

Andrzej Wałęga

**PRÓBA OPRACOWANIA
ZALEŻNOŚCI REGIONALNYCH
DO OBLICZANIA PARAMETRÓW SYNTETYCZNEGO
HYDROGRAMU JEDNOSTKOWEGO SNYDERA**

***AN ATTEMPT TO ESTABLISH REGIONAL DEPENDENCIES
FOR THE PARAMETER CALCULATION
OF THE SNYDER'S SYNTHETIC UNIT HYDROGRAPH***

Streszczenie

W artykule dokonano próby opracowania zależności regionalnych do określenia parametrów w modelu Snydera. Model ten należy do grupy syntetycznych hydrogramów jednostkowych, którego parametry są ustalane w oparciu o charakterystyki zlewni. To stwarza możliwość jego stosowania w zlewniach niekontrolowanych do obliczeń przepływów maksymalnych prawdopodobnych oraz konstruowania fal hipotetycznych. W praktyce model ten jest stosowany powszechnie na świecie, natomiast w Polsce jest on zalecany do praktycznego wykorzystania, jednak z uwagi na brak ustalonych wartości parametrów modelu właściwych dla naszych warunków jego stosowanie jest mało wiarygodne. Optymalizacja parametrów modelu została przeprowadzona dla wybranych epizodów opad-odpływ w zlewni Rudawy, Kamienicy, Grabinki, Stobnicy, Jasiołki i Wielopolki. Dane hydrologiczne wykorzystane w obliczeniach zostały udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie oraz pochodziły z Roczników hydrologicznych dla dorzecza Wisły. Analiza wykazała, że model Snydera bardzo dobrze lub dobrze opisuje obserwowane wezbrania (wartości współczynnika efektywności E wahały się od 68 do 93%). Wykorzystując analizę regresji wielokrotnej opisano wartości parametrów modelu Snydera, które są uzależnione od kształtu zlewni, wyrównanego spadku cieku oraz parametru CN charakteryzującego pokrycie zlewni i przepuszczalność podłoża. Mimo, że wartości współczynnika korelacji wielokrotnej R w opracowanych zależnościach nie są istotne statystycznie, co wynika głównie z ograniczonej liczby danych wy-

korzystanych w analizie, to opracowane zależności można stosować w praktyce w obliczeniach parametrów modelu Snydera w zlewniach niekontrolowanych. Należy jednak pamiętać o potrzebie dalszych badań nad weryfikacją opracowanych zależności, co potwierdzi zasadność ich stosowania w obszarze Polski.

Słowa kluczowe: wezbranie, syntetyczny hydrogram jednostkowy Snydera, model HEC-HMS, zależności regionalne

Summary

The article attempts to establish regional dependencies for calculation of the Snyder's model parameters. This model belongs to a group of synthetic unit hydrographs, whose parameters are determined based on the characteristics of catchments. This creates the possibility to use this model in uncontrolled catchments to calculate maximum probable flows and to construct hypothetical waves. In practice, this model is used worldwide. It is recommended for practical use in Poland, however due to the lack of established values of model parameters specific to Polish conditions, its use is rather unreliable. The optimization of the model parameters was carried out for the selected episodes of rainfall-runoff in the catchments of Rudawa, Kamienica, Grabinka, Stobnica, Jasiolka and Wielopolka. Hydrological data used in the calculations were provided by the Institute of Meteorology and Water Management National Research Institute in Warsaw and were derived from the Annals of hydrology for the Vistula basin. The analysis revealed that the Snyder's model very well or well describes the observed flooding incidents (values of the effectiveness ratio E ranged from 68 to 93%). The parameter values of the Snyder's model, which depend on the shape of the catchments, levelled slope of the watercourse and the CN parameter, characterizing the watershed's coverage and ground permeability, were described using the multiple regression analysis. Although values of the multiple correlation coefficient R are not statistically significant in the established dependencies, which mainly results from the limited number of data used in the analysis, establishing of the dependencies may be applied in practice in the calculation of the Snyder's model parameters in uncontrolled catchments. It should however be remembered that there is still the need for further research to revise the established dependencies, which should confirm the validity of their application in Poland.

Key words: flooding, Snyder's synthetic unit hydrograph, HEC-HMS model, regional dependencies

WPROWADZENIE

Prawidłowe określenie wartości przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia i kształtu hydrogramów wezbrań dla różnych scenariuszy hydrologicznych jest podstawą do właściwego zaprojektowania stref zagrożenia powodziowego w dolinach rzecznych. Jedną z powszechniej stosowanych metod określania wspomnianych charakterystyk, zwłaszcza w zlewniach niekontrolowanych, są hydrologiczne modele typu opad-odpływ.

Coraz częściej na świecie stosowane są syntetyczne hydrogramy jednostkowe Snydera, Clarka, Grey'a czy oparte na funkcjach gęstości prawdopodobieństwa beta, Weibulla, gamma, Chi-kwadrat [Aron i White 1982, Bhunya i in. 2007, Haktanir i Sezen 1990, Wałęga 2011]. Istotą syntetycznych hydrogramów jednostkowych jest to, iż ich parametry są określane w oparciu o charakterystyki zlewni, a więc mogą być stosowane w obliczeniach hydrologicznych w zlewniach niekontrolowanych. Niestety parametry większości syntetycznych hydrogramów zostały określone dla konkretnych warunków lokalnych, występujących często w innych strefach klimatycznych niż są obserwowane w Polsce. Dlatego by stosować te metody w Polsce należy uprzednio dokonać procedury kalibracji wartości parametrów dla danego regionu, a następnie opisać je w postaci funkcji, gdzie zmiennymi niezależnymi będą charakterystyki zlewni.

Celem pracy jest ocena wartości parametrów syntetycznego hydrogramu jednostkowego Snydera oraz ustalenie funkcji wiążącej wartości tych parametrów z charakterystykami zlewni.

Z uwagi na zróżnicowane warunki formowania się wezbrań na obszarze kraju, analizy zostały przeprowadzone w wybranych zlewniach na obszarze karpackiego dorzecza Wisły, które to należy do najbardziej powodziogennych obszarów w Polsce [Model ... 2000, Uchwała, nr 151/2011]. Uwagę skupiono na hydrogramie jednostkowym Snydera z uwagi na jego powszechność w zastosowaniu na świecie i niewielką liczbę parametrów stosunkowo łatwych do ustalenia. Ponadto ten hydrogram jest zalecany przez Stowarzyszenie Hydrologów Polskich do transformacji opadu efektywnego w odpływ bezpośredni w zlewniach niekontrolowanych [Metodyka ... 2010].

OBSZAR BADAŃ I METODYKA

Badania przeprowadzono na obszarze karpackiego dorzecza Wisły w następujących zlewniach: Rudawy – przekrój Balice, Kamienicy – przekrój Nowy Sącz, Wielopolki – przekrój Brzeźnica, Grabinki – przekrój Grabinianka, Stobnicy – przekrój Głowaczowa i Jasiołki – przekrój Jasło. Podstawowe charakterystyki zlewni przedstawia tabela 1.

W tabeli tej zestawione charakterystyki, które są istotne z punktu widzenia hydrogramu Snydera. Charakterystyki zlewni zostały ustalone w oparciu o Mapę Podziału Hydrograficznego Polski [Atlas ... 2005], mapy topograficzne oraz ortofotomapy. Analizowane zlewnie można zakwalifikować do średniej wielkości – ich powierzchnia waha się od niespełna 219 do prawie 513 km². Zlewnie Rudawy, Wielopolki, Stobnicy i Grabinki można zakwalifikować jako wyżynne, a Jasiołki i Kamienicy do górskich. Wszystkie zlewnie można uznać za naturalne, gdyż stopień uszczelnienia wynosi około 5%.

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki analizowanych zlewni
Table 1. The basic characteristics of the studied catchments

Zlewnia	A [km ²]	L _{rz} [km]	L _{cA} [km]	i _r [m·m ⁻¹]
Rudawa	282,85	36,09	22,1	0,0025
Kamienica	237,03	33,08	23,9	0,0103
Jasiołka	512,91	81,22	33,25	0,0074
Wielopolka	478	57,36	30,84	0,0023
Stobnica	335,84	45,75	20,72	0,00232
Grabinka	218,68	32,82	17,58	0,000731

A – powierzchnia zlewni, L_{rz} – długość rzeki od źródeł do przekroju wodowskazowego, L_{cA} – odległość od przekroju wodowskazowego do środka ciężkości zlewni, i_r – wyrównany spadek cieku liczony z zależności: $i_r = 0.6 \cdot (H_{zr} - H_{prz}) / L_{rz}$, H_{zr} – rzędna źródeł, H_{prz} – rzędna przekroju wodowskazowego

Dla każdej zlewni wyselekcjonowano największe epizody opad-odpływ z półrocza letniego o kroku czasowym równym 24 godz. Dane opadowe pochodziły ze stacji opadowych zlokalizowanych w obszarze danej zlewni lub w sąsiedztwie. Do dalszych analiz wykorzystywano średni opad na powierzchni zlewni określony metodą wielokątów Thiessena. W przypadku, gdy w zlewni występowała tylko jedna stacja opadowa, opad punktowy był redukowany z wykorzystaniem nomogramów podawanych przez Ven Te Chow i in [1988]. Dane hydro-meteorologiczne dotyczyły lat: 1980, 1981, 1987, 1997, 2001, 2005 oraz 2010 i zostały udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej - Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie oraz pochodziły z Roczników hydrologicznych dla dorzecza Wisły.

Hydrogram jednostkowy Snydera został opracowany przez Snydera w oparciu o obserwowane hydrogramy zanotowane w rejonie Appalachów. Do określenia kształtu hydrogramu jednostkowego konieczne jest ustalenie przepływu kulminacyjnego, czasu opóźnienia i czasu do kulminacji w funkcji charakterystyk zlewni [Ponce 1989]. Na podstawie analizy dużej liczby hydrogramów Snyder wyprowadził następujące równanie na czas opóźnienia:

$$T_L = C_t(L_{rz}L_{cA})^{0,3} \quad (1)$$

gdzie:

- T_L – czas opóźnienia w godz.,
- C_t – współczynnik uzależniony od spadku zlewni i związany z retencją zlewni,
- L_{rz} – odległość wzdłuż głównego cieku od przekroju ujściowego do przecięcia suchej doliny z działem wodnym w km,
- L_{cA} – odległość wzdłuż głównego cieku od przekroju ujściowego do środka ciężkości zlewni w km.

Przepływ w kulminacji obliczany jest z zależności:

$$Q_p = \frac{2,78 \cdot C_p \cdot A}{T_L} \quad (2)$$

gdzie:

- Q_p – przepływ w kulminacji hydrogramu jednostkowego wywołany opadem efektywnym o wysokości 1 cm, w $m^3 \cdot s^{-1}$,
- A – powierzchnia zlewni w km^2 ,
- C_p – współczynnik empiryczny wynikający uproszczenia kształtu hydrogramu do trójkąta [Ponce 1989].

W pierwszym etapie obliczeń dokonano automatycznej kalibracji parametrów modelu w oparciu o następujące miary:

- współczynnik efektywności E Nasha i Sutcliffe [1970]:

$$E = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o(t) - Q_s(t))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o(t) - \bar{Q}_o)^2} \right] \quad (3)$$

- procentowy błąd przepływu w kulminacji [Cunderlik i Simonovic 2004]:

$$PEPF = 100 \left[\frac{Q_0 - Q_s}{Q_0} \right] \quad (4)$$

- procentowy błąd objętości fali [Cunderlik i Simonovic 2004]:

$$PEV = 100 \left[\frac{V_0 - V_s}{V_0} \right] \quad (5)$$

gdzie:

- N – jest liczbą rzędnych hydrogramu,
- i – jest indeksem zmieniającym się od 1 do N ,
- $Q_{o(t)}$ – jest i -tą rzędną obserwowanego hydrogramu,
- $Q_{s(t)}$ – jest i -tą rzędną symulowanego hydrogramu,
- \bar{Q}_o – jest średnią wartością rzędnych obserwowanego hydrogramu,
- Q_o i Q_s – przepływ obserwowany i symulowany w kulminacji,
- V_o i V_s – objętość fali obserwowanej i symulowanej.

Automatyczna kalibracja parametrów modelu polegała na iteracyjnym doborze parametrów do momentu osiągnięcia minimum funkcji celu. W celu minimalizacji funkcji celu (3) do (5) zastosowano metodę jednolitych gradientów polegającą na oszacowaniu wartości jednego parametru przy utrzymywaniu pozostałych na stałym poziomie [Cunderlik i Simonovic 2004]. Impulsem wejściowym w modelu był opad efektywny, który określono za pomocą powszechnego

nie stosowanej na świecie metody NRCS-CN (była metoda SCS) [Maidment 1993]. Wartości parametru CN ustalono drogą optymalizacji wykorzystując zaobserwowane zjawisko opad-odpływ. W tym celu dokonano podziału całkowitego hydrogramu odpływu na odpływ gruntowy (bazowy) i odpływ powierzchniowy. Za początek spływu powierzchniowego przyjęto punkt na hydrogramie, od którego obserwuje się wyraźny wzrost przepływów, a za koniec odpływu powierzchniowego przyjęto punkt przecięcia ramienia opadającego hydrogramu z krzywą recesji w układzie półlogarytmicznym. Objętość tak powstałego hydrogramu spływu powierzchniowego oznacza tzw. odpływ bezpośredni. W oparciu o szereg symulacji zmieniano wartości parametru CN do momentu, aż wysokość opadu efektywnego była zbliżona do wysokości odpływu bezpośredniego określonego dla obserwowanego hydrogramu jednostkowego.

Uzyskane w wyniku optymalizacji parametry modelu C_p , C_t oraz T_L zostały poddane analizie statystycznej w celu ustalenia równań wiążących wymienione parametry z charakterystykami zlewni. Zbiór potencjalnych zmiennych niezależnych tworzyły charakterystyki zlewni wykazujące najwyższe wartości współczynnika korelacji z parametrami modelu. W dalszej kolejności dokonano wyboru zespołu zmiennych optymalnych wykorzystując metodę opisaną przez Kaczmarka [Ozga-Zielińska i Brzeziński 1997]. Ostatecznie dla wybranych zmiennych niezależnych ustalono zależność regresyjną z parametrami modelu wykorzystując metodę regresji wielokrotnej. Weryfikację uzyskanych zależności przeprowadzono w zlewni Mleczy w przekroju Gorliczyna. Wszystkie obliczenia przeprowadzono w programie HEC_HMS 3.4 opracowanym przez Korpus Inżynierów Armii Amerykańskiej [Hydrologic ... 2009].

WYNIKI BADAŃ

W tabeli 2 zestawiono wartości parametrów C_p , C_t oraz T_L wraz z miarami opisującymi jakość modelu w poszczególnych zlewniach.

Tabela 2. Wartości parametrów modelu Snydera (średnie geometryczne) uzyskane na etapie kalibracji w analizowanych zlewniach oraz miary jakości modelu
Table 2. The values of the Snyder's model parameters (geometric means) obtained during the calibration phase of the analyzed catchments and the measures of the model quality

Zlewnia	C_p [-]	C_t [-]	T_L [h]	E [%]	PEP [%]	PEV [%]
Rudawa	0,46	3,88	28,78	91,5	4,95	16,63
Kamienica	0,524	3,24	24,0	93,0	4,7	10,5
Jasiołka	0,54	2,15	23,0	79,0	11,5	9,25
Wielopolka	0,8	4,03	38,0	70,0	4,8	29,9
Stobnica	0,72	2,53	19,8	84,0	11,1	19,16
Grabinka	0,7	4,48	30,2	68,0	6,0	27,0

Z wyników przedstawionych w tabeli 2 wynika, że wartości wszystkich parametrów modelu Snydera wahają się w szerokich granicach, co wynika z odmiennego charakteru rozpatrywanych zlewni. Wartości parametru C_p wahały się od 0,46 w zlewni Rudawy do 0,8 w Wielopolce. Parametr ten decyduje o smukłości fali i jest zależny od zdolności retencyjnych zlewni. W prezentowanych badaniach wartość współczynnika C_p mieściła się w granicach podawanych przez innych autorów [Belete 2009, Ponce 1989]. Nieco mniejsza zmienność występuje w przypadku parametru C_t – jego wartości wahają się od 2,15 w zlewni Jasiołki do 4,48 w Grabince. Daje się zauważyć zależność tego parametru od charakteru zlewni – w zlewniach górskich charakteryzujących się mniejszą retencją zlewni przyjmuje on z reguły najniższe wartości. Uzyskane wartości tego parametru są znacznie wyższe od podawanych przez Snydera, gdzie wahają się od 1,35 do 1,65 [Ponce 1989] oraz uzyskanych przez Belete [2009] w zlewni Awash i Tekeze w Etiopii (C_t waha się od 0,362 do 0,736). Belete podaje także, że według wielu badaczy wartość C_t waha się w szerokich granicach od 0,3 do 6,0, a tak znaczna zmienność tego współczynnika jest uzależniona od czynników lokalnych. Oceniając przydatność modelu Snydera do opisu wezbrań opadowych w analizowanych zlewniach wg kryteriów podanych przez Moriasiego i in. [2007] należy stwierdzić, że uzyskał on dobrą ocenę. Najwyższą wartość współczynnika efektywności E model uzyskał przy symulacji wezbrań w zlewni Kamienicy i Rudawy (wartość E powyżej 90%), a najniższy w zlewni Grabinki. W przypadku jedynie dwóch zlewni - wspomnianej Grabinki i Wielopolki należy uznać model za dobry, w pozostałych zlewniach wartości współczynnika E świadczą o bardzo dobrej zgodności fali obliczonej i obserwowanej. Wielkości procentowych błędów przepływów w kulminacji wahają się od 4,7 do 11,5%. Znacznie większe błędy są generowane w przypadku kryterium związanego z objętością fal. W tym przypadku wielkość błędów waha się od ponad 9% w zlewni Jasiołki do prawie 30% w Wielopolce. Znaczny wpływ na wielkość błędu PEV miał często złożony kształt hydrogramu obserwowanego, co przejawiało się także w niskich wartościach współczynnika E . Świadczy to o tym, że model Snydera najlepiej opisuje pojedyncze fale wezbrań.

W celu ustalenia zależności pomiędzy parametrami hydrogramu Snydera a charakterystykami zlewni dokonano analizy wartości współczynnika korelacji – tabela 3. W analizie wykorzystano zmienne, które w potencjalny sposób mogą opisywać parametry hydrogramu. W przypadku współczynnika C_p najwyższe wartości współczynnika korelacji uzyskano z czasem opóźnienia T_L , powierzchnią zlewni A oraz współczynnikiem kształtu $L_{Tz}L_{cA}/(i_r)^{0,5}$. Wprowadzono wartość współczynnika kształtu ponieważ m.in. badania Belete [2009] wykazały istotny wpływ tej charakterystyki na parametry modelu. Z uwagi na niewielką liczbę analizowanych zlewni, a także na nieznaczną zmienność niektórych parametrów, uzyskane współczynniki korelacji nie są istotne statystycznie.

Uzyskane zależności można tłumaczyć tym, iż wraz ze wzrostem czasu opóźnienia, a więc przy wydłużaniu się reakcji zlewni na opad zwiększa się jej zdolność retencyjna, co przejawia się w obniżaniu kulminacji i spłaszczeniu fali. Podobna sytuacja ma miejsce, gdy jako zmienną zależną przyjmujemy powierźnię zlewni – większa powierzchnia zlewni będzie sprzyjała większemu spłaszczeniu fali. Z kolei im wyższa wartość współczynnika kształtu zlewni $L_{rz}L_cA/(i_r)^{0,5}$ tym przybiera ona formę bardziej owalną, a to jak wiadomo sprzyja gwałtownej reakcji zlewni na opad i sprzyja powstawaniu bardziej smukłych fal [Soczyńska 1997], co przejawia się we wzroście współczynnika C_p .

Tabela 3. Macierz korelacji pomiędzy analizowanymi parametrami modelu i charakterystykami zlewni

Table 3. The correlation matrix between the analyzed model parameters and characteristics of the catchments

	C_p	C_t	T_L	A	CN	L_{rz}	L_c	i_r	$\frac{L_{rz}L_cA}{i_r^{0.5}}$
C_p	1,000								
C_t	0,250	1,000							
T_L	-0,653	0,779	1,000						
A	-0,621	-0,473	0,165	1,000					
CN	-0,102	-0,564	-0,886*	-0,276	1,000				
L_{rz}	0,073	-0,621	-0,062	0,944	-0,091	1,000			
L_c	0,073	-0,621	-0,062	0,944	-0,091	1,000	1,000		
i_r	-0,551	-0,537	-0,435	0,081	-0,007	0,212	0,212	1,000	
$\frac{L_{rz}L_cA}{i_r^{0.5}}$	0,563	-0,035	0,504	0,851	-0,410	0,754	0,754	-0,347	1,000

*- pogrubioną czcionką zaznaczono współczynniki korelacji istotne statystycznie na poziomie $\alpha = 0,05$

Wartości parametru C_t są najsilniej skorelowane w czasem opóźnienia T_L oraz długością rzeki i jej spadkiem. Jest to zrozumiała zależność, gdyż parametr C_t występuje we wzorze na czas opóźnienia opracowanym przez Snydera (1). Czas opóźnienia T_L jest istotnie korelowany z parametrem CN. Jest to często występująca prawidłowość, którą można rozumieć w następujący sposób: czas reakcji zlewni na opad, wyrażony przez T_L , jest silnie uzależniony od charakteru pokrycia zlewni, co ma związek z oporami ruchu; w przypadku, gdy wartość parametru CN jest wysoka mamy do czynienia z podłożem mało przepuszczalnym, a to z kolei prowadzi do szybkiego odpływu wody ze zlewni, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia czasu opóźnienia T_L .

Po wyborze pierwszego zespołu zmiennych opisujących zgodnie z wcześniej podanym postępowaniem dokonano ostatecznego ustalenia zespołu optymalnych zmiennych niezależnych. W efekcie można było przeprowadzić analizę regresji wielokrotnej, co pozwoliło na ostateczne ustalenia postaci równań wią-

żących parametry modelu Snydera z zespołem zmiennych optymalnych. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zawiera tabela 4. Procedura wyboru zespołu zmiennych optymalnych zapewniła wzajemną ich niezależność.

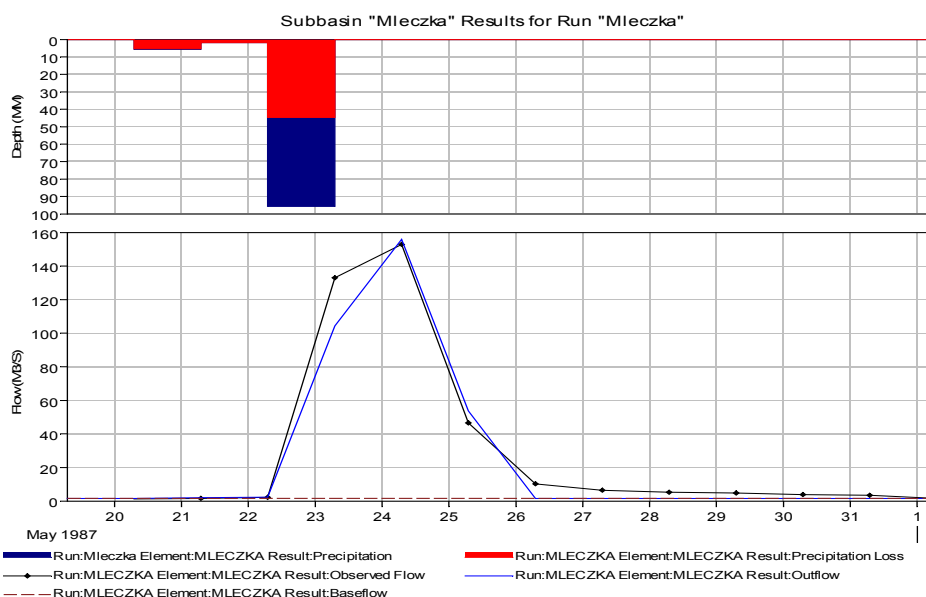
Tabela 4. Postać równań szczegółowych opisujących parametry modelu Snydera
Table 4. The detailed equations describing Snyder's model parameters

Równanie	Współczynnik korelacji R RRRwielokrotnej R	Współczynnik determinacji R ²
$T_{L1} = 55,124 - 0,394 \cdot CN + 0,0001 \cdot \frac{L_{rz}L_{cA}}{\sqrt{i_r}}$	0,9	0,81
$C_t = 6,886 - 0,038 \cdot CN - 132,014 \cdot i_r$	0,78	0,61
$T_{L2} = C_t \cdot \left(\frac{L_{rz}L_{cA}}{\sqrt{i_r}} \right)^{0,208}$	0,835	0,697
$C_p = 0,568 + 0,0046 \cdot T_L - 16,342 \cdot i_r$	0,587	0,344

Formuły na obliczenie czasu opóźnienia zostały określone w dwóch wariantach – w pierwszym, gdzie zespół zmiennych niezależnych wynikał z analizy statystycznej oraz w drugim – wykorzystano równanie opracowane i zalecane do stosowania przez Belete [2009]. W obu przypadkach uzyskano wysokie wartości współczynnika korelacji wielokrotnej R jednak nie były one istotne statystycznie na poziomie $\alpha = 0,05$. Równanie pierwsze wyjaśniało 81% wariancji natomiast drugie – niespełna 70%. W przypadku równania pierwszego czas opóźnienia T_{L1} jest uzależniony od bezwymiarowego parametru CN charakteryzującego przepuszczalność podłoża i użytkowanie oraz współczynnika kształtu $L_{rz}L_{cA}/(i_r)^{0,5}$. W drugim przypadku konieczne jest ustalenie wartości parametru C_t aby obliczyć wartość T_{L2} . Analiza regresji wykazała, że parametr ten jest zależny od parametru CN i spadku wyrównanego cieku, co jest zgodne z założeniami poczynionymi przez Snydera [Ponce 1989]. Uzyskana wartość współczynnika korelacji wielokrotnej R jest nieistotna statystycznie, a równanie wyjaśnia 61% wariancji. Porównując oba równania na obliczenie czasu opóźnienia można stwierdzić, że silniejsza zależność między zmiennymi niezależnymi a T_L występuje w przypadku pierwszego równania. Najniższą wartość współczynnika korelacji wielokrotnej R równą 0,587 uzyskano dla równania opisującego C_p . Wartości tego współczynnika są uzależnione od czasu opóźnienia T_L i spadku wyrównanego cieku i_r .

Z uwagi na brak statystycznej istotności uzyskanych wielkości współczynników korelacji wielokrotnej R, mimo iż w większości przypadku były wysokie ich wartości, konieczne jest kontynuowanie dalszych badań na większej liczbie zlewni, co pozwoli na zweryfikowanie ustalonych zależności. Niemniej jednak w celu sprawdzenia możliwości praktycznego stosowania opracowanych równań do obliczenia parametrów modelu Snydera, a w dalszej kolejności określenia

wielkości przepływów w przekrojach niekontrolowanych o podobnej charakterystyce, jak wykorzystane w badaniach, dokonano weryfikacji ustalonych równań, co przeprowadzono na przykładzie zlewni Mlecзки. Powierzchnia zlewni w przekroju wodowskazowym Gorliczyna wynosi 522 km², wyrównany spadek cieką jest równy $i_r = 0,00323 \text{ m} \cdot \text{m}^{-1}$, a parametr CN ustalony w oparciu o pokrycie terenu i warunki glebowe wyniósł 78. Obliczenia przeprowadzono dla epizodu opadowego zanotowanego w maju 1987 r. Wynik symulacji przeprowadzony w programie HEC-HMS 3.4 przedstawia rysunek 1.



Rysunek 1. Porównanie wyników symulacji wezbrania z użyciem modelu Snydera w zlewni Mlecзки

Figure 1. The comparison of flooding simulation results using the Snyder's model in the catchment of the Mlecзка river

Obliczone za pomocą wcześniej podanych wzorów wartości parametrów modelu Snydera wynoszą: $T_{L1} = 25,35 \text{ h}$, $C_p = 0,632$. Jak widać w przedstawionym rysunku uzyskano bardzo dobre wyniki symulacji – fala obliczona bardzo dobrze opisuje obserwowane wezbranie. Wyliczona wartość współczynnika efektywności E jest równa 96,9 %, $PEP = -1,91\%$ a $PEV = 11,1\%$. Dodatkowo obliczono czas opóźnienia dla drugiej formuły T_{L2} i ponownie wykonano symulacje. Wartość czasu opóźnienia T_{L2} była nieznacznie niższa od T_{L1} i wyniosła 23,55 h. Uzyskana w wyniku obliczeń fala wezbraniowa nieznacznie lepiej opisuje falę rzeczywistą w stosunku do modelu pierwszego – wartość współ-

czynnika E jest równa 98,5%. Jak wcześniej wspomniano uzyskane równania należy poddać dalszej weryfikacji na znacznie obszerniejszym materiale pomiarowym, ale mimo to wydaje się, że w praktyce powinno się stosować równanie T_{L1} do obliczania czasu koncentracji z uwagi na wyższą wartość współczynnika korelacji wielokrotnej R.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz można sformułować następujące wnioski:

1. Model Snydera ze względu na łatwość ustalenia parametrów może być stosowany w warunkach Polskich do symulacji wezbrań w zlewniach karpackiego dorzecza Wisły.

2. Wartości parametrów modelu Snydera są uzależnione od kształtu zlewni, spadku cieku i rodzaju pokrycia oraz przepuszczalności zlewni, co może być wyrażone bezwymiarowym współczynnikiem CN.

3. Wstępna weryfikacja uzyskanych zależności wykazała poprawność przyjętych założeń w ich ustalaniu, co przejawia się w bardzo dobrej ocenie jakościowej modelu, gdzie wartość współczynnika efektywności wyniosła od 68 do 93%.

4. Ustalone równania pozwolą na szerokie stosowanie modelu Snydera do symulacji wezbrań opadowych w zlewniach niekontrolowanych o podobnej charakterystyce jak opisane w pracy.

5. Ze względu na niewielką liczbę analizowanych zlewni uzyskane statystyki nie były istotne. Wynika stąd potrzeba dalszej weryfikacji ustalonych równań na szerszym materiale badawczym, aby potwierdzić możliwość ich stosowania w innych regionach Polski.

BIBLIOGRAFIA

- Aron G., White E.L. *Fitting a Gamma distribution over a synthetic unit hydrograph*. Water Resour. Bull. 18 (1), 1982, 95-98.
- Atlas Podziału Hydrograficznego Polski*. Wydawnictwo IMGW, 2005, Warszawa.
- Belete M.A. *Synthetic Unit Hydrographs in the Upper Awash and Tekeze Basins. Methods, Procedures and models*. 2009. VDM Verlag Dr Müller.
- Bhunya P. K., Berndtsson R., Ojha C. S. P., Mishra S. K. *Suitability of gamma, Chi-square, Weibull and beta distributions as synthetic unit hydrographs*. J. of Hydrology, 334, 2007, 28-38.
- Cunderlik J. M., Simonovic S. P. *Calibration, verification and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model. Report IV*. CFCAS project: Assessment of water resources risk and vulnerability to changing climatic conditions. University of Western, 2004.
- Haktanir T., Sezen N. *Suitability of two-parameter Gamma distribution and three-parameter Beta distribution as synthetic hydrographs in Anatolia*. Hydrol. Sci. J. 35 (2), 1990, 167-184.

- Hydrologic Modelling System HEC-HMS. User's Manual.* US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. 2009.
- Maidment D.R. *Handbook of Hydrology.* 1993, McGraw-Hill.
- Metodyka obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ. Raport końcowy.* 2010. Stowarzyszenie Hydrologów Polskich, maszynopis, Warszawa.
- Model kompleksowej ochrony przed powodzią w obszarze dorzecza górnej Wisły na przykładzie woj. Małopolskiego.* 2000. Red. Maciej Maciejewski. IMGW w Krakowie.
- Moriasi D.N., Arnold J.G., van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L.. *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.* American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-2351, vol. 50 (3), 2007,885-900.
- Nash J. E., Sutcliffe J. V. *River flow forecasting through conceptual models, Part-I: a discussion of principles.* J Hydrol (Amst) 10 (3), 1970, 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J. *Hydrologia stosowana.* Wydawnictwo PWN, 1997, Warszawa.
- Ponce V.M. *Engineering Hydrology: Principles and Practices.* Prentice Hall, Upper Saddle River, 1989. New Jersey.
- Soczyńska U. *Hydrologia dynamiczna.* Wydawnictwo PWN, 1997, Warszawa.
- Uchwała nr 151/2011 Rady Ministrów z dnia 9 sierpnia 2011r w sprawie ustanowienia „Programu ochrony przed powodzią w dorzeczu górnej Wisły”.*
- Ven Te Chow, Maidment, D.K., Mays, L.W. *Applied of Hydrology.* McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1988. New York.
- Wałęga A. *Wpływ charakterystyk fal powodziowych oraz zlewni na parametry syntetycznych hydrogramów jednostkowych beta i Weibulla.* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich 7, PAN o/Kraków, 2011, 29-39.

Dr inż. Andrzej Wałęga
Katedra Inżynierii Sanitarnej
i Gospodarki Wodnej
Uniwersytet Rolniczy
Al. Mickiewicza 24/28
30-059 Kraków
tel. (012) 662 4102
e-mail: a.walega@ur.krakow.pl