewostronny dopływ Nysy Kłodzkiej, do której uchodzi na wy-



Rys. 1. Dystrybuanta rozkładu czasowego opadu według DVWK [1984]

Fig. 1. Rainfall distribution in time according to DVWK [1984]

sokości około 364,00 m n.p.m. w miejscowości Bystrzyca Kłodzka. Jej długość wynosi 21,5 km, zaś powierzchnia zlewni wynosi 64,5 km².

Zlewnia Bystrzycy jest w większości zalesiona. Grunty orne i pastwiska są reprezentowane w niewielkim stopniu, a obszarów zabudowanych jest niewiele i skupiają się głównie w obrębie miejscowości Bystrzyca Kłodzka. Poddając analizie system rzeczny można zauważyć, że w bliskości miast takich jak Kłodzko czy Bystrzyca Kłodzka tworzą się niebezpieczne węzły hydrograficzne, które mają wpływ na formowanie się wezbrań. Podłoże omawianego obszaru stanowią z reguły gliny o niewielkiej miąższości, charakteryzujące się średnią przepuszczalnością wody. Jak podaje Opracowanie charakterystyki zlewni bilansowej rzeki Nysy Kłodzkiej [2013], roczne sumy opadów w Ziemi Kłodzkiej kształtują się na poziomie 900 mm, co przekracza średnie sumy opadów dla Polski o około 300 mm. Sprawa to że na omawianym obszarze jest jednym z najbardziej powodziogennych obszarów Polski. Wszystko to składa się na wezbranio- i powodziogenny charakter zlewni Ziemi Kłodzkiej, która bardzo szybko reaguje na opad [Tokarczyk, Olearczyk 2011].

Zlewnia przedmiotowego ciek jest kontrolowana i zamyka ją wodowskaz Bystrzyca Kłodzka, który znajduje się w 0,10 kilometrze biegu rzeki. Na podstawie danych pozyskanych od IMGW-PIB sporządzono tabelę (tab. 1) prezentującą wielkości przepływów charakterystycznych i prawdopodobnych dla wielolecia 1951–2010.

W celu sprawdzenia jak wiernie model oddaje warunki rzeczywiste, założono cztery warianty rozkładu czasowego opadu, które zostały przetestowane na podstawie dwóch wezbrań historycznych z roku 2015 i 2016. Kolejne scenariusze przyjmujące rozkład opadu zostały określone przy użyciu statystycznego rozkładu BETA. Pierwszy wariant dodatkowo opiera się o niemiecką metodę rozkładu natężenia w czasie – DVWK. Pozostałe trzy bazowały na odpowiednim dobieraniu współczynników rozkładu α i β tak by kumulacja opadu wystąpiła kolejno w szóstej, dwunastej oraz osiemnastej godzinie trwania deszczu.

METODYKA

Na potrzeby realizacji pracy zbudowano model typu opad-odpływ przy zastosowaniu oprogramowania HEC-HMS. W tym celu dokonano rozbicia zlewni na zlewnie dopływów skupionych i zlewnie różnicowe, co prezentuje rysunku 2.

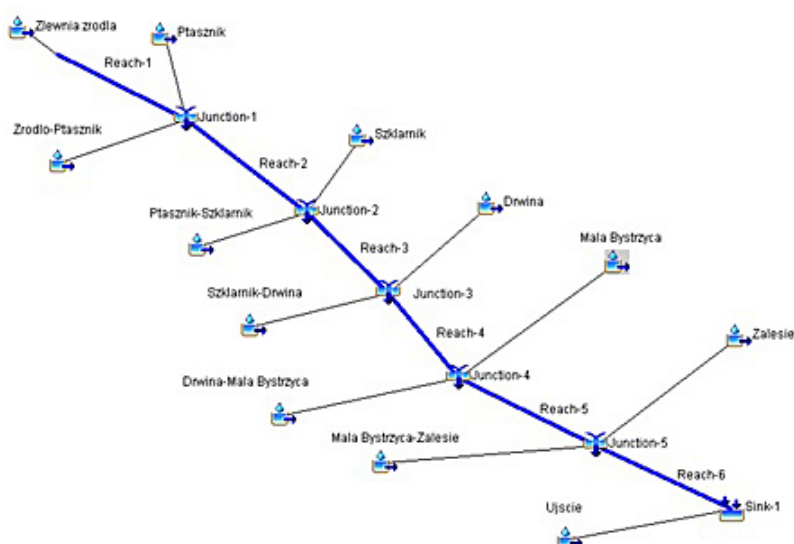
Dla zobrazowania zagospodarowania terenu wykorzystano zasoby CORINE Land Cover [2012], zaś pokrycie według typów i rodzajów gleb pochodzi z mapy glebowo-rolniczej w skali 1:25000 oraz z danych Banku Danych o Lasach [2017]. Dzięki temu określono wielkość parametru CN, jako wypadkowej klasy glebowej i pokrycia terenu. Przestrzenne zróżnicowanie pokrycia terenu oraz występowania typów i rodzajów gleb na obszarze zlewni Bystrzycy prezentuje rysunek 3.

W oparciu o wartość średniego deszczu sporządzono hietogramy wykorzystując statystykę rozkładu beta, opisaną funkcją rozkładu prawdopodobieństwa [Juszczuk, 2008]:

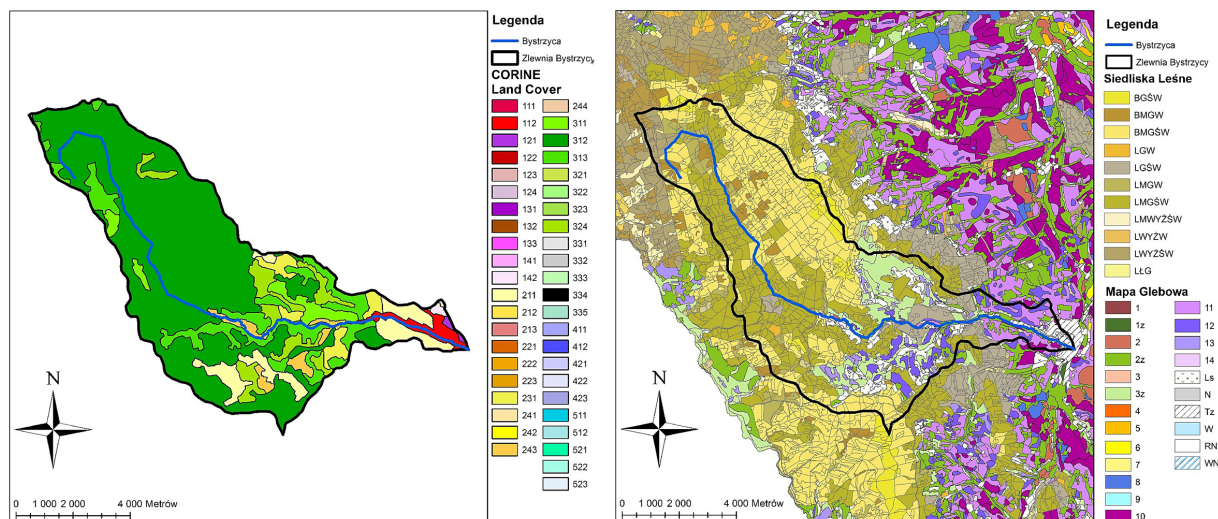
$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}$$

Tabela 1. Przepływy charakterystyczne i prawdopodobne dla wodowskazu Bystrzyca Kł. na rzece Bystrzycy
Table 1. Characteristics and probable flows for Bystrzyca Kł. water gauge in the Bystrzyca River

Przepływ	NNQ	SSQ	WWQ	p=10%	p=1%	p=0,5%	p=0,2%	p=0,1%
Wartość [m ³ ·s ⁻¹]	0,14	1,00	46,10	16,50	32,90	39,00	47,80	55,20



Rys. 2. Schemat podziału modelu zlewni Bystrzycy w programie HEC-HMS
 Fig. 2. Distribution of the Bystrzyca catchment model in the HEC-HMS program



Rys. 3. Przestrzenne zróżnicowanie pokrycia terenu oraz występowania typów i rodzajów gleb na obszarze zlewni Bystrzycy

Fig. 3. Spatial diversity of land cover types and soil types in the Bystrzyca catchment area

gdzie: α, β – parametry rozkładu wpływające na jego kształt; $\alpha > 0$ i $\beta > 0$ [-]

Pierwszym krokiem było obliczenie Δt , czyli kroku czasowego symulacji:

$$\Delta t = h * \left(\frac{1}{24}\right)$$

gdzie: h – liczba godzin

Dalej należało obliczyć pochodną f' , zaś znając wartości pochodnej obliczono współczynnik rozdziału opadu x z zależności:

$$x = \frac{f'}{24} \quad (4)$$

Ostatni krokiem było obliczenie wartości opadu w danej godzinie – P_i :

$$P_i = P \cdot x$$

gdzie: P – opad całkowity uzyskany z metody wieloboków równego zadeszczenia [mm]

Na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto cztery warianty symulacji różniących się hietogramami obrazującymi czasową zmienność wielkości opadu. Pierwszy odpowiadający metodzie DVWK, drugi z kulminacją opadu w szóstej godzinie jego trwania, trzeci z kulminacją w dwunastej godzinie opadu i czwarty zakładający opad z kulminacją w osiemnastej godzinie jego trwania.

By ocenić, który z przyjętych w niniejszej pracy rozkładów opadu najlepiej odzwierciedli fałę rzeczywistą powstającą w przekroju ujścia Bystrzycy do Nysy Kłodzkiej w stosunku do fali symulowanej wykorzystano następujące kryteria:

- różnica w wartości przepływu kulminacyjnego,
- różnica w czasie osiągnięcia kulminacji,
- różnica w objętości fali wezbraniowej.

Dodatkowo by jednoznacznie stwierdzić wiarygodność modelu, przy użyciu programu HEC-HMS określono następujące statystyki jakości modelu:

- współczynnik efektywności modelu Nash-Sutcliffe (NS), który służy do pokazywania zmienności przepływu w modelu. Jego wartość zawiera się w przedziale $-\infty$ do 1, przy czym wartość 1 przyjmują tylko modele o idealnym dopasowaniu wyników symulacji do wartości rzeczywistych; wynik powyżej 0 uznaje się za dobry, zaś poniżej 0 za niesatysfakcjonujący;
- średni błąd bezwzględny MAE (mean absolute error), informuje o średniej odchyleniu od wartości rzeczywistej, a więc jaki błąd miarowy występuje w symulacji;
- pierwiastek błędu średniokwadratowego RMSE (root mean squared error), jest to pierwiastek z sumy kwadratów błędów szacowania w modelu; im mniejszą wartość przyjmuje tym lepiej.

WYNIKI

W oparciu o dane opadowe uzyskane z IMGW-PIB dla czterech sąsiadujących posterunków opadowych obliczono średnią wartość deszczu na obszarze zlewni rzeki Bystrzyca. Posłużono się metodą wieloboków równego zadeszczenia, a obliczenia przeprowadzono dla wezbrania, które wystąpiło 13 czerwca 2015. Wartość dobową opadu średniego rozłożonego na powierzchni zlewni w tym okresie wyniosła 22,1 mm. Był to opad ciągły, który nie był dłuższy niż doba.

Na rysunku 4 pokazano kształt hietogramów opadu określonych za pomocą rozkładu beta, oraz powstałe w ich wyniku hydrogramy odpływ ze zlewni w czterech kombinacjach różniących się czasem kulminacji opadu.

Znając przebieg fali wezbraniowej z 13.06.2015 roku (rys. 5) dla wszystkich wariantów modelowania dokonano zestawienia hydrogramu symulowanego z rzeczywistym.

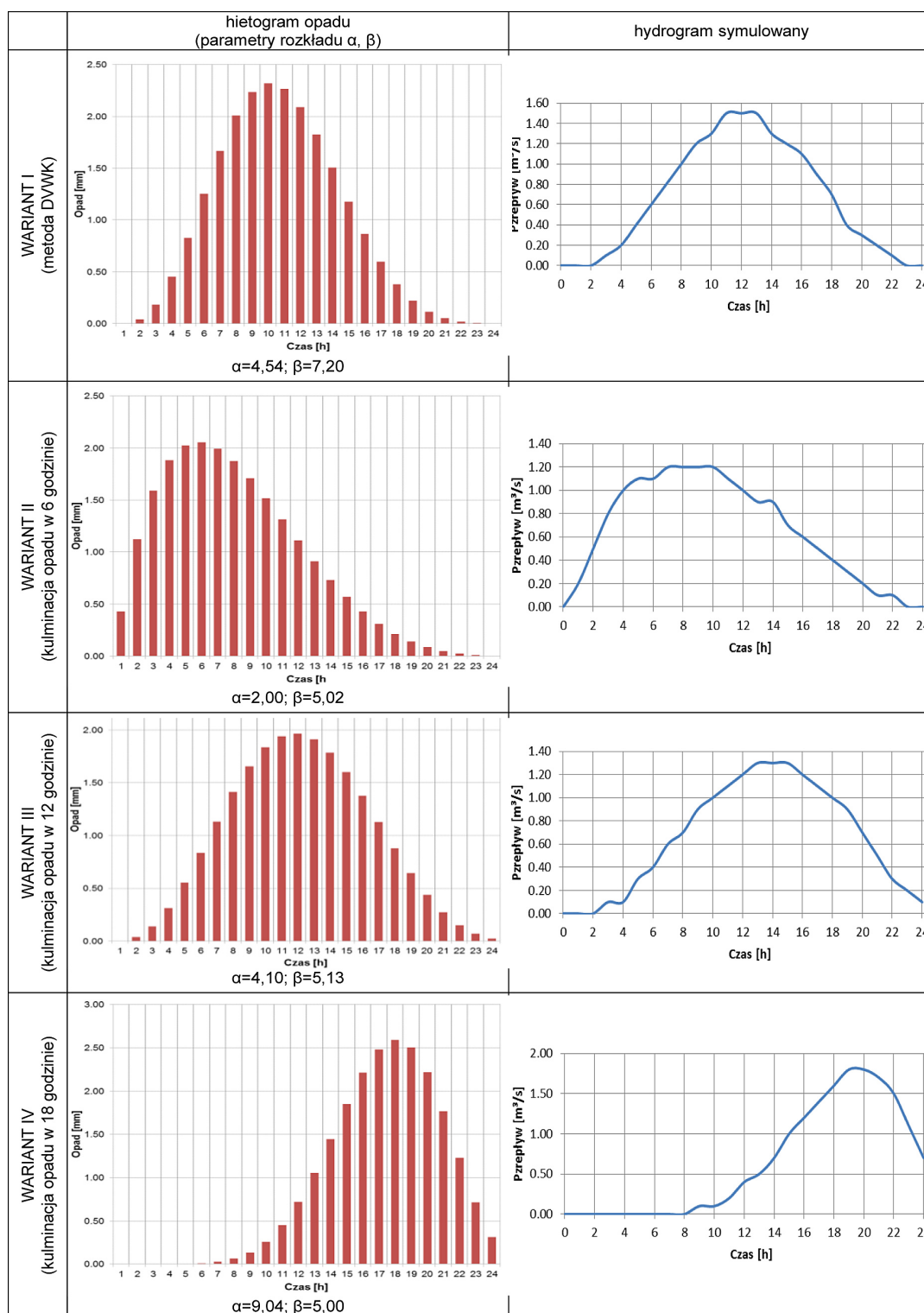
PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Porównano fałę dla wezbrania z dnia 13.06.2015 r. z falami symulowanymi w czterech wariantach rozkładu opadu i na tej podstawie wyliczono procentową różnicę zarówno dla ob-

Tabela 2. Zestawienie parametrów hydrogramów symulowanych z obserwowanym w dniu 13.06.2015 roku dla 4 wariantów rozkładu opadu

Table 2. Comparison of parameters between simulated hydrograms with the observed one in 13.06.2015 for 4 variants of precipitation distribution

Miara		Wartość symulowana	Wartość obserwowana	Różnica	Różnica [%]
WARIANT I	Objętość [1000 m ³]	58,7	79,9	-21,1	-26,47
	Przepływ maksymalny [m ³ ·s ⁻¹]	1,50	1,30	0,2	14,2
	Moment kulminacji	12:00	14:00	2	–
	Czas wystąpienia środka masy wezbrania	12:11	13:28	1:17	–
WARIANT II	Objętość [1000 m ³]	58,6	79,9	-21,3	-26,66
	Przepływ maksymalny [m ³ ·s ⁻¹]	1,20	1,30	-0,1	-7,4
	Moment kulminacji	09:00	14:00	5	–
	Czas wystąpienia środka masy wezbrania	09:44	13:28	3:44	–
WARIANT III	Objętość [1000 m ³]	58,3	79,9	-21,6	-27,02
	Przepływ maksymalny [m ³ ·s ⁻¹]	1,30	1,30	0	-1,1
	Moment kulminacji	14:00	14:00	0	–
	Czas wystąpienia środka masy wezbrania	13:47	13:28	-0:19	–
WARIANT IV	Objętość [1000 m ³]	55,5	79,9	-24,4	-30,57
	Przepływ maksymalny [m ³ ·s ⁻¹]	1,80	1,30	0,5	36,2
	Moment kulminacji	20:00	14:00	-6	–
	Czas wystąpienia środka masy wezbrania	18:24	13:28	-5:02	–

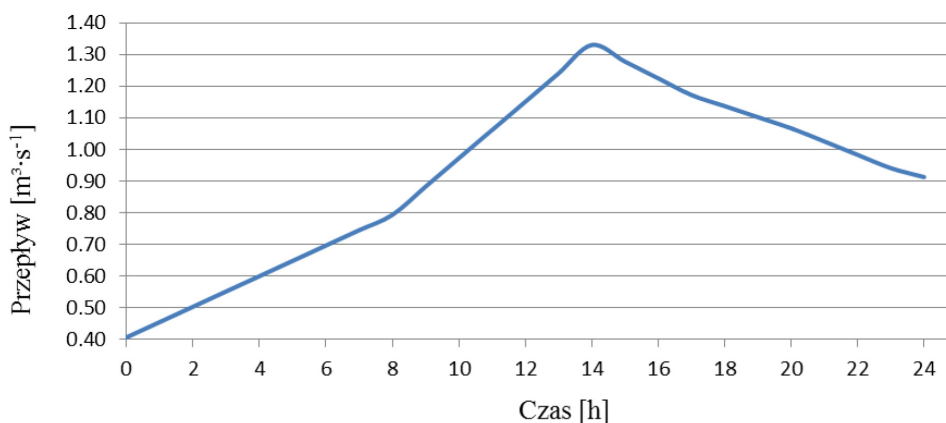


Rys. 4. Warianty hietogramów opadu (13.06.2015) i wywołane nimi wezbrania

Fig. 4. Variants of precipitation (13.06.2015) and floods caused by them

jętości fali jak i maksymalnej wartości przepływu. Wykorzystano przy tym metodę „peak-weighted root mean square error”, czyli średniego błędu kwadratowego przepływu maksymalnego, która pokazuje procentowe różnice pomiędzy symulowaną a obserwowaną objętością prze-

pływu, wartością kulminacji fali a także czasem wystąpienia kulminacji oraz czasem wystąpienia geometrycznego środka masy wezbrania. Wartości ujemne wskazują na to, że wartości obserwowane są większe od wartości symulowanych. Zestawienie zaprezentowano w tabeli 2.



Rys. 5. Hydrogram fali rzeczywistej z 13.06.2015 roku na wod. Bystrzyca Kłodzka

Fig. 5. Real wave hydrogram from 13.06.2015 on Bystrzyca Kłodzka water gauge

Po wstępnej analizie uzyskanych danych modelowych można odrzucić rozkład zakładający kulminację opadu wg metody DVWK (wariant I) i w osiemnastej godzinie jego trwania (wariant IV). Aby stwierdzić, który z pozostałych rozkładów czasowej zmienności opadu jest najlepszy sięgnięto do statystyki jakości modelu czyli: współczynnik efektywności modelu Nash-Sutcliffe (NS), średni błąd bezwzględny MAE, pierwiastek błędu średniokwadratowego RMSE. Dla wariantu z opadem z kulminacją w 6 godzinie trwania NS wynosiło -2,53, MAE – 0,4 m³·s⁻¹ i RMSE – 0,5 m³·s⁻¹, a dla opadu z kulminacją w 12 godzinie trwania NS wynosiło -0,26, MAE – 0,2 m³·s⁻¹ i RMSE – 0,3 m³·s⁻¹.

Należy uznać, iż wariant III z kulminacją opadu w dwunastej godzinie trwania jest reprezentatywny dla wezbrania z czerwca 2015 r., ponieważ najlepiej odtwarza kształt rzeczywistej fali wezbraniowej w zlewni rzeki Bystrzycy.

Tak więc powszechnie stosowany w rozwiązywaniu tego typu zagadnień model proponowany przez DVWK nie zawsze dobrze oddaje warunki panujące w zlewni podczas tworzenia się wezbrania. Na przypadku samej tylko Bystrzycy, która jest zlewnią górską z dużym udziałem powierzchni zalesionych, ciężko wyciągać ogólne wnioski, jednak powyższy przykład świadczy dobitnie, że pozostawienie modelownia hydrologicznego bez kalibracji i weryfikacji może w efekcie powodować duże błędy przekładające się na jakość uzyskanych wyników.

BIBLIOGRAFIA

1. Banasik K. 2009. Wyznaczenie wezbrań powodziowych w małych zlewniach zurbanizowanych. SGGW, Warszawa.
2. Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. 1988. Applied Hydrology. Nowy Jork.
3. DVWK. Arbeitsanleitung zur Anwendung Niederschlag-Abflub-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Regeln 113. Teil II: Synthese, Verlag Paul Parey, Hamburg 1984.
4. Juszczak P. 2008. Rozkłady statystyczne. Instytut Informatyki Uniwersytetu Śląskiego.
5. Miler A. 2012. Wpływ ewentualnych zmian użytkowania terenu na odpływ wezbraniowy z reprezentatywnej zlewni leśnej pojezierza krajańskiego. Polska Akademia Nauk.
6. RZGW we Wrocławiu. 2013. Opracowanie charakterystyki zlewni bilansowej rzeki Nysy Kłodzkiej.
7. Soil Conservation Service. 1972. USDA-Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, Sec. 4. Hydrology, Waszyngton, D.C.
8. Soil Conservation Service, 1986. Urban hydrology for small watersheds, Technical Report, 55, US Department of Agriculture, Waszyngton, D.C.
9. Tokarczyk T., Olearczyk D. 2011. Hydrografia Ziemi Kłodzkiej. Starostwo Powiatowe w Kłodzku
10. Wałęga A. 2012. Próba opracowania zależności regionalnych do obliczania parametrów syntetycznego hydrogramu jednostkowego Snydera. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 2 (3), 5–16.