

WYBRANE PROBLEMY ZWIĄZANE Z MODELOWANIEM ODPŁYWU ZE ZLEWNI NIEKONTROLOWANYCH W ASPEKCIE PROJEKTOWANIA STREF ZAGROŻENIA POWODZIOWEGO

SOME PROBLEMS OF HYDROLOGY MODELLING OF OUTFLOW FROM UNGAUGED CATCHMENTS WITH ASPECTS OF FLOOD MAPS DESIGN

Andrzej Wałęga

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Edyta Drożdzał, Michał Piórecki, Radosław Radoń

Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie

Streszczenie. W artykule dokonano oceny wpływu kształtu hietogramu opadu i czasu reakcji zlewni na opad na wielkości przepływów uzyskane z modelu NRCS-UH. Obliczenia wykonano na przykładzie zlewni Młynówki – lewostronnego dopływ Ropy, o powierzchni 18,03 km². Do opisu hietogramu opadu wykorzystano metodę Kupczyk i Suligowskiego, zalecenia DWVK i funkcję rozkładu beta. Wrażliwość modelu NRCS-UH na parametry wejściowe sprawdzono z wykorzystaniem współczynnika elastyczności. Analiza wykazała, że hietogram opadu wpływa na parametry fal wezbraniowych. W wyniku badań okazało się, że największy przepływ w kulminacji uzyskano, gdy hietogram opadu odpowiadał zaleceniom DWVK. Model NRCS-UH jest wrażliwy na zmiany parametru *CN* – wzrost tego parametru o 1% prowadzi do zwiększenia przepływów Q_{\max} o 1,1%. Mniejszy wpływ na wartości wyjściowe z modelu ma czas opóźnienia.

Abstract. The article assesses the impact of rainfall hyetograph shape and reaction time of the catchment on flow from the NRCS-UH model. Calculations were performed on the

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Andrzej Wałęga, Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, tel. (12) 662 41 02, e-mail: a.walega@ur.krakow.pl; dr inż. Edyta Drożdzał, mgr inż. Michał Piórecki, mgr inż. Radosław Radoń, Ośrodek Koordynacyjno-Informacyjny Ochrony Przeciwpowodziowej, Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie, ul. Marszałka J. Piłsudskiego 22, 31-109 Kraków.

example of Młynówka stream – left-tributary of the Ropa river, with area equal 18.03 km². To describe the precipitation method was used Kupczyk and Suligowski method, hyetograph recommendations by DVWK and described by function of beta distribution. The sensitivity of the model NRCS-UH for the input parameters were performed using the coefficient of elasticity. The analysis showed that rainfall hyetograph influence on wave of flood. In this study it was found that the largest peak flow obtained when DWVK rainfall hyetograph was use. NRCS-UH model is sensitive to changes in parameter *CN* – an increase of 1% *CN* parameter leads to an increased Q_{\max} discharge by 1.1%. Less impact on the output values of the model has a lag time.

Słowa kluczowe: hietogram opadu, model NRCS-UH, współczynnik elastyczności

Key words: rainfall hyetograph, NRCS-UH model, coefficient of elasticity

WSTĘP

Na etapie sporządzania map zagrożenia powodziowego jednym z podstawowych zagadnień jest opracowanie danych hydrologicznych. Stanowią one warunki brzegowe w modelach hydraulicznych i decydują o poprawności wyznaczonych zasięgów stref zalewu. W sytuacji, gdy ciek, który objęty będzie modelowaniem, jest niekontrolowany, konieczne dane w postaci wartości $Q_{\max\%}$ ustalane są metodami pośrednimi za pomocą analogii hydrologicznej (interpolacji, ekstrapolacji czy zlewni różnicowej), wzorów empirycznych (w postaci regionalnych równań regresji) czy modeli typu opad–odpływ. Te ostatnie są zalecane w Handbook... [2007] do określania zarówno wartości przepływów maksymalnych, jak i kształtów typowych fal wezbraniowych. W przypadku zlewni niekontrolowanych projektant musi wykazać szczególną ostrożność w trakcie prowadzenia obliczeń, gdyż nie ma możliwości weryfikacji uzyskanych wyników w stosunku do rzeczywistych obserwacji. Ten problem dotyczy także modeli hydrologicznych zlewni, które często wymagają wprowadzenia wielu parametrów wejściowych, a przy tym wykazują zróżnicowaną wrażliwość na zmianę ich wielkości [Kamali 2009, Wałęga i in. 2011]. Analiza wrażliwości modelu umożliwia ocenę wpływu zmiany wartości parametrów modelu na uzyskane wartości wyjściowe [Cho i Lee 2001]. Ponadto pozwala ona na wskazanie hierarchii parametrów modelu, które w największym stopniu oddziałują na końcowy wynik.

Celem artykułu jest analiza wybranych problemów powstających na etapie modelowania hydrologicznego i ocena ich wpływu na końcowy efekt obliczeń w oparciu o analizę wrażliwości. Przeanalizowano oddziaływanie dwóch czynników uwzględnianych w modelowaniu odpływu powierzchniowego – kształtu syntetycznego hietogramu opadu oraz czasu reakcji zlewni na opad.

OBSZAR BADAŃ I METODYKA

Rzeka Młynówka stanowi lewostronny dopływ Ropy. Powierzchnia zlewni wynosi 18,03 km², długość cieku głównego – 11,5 km, średni spadek zlewni – 1,26%. W zlewni dominują gleby średnio przepuszczalne. Największą część terenu zlewni zajmują grunty orne.

Obliczenia wykonano z wykorzystaniem modelu NRCS-UH opracowanego przez National Resources Conservation Service (Amerykańską Służbę Ochrony Gleb).

Podstawą opracowania modelu były liczne hydrogramy jednostkowe uzyskane dla zlewni o różnej charakterystyce i lokalizacji. Hydrogram jednostkowy jest uproszczony i przedstawiony w kształcie trójkątnego hydrogramu jednostkowego. Wykorzystując właściwości trójkąta, przyjęto, że 37,5% objętości hydrogramu jednostkowego ma część wznoszącą, a pozostałe 62,5% część opadająca [Fang i in. 2005]. Przepływ kulminacyjny q_p opisany jest zależnością:

$$q_p = \frac{c \cdot A \cdot PE}{T_p} \quad (1)$$

$$T_p = \frac{D}{2} + T_{lag} \quad (2)$$

gdzie:

- c – współczynnik przeliczeniowy, $c = 0,208$,
- A – powierzchnia zlewni, km^2 ,
- T_p – czas wznoszenia fali wezbraniowej, godz.,
- D – czas trwania opadu efektywnego, godz.,
- PE – jednostkowy opad efektywny o wysokości 1 mm,
- T_{lag} – czas opóźnienia, godz.

Czas opóźnienia w niniejszych badaniach został obliczony z równania:

$$T_{lag} = \frac{(L \cdot 3,28 \cdot 100)^{0,8} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0,7}}{1900 \cdot \sqrt{i}} \quad (3)$$

gdzie:

- L – maksymalna długość zlewni, km,
- CN – parametr CN ,
- i – nachylenie zlewni, %.

Przeanalizowano dwa aspekty związane z modelowaniem odpływu ze zlewni.

Po pierwsze, oceniono wpływ metody wyznaczenia hietogramu opadu na wielkość parametrów fali wezbraniowej oraz wrażliwość modelu NRCS-UH na zmianę parametru CN i czasu opóźnienia T_{lag} , reprezentującego reakcję zlewni na opad. Do opisu hietogramu opadu wykorzystano następujące metody: Kupczyk i Suligowskiego [1997] dla równań proponowanych dla obszaru górskiego, DVWK [1985] oraz opartą na rozkładzie beta [Więzik 2010]. W tym ostatnim przypadku kształt hietogramu opadu został ustalony metodą symulacyjną, polegającą na takiej zmianie parametrów rozkładu, aby przepływ w kulminacji obliczony przy wykorzystaniu modelu NRCS-UH był zbliżony do bazowego. Jako bazowy przyjęto przepływ obliczony zgodnie z metodą Stachy i Fal [1986], zwanej powszechnie formułą opadową. Przyjęto tę metodę z uwagi na wielkość

powierzchni zlewni i na jej zagospodarowanie. Wszystkie obliczenia prowadzono dla przepływu o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$.

Drugim etapem analizy była ocena wrażliwości modelu na zmiany parametrów związanych z czasem reakcji zlewni. W modelu NRCS-UH czas reakcji zlewni jest utożsamiany z czasem opóźnienia, który definiuje się jako różnicę między geometrycznym środkiem ciężkości hietogramu opadu efektywnego a przepływem w kulminacji hydrogramu jednostkowego [Barszcz i in. 2006]. Wrażliwość modelu na zmiany parametrów związanych z czasem reakcji określono za pomocą współczynnika elastyczności. Elastyczność jest rozumiana jako wskaźnik procentowej zmiany charakterystyki wyjściowej z modelu w stosunku do zmiany parametru wejściowego. Jeżeli wartość współczynnika elastyczności jest równa lub wyższa od 1, model określa się jako elastyczny, czyli zmiana parametru wejściowego powoduje istotną zmianę wartości wyjściowych. Analiza elastyczności została przeprowadzona w dwóch etapach. W pierwszym badano wpływ parametru CN na wielkość czasu opóźnienia. Wartość współczynnika elastyczności e w tym przypadku określono z zależności:

$$e_{T_{lag}-CN} = \frac{\delta(T_{lag})}{\delta(CN)} \cdot \frac{CN_{sr}}{T_{lag}(CN_{sr})} \quad (4)$$

gdzie:

$\delta(T_{lag})$ oraz $\delta(CN)$ – zmiana wartości T_{lag} i CN

W drugim etapie, opierając się na obliczonych przepływach w kulminacji, określano wrażliwość modelu NRCS-UH na zmiany parametru T_{lag} (przy założeniu wartości stałej CN) ze wzoru:

$$e_{Q_{max}-T_{lag}} = \frac{\delta(Q_{max})}{\delta(T_{lag})} \cdot \frac{T_{lag sr}}{Q_{max}(T_{lag sr})} \quad (5)$$

W ostateczności określono globalną elastyczność modelu NRCS-UH, a więc wpływ parametru CN i T_{lag} na wielkość przepływów w kulminacji ze wzoru:

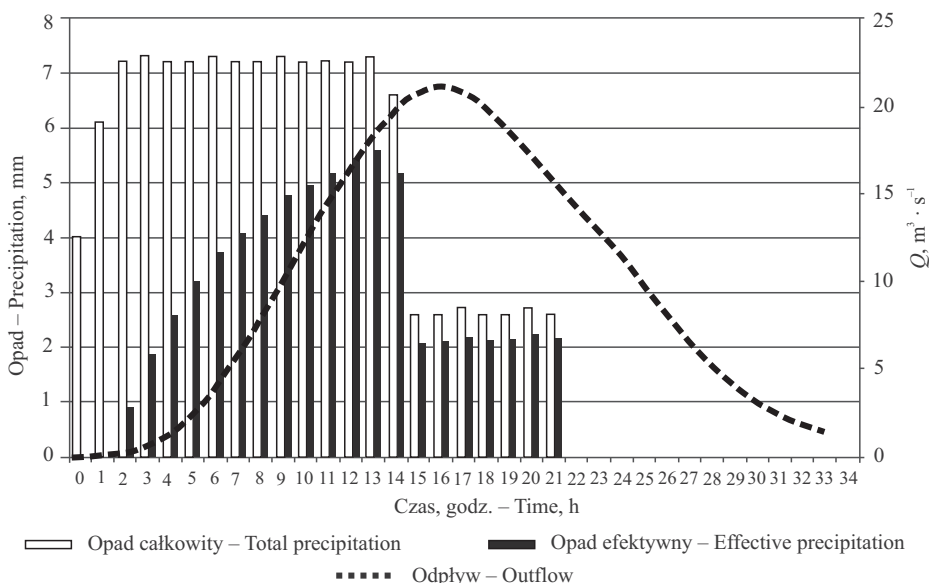
$$e_{Q_{max}-CN, T_{lag}} = \left[\frac{\delta(Q_{max})}{\delta(T_{lag})} \cdot \frac{T_{lag sr}}{Q_{max}(T_{lag sr})} \right] \cdot \left[\frac{\delta(T_{lag})}{\delta(CN)} \cdot \frac{CN_{sr}}{T_{lag}(CN_{sr})} \right] \quad (6)$$

Analiza elastyczności polegała na przyjmowaniu wartości CN i T_{lag} w przedziale od $\pm 20\%$ wartości wyjściowej z krokiem 10% . Wartością wyjściową parametru CN była wartość średnia ważona równa $75,82$ określona na podstawie pokrycia terenu, grup glebowych i warunków hydrologicznych, natomiast wartością wyjściową czasu opóźnienia był wynik równy 357 min określony dla CN średniego oraz ustalonych z numerycznego modelu terenu spadku zlewni i długości drogi spływu.

Wszystkie obliczenia symulacyjne wykonano w programie HEC-HMS 3.4 opracowanym przez Korpus Inżynierów Armii Amerykańskiej [Hydrologic... 2009].

WYNIKI I DYSKUSJA

Niezwykle istotne znaczenie w wynikach obliczeń przepływów opartych na modelu matematycznym ma postać hietogramu opadu. Widać to zwłaszcza w sytuacji obliczania tzw. fal hipotetycznych i przepływów o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia, gdzie musimy przyjąć pewien model rozkładu opadu w czasie. Syntetyczne hietogramy opadu określa się wieloma metodami, które są zalecane do stosowania w danych warunkach klimatycznych. Przykładem mogą być syntetyczne hietogramy stosowane w Wielkiej Brytanii [Butler i Davies 2011], krzywe SCS rekomendowane w Stanach Zjednoczonych [Application... 2005, Ponce 1989] czy krzywe wg DVWK [1985]. W Polsce za jedną z nowszych metod do wyznaczenia syntetycznych hietogramów można uznać metodę opracowaną przez Kupczyk i Suligowskiego [1997], a ostatnio – propozycję ustalenia tej charakterystyki na podstawie rozkładu beta. Jaki jest wpływ hietogramu opadu na parametry fal wezbraniowych uzyskanych z modelu opad-odpływ, ilustrują rys. 1–3 oraz tab. 1. W obliczeniach jako parametry modelu NRCS-UH przyjmowano wartości uzyskane z analizy pokrycia zlewni i numerycznego modelu terenu.



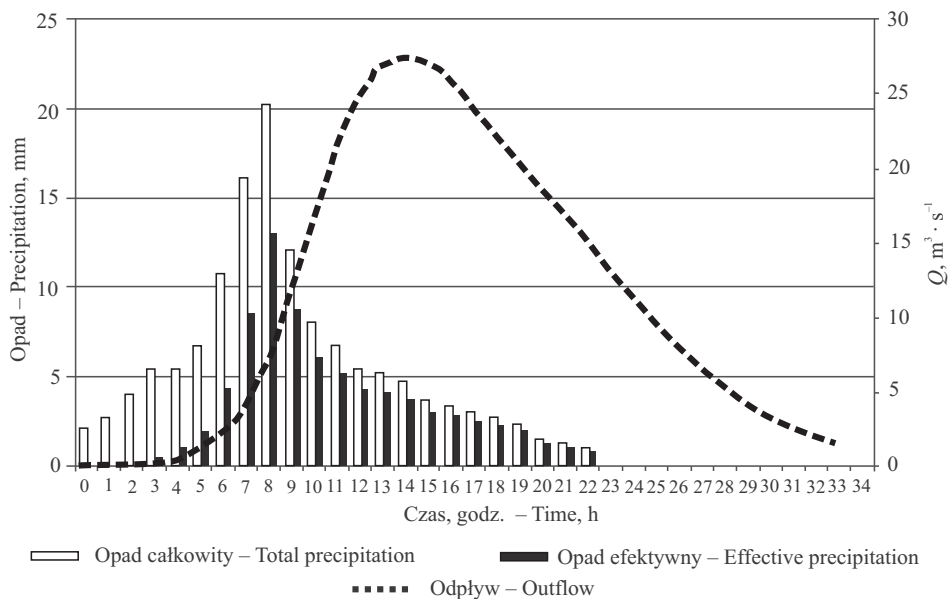
Rys. 1. Przebieg hietogramu opadu całkowitego wg Kupczyk i Suligowskiego, opadu efektywnego oraz hydrogramu odpływu bezpośredniego w zlewni Młynówki

Fig. 1. Hietograph of total precipitation according to Kupczyk and Suligowski, effective precipitation and direct hydrograph in Młynówka catchment

Hietogram opadu wg Kupczyk i Suligowskiego dla rejonu górskiego charakteryzuje się trzema wyraźnymi obszarami – niewielkich natężeń na początku zjawiska, długiego okresu stałych natężeń maksymalnych i najniższych natężeń pod koniec epizodu. Taki przebieg hietogramu o czasie 24 godz. wynika z typów genetycznych opadów. Dla takiego opadu czas trwania odpływu wyniesie 33 godz., a fala ma kształt zbliżony do

symetrycznego. Maksymalne natężenie opadu całkowitego osiągnięte zostaje po 3 godz. od początku epizodu, a efektywnego po 13 godz. od początku odpływu. Średnie natężenie opadu efektywnego wyniosło $3,7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, przy czasie trwania równym 21 godz., a przepływ w kulminacji wyniósł $21,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 1, tab. 1).

Nieco inne założenie obowiązują przy konstruowaniu hietogramu opadu wg DVWK. Jako rozkład intensywności opadu miarodajnego przyjmuje się deszcz z maksymalnym natężeniem w środku. Zgodnie z podanymi tam zasadami przez pierwsze 30% czasu trwania opadu wystąpi 20% jego wysokości. Po czasie równym połowie trwania opadu pojawi się 70%, a pozostałe 30% całkowitego opadu przypadnie na drugą połowę.



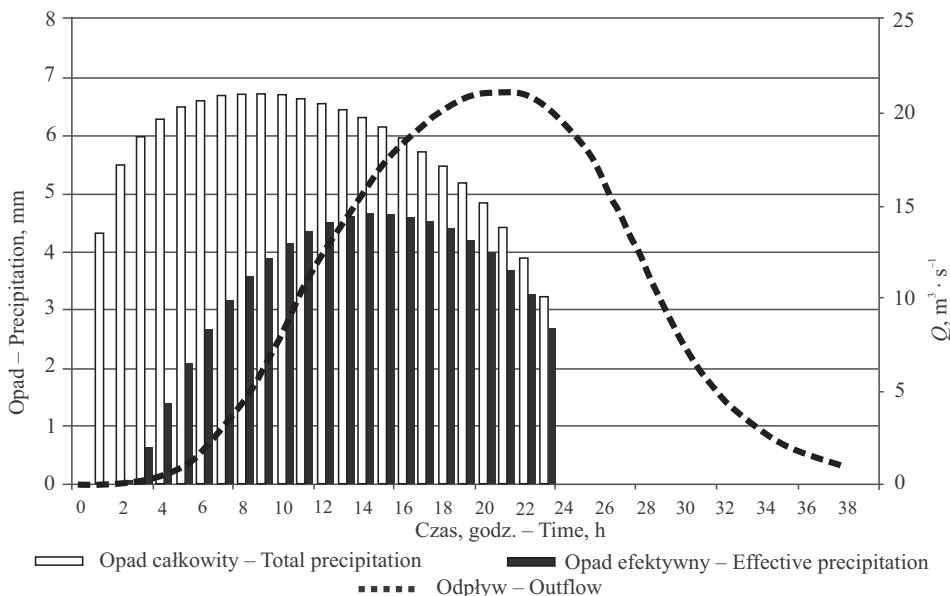
Rys. 2. Przebieg hietogramu opadu całkowitego wg DVWK, opadu efektywnego oraz hydrogramu odpływu bezpośredniego w zlewni Młynówki

Fig. 2. Hyetograph of total precipitation according to DVWK, effective precipitation and direct hydrograph in Mlynowka catchment

Dla hietogramu opadu wg DVWK czas trwania hydrogramu odpływu wyniesie 31 godz., a fala ma wyraźny kształt asymetryczny – czas do kulminacji wynosi 15 godz., a czas opadania 19 godz. (rys. 2). Maksymalne natężenie opadu całkowitego występuje po 9 godz. od początku epizodu, a efektywnego po 6 godz. od momentu wystąpienia odpływu. Średnie natężenie opadu efektywnego wyniosło $3,7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, przy czasie trwania opadu efektywnego równym podobnie jak w poprzednim przypadku 21 godz. Przepływ w kulminacji wyniósł $27,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. 1).

W przypadku trzeciej metody przyjęto nieco odmienne założenia przy ustaleniu kształtu hietogramu opadu. Hietogram ów opisywany jest przez rozkład beta, a czas wystąpienia maksymalnego natężenia opadu jest poszukiwany drogą prób poprzez szereg symulacji prowadzących do momentu uzyskania zbliżonych wartości przepływu w kulminacji z modelu i z formuły empirycznej zalecanej dla danej zlewni. Taka procedura jest opisana

w „Metodyce obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ” opracowanej przez Stowarzyszenie Hydrologów Polskich [Metodyka ... 2009]. W tym przypadku z uwagi na wielkość zlewni jako formułę do obliczania przepływów maksymalnych prawdopodobnych przyjęto wzór Stachy i Fal. W wyniku przeprowadzenia obliczeń przepływ $Q_{\max 1\%}$ wyniósł $21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Po przeprowadzeniu szeregu symulacji ustalono przebieg hietogramu opadu na podstawie rozkładu beta jak na rys. 3. Wartości parametrów rozkładu wyniosły: $\alpha = 1,15$, $\beta = 1,60$.



Rys. 3. Przebieg hietogramu opadu całkowitego wg rozkładu BETA, opadu efektywnego oraz hydrogramu odpływu bezpośredniego w zlewni Młynówki

Fig. 3. Hyetograph of total precipitation according to BETA distribution, effective precipitation and direct hydrograph in Młynowka catchment

Dla trzeciego przypadku czas trwania hydrogramu odpływu wyniesie 39 godz., a fala ma wyraźny kształt zbliżony do symetrycznego – podobnie jak w pierwszym przypadku (rys. 1). Maksymalne natężenie opadu całkowitego występuje po 8 godz. od początku epizodu, a efektywnego po 14 godz. od początku odpływu. Średnie natężenie opadu efektywnego i czas trwania opadu efektywnego były podobne jak w poprzednich przypadkach. Zbiornicze zestawienie parametrów fal przedstawia tab. 1. Wynika z niej, że hietogram opadu całkowitego wg Kupczyk i Suligowskiego oraz DVWK wpływa na wielkości przepływów w kulminacjach (różnica wynosi 23%). Przepływ $Q_{\max 1\%}$ określony trzecią metodą nie odbiega od pierwszej, mimo że zastosowano odmienne podejście metodyczne – wielkość przepływu zależy od metody empirycznej jego wyznaczenia, a modelowanie hydrologiczne służy tylko do wyznaczenia kształtu hydrogramu odpływu. Największe różnice w uzyskanych wynikach występują w czasie do kulminacji. Najkrótszy czas do kulminacji

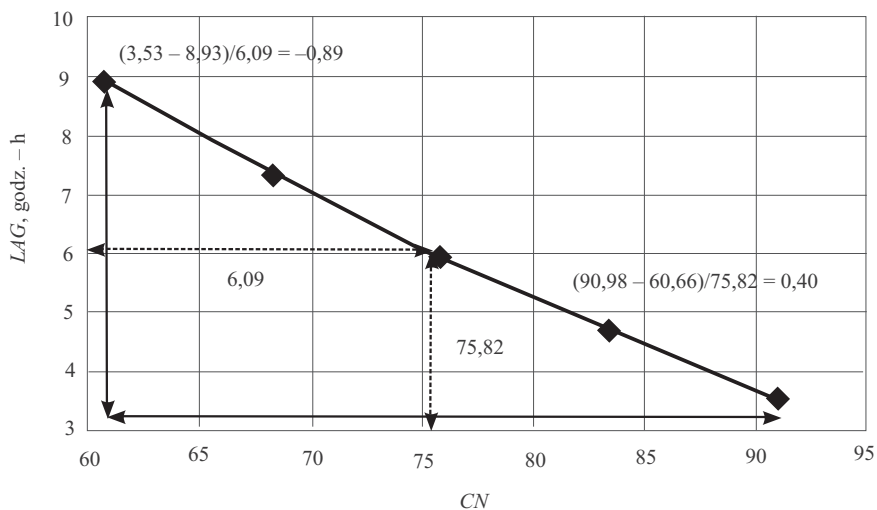
Tabela 1. Zestawienie parametrów obliczonych fal o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% dla różnych hietogramów opadu

Table 1. Parameters of the simulation waves with 1% frequency for different hyetograph

Parametr fali Wave parameter	Hietogram wg Kupczyk i Suligowskiego Hyetograph according to Kupczyk and Suligowski	Hietogram wg DVWK Hyetograph according to DVWK	Hietogram oparty na rozkładzie BETA Hyetograph according to BETA distribution
Przepływ w kulminacji Peak flow $m^3 \cdot s^{-1}$	21,1	27,5	21,0
Czas do kulminacji Time to peak flow godz. – h	17,0	15,0	21,0
Objętość fali Volume of wave $1000 m^3$	1,3323	1,3599	1,3468

wynoszący 15 godz. został uzyskany przy zastosowaniu hietogramu wg DVWK. W przypadku objętości fal nie wykazano znacznych różnic pomiędzy metodami.

Drugim celem pracy była ocena wrażliwości modelu NRSC-UH na zmianę parametrów wejściowych związanych z czasem reakcji na opad. W pierwszym etapie analizowano wpływ parametru CN na wielkość czasu opóźnienia. Wyniki przedstawione na rys. 4 dobitnie pokazują, że wraz ze wzrostem parametru CN , a więc zmniejszeniem ilości opadu, który zostaje zatrzymany w zlewni, zmniejsza się czas opóźnienia. Wyznaczony

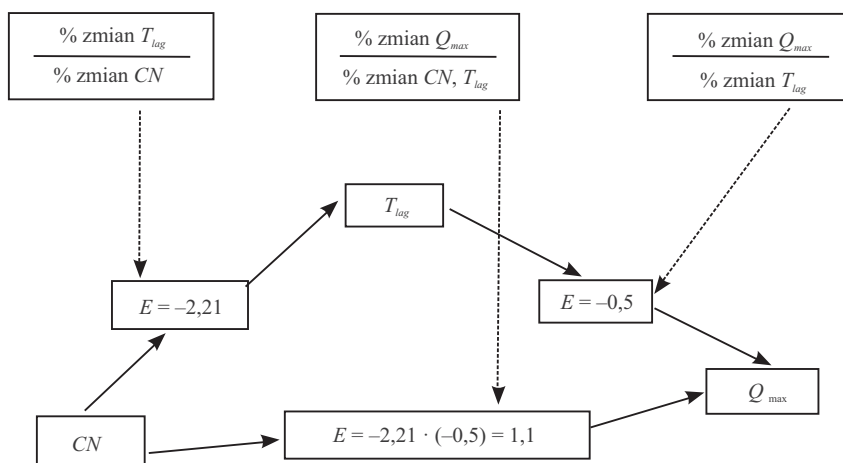


Rys. 4. Zależność między parametrem CN a czasem opóźnienia LAG

Fig. 4. Relationship between CN and LAG

ze wzoru (4) współczynnik elastyczności jest równy $-2,21$. Świadczy to o tym, że czas opóźnienia jest bardzo wrażliwy na zmiany parametru CN . Z matematycznego punktu widzenia jest to zrozumiała zależność, gdyż w równaniu (3) parametr CN stanowi jedną trzech zmiennych niezależnych.

W drugim etapie analizowano wpływ czasu opóźnienia na wielkość przepływów w kulminacji uzyskanych z modelu NRSC-UH. Na etapie prowadzenia obliczeń przyjęto rozkład opadu wg DVWK. Przeprowadzone obliczenia wg zależności (5) wykazały, że model NRSC-UH nie jest wrażliwy na zmianę parametru T_{lag} – wyznaczony współczynnik elastyczności jest równy $-0,50$. Stwierdzono także, że wraz ze wzrostem czasu opóźnienia zmniejsza się wielkość Q_{max} . Zależność tę można tłumaczyć faktem, że wzrost czasu opóźnienia powoduje wydłużenie reakcji zlewni na opad poprzez wolniejszy spływ powierzchniowy z uwagi np. na zwiększoną retencję zlewni (wzrost udziału terenów przepuszczalnych, mniejsze spadki terenu). To z kolei będzie wpływać na zmniejszenie przepływu w kulminacji. Wynika to także z matematycznego zapisu wzorów (1) i (2). Wzrost czasu opóźnienia powoduje zwiększenie czasu do kulminacji T_p , a ten z kolei z uwagi na to, że jest w mianowniku wzoru (1), powoduje obniżenie przepływu w kulminacji. W ostatnim punkcie obliczeń określono globalnie wpływ parametru CN oraz T_{lag} na wielkość przepływów obliczonych z modelu NRCS-UH. Schemat prowadzenia obliczeń przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Diagram współczynnika elastyczności

Fig. 5. Diagram of elasticity coefficient

Obliczenia wykazały, że model NRCS-UH jest wrażliwy na zmiany parametru CN , gdyż współczynnik elastyczności wyniósł 1,1. Parametr CN decyduje o wielkości opadu efektywnego w zlewni, co bezpośrednio przekłada się na wartości Q_{max} . Ogólnie można stwierdzić, że wzrost o 1% parametru CN prowadzi do zwiększenia o 1,1% przepływów Q_{max} . Podobne wyniki uzyskali Maidment i Hoogerwerf [2002], analizując wpływ parametrów takich jak spadek zlewni, powierzchnia zlewni, długość drogi spływu i parametru CN na czas opóźnienia i przepływy w kulminacji w wybranych zlewniach w stanie Teksas.

Wg wspomnianych autorów wzrost o 1% parametru CN i powierzchni zlewni zwiększa przepływ w kulminacji określony z modelu o około 1%, wzrost długości drogi spływu o 1% zwiększa Q_{\max} o 0,22%, a wzrost spadku zlewni o taki sam procent zwiększa Q_{\max} zaledwie o 0,14%. Wynika stąd, że projektanci wykorzystujący w obliczeniach hydrologicznych modele opad–odpływ powinni bardzo starannie określać wartości parametrów wejściowych (zwłaszcza parametru CN), gdyż odgrywają one istotną rolę w wartościach przepływów maksymalnych. Zmiany w wartościach parametru CN mogą w konsekwencji odbić się na wielkości strefy zalewu, która została opracowana na podstawie obliczeń hydrologicznych z wykorzystaniem modeli matematycznych.

Wpływ parametru CN na wielkość uzyskanej strefy zalewu określono na przykładzie zlewni Młynówki. Obliczenia przeprowadzono w dwóch wariantach – w pierwszym przyjęto wartość parametru CN odpowiadającą II poziomowi uwilgotnienia zlewni (warunkom normalnym), a w drugim – III poziomowi (podłoże uwilgotnione). Warunki normalne uwilgotnienia podłoża są zalecane w „Metodyce obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ” [Metodyka... 2009] do symulacji wezbrań w zlewniach niekontrolowanych. Strefy zalewowe dla potoku Młynówka wyznaczono na podstawie wyników symulacji w modelu hydraulicznym, które opierały się na obliczonych wcześniej danych hydrologicznych. Podstawą do wykreślenia stref były informacje o rzędnych zwierciadła wody pochodzące z wyników modelowania hydraulicznego, a przetransformowane do postaci tzw. numerycznego modelu powierzchni wody (NMPW) oraz sam numeryczny model terenu (NMT). Linia stanowiąca maksymalną obwiednię strefy zalewowej powstała wskutek przecięcia NMPW i NMT. Obliczenia wykazały, iż zasięg strefy zalewowej dla przepływu o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$ (woda $Q_{1\%}$) wyznaczony dla potoku Młynówka wykazuje istotne zróżnicowanie w zależności od przyjętych parametrów hydrologicznych, mających wpływ na wielkość opadu efektywnego. Zasięg strefy zalewowej dla przypadku II stopnia uwilgotnienia (II AMC) jest wyraźnie mniejszy niż w przypadku przyjęcia III stopnia (III AMC). Przekłada się to na różnicę w powierzchniach stref zalewowych rzędu 20% (powierzchnia strefy dla II AMC wynosiła 0,88 km², zaś dla III AMC – 1,08 km²). Nie należy zapominać, że konsekwencje tego faktu mogą mieć daleko idące reperkusje, np. przy określaniu przez władze samorządowe ograniczeń w zakresie zabudowy na terenach zalewowych. Dlatego tak istotne jest właściwe i świadome podejście do określania wejściowych danych hydrologicznych, stanowiących podstawę do wyznaczenia zasięgów stref zagrożenia powodziowego.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i obliczeń wolno sformułować następujące wnioski:

1. Modele hydrologiczne mogą być wykorzystywane do określania charakterystyk hydrologicznych w zlewniach niekontrolowanych, lecz należy mieć na uwadze, iż są one wrażliwe na wielkość parametrów wejściowych.
2. Istotny wpływ na parametry fali wezbraniowej uzyskane z modeli hydrologicznych wywiera kształt hietogramu opadu. W przeprowadzonych badaniach największy

przepływ w kulminacji uzyskano gdy hietogram opadu przyjęto wg zaleceń DWVK. Wynika to z faktu, że największa część opadu całkowitego występuje w pierwszych godzinach zjawiska, co powoduje szybkie wyczerpanie początkowej retencji. W konsekwencji następne porcje opadu już nie mają możliwości zatrzymania w zlewni i tworzy się spływ powierzchniowy. Mniejsze kulminacje i znacznie łagodniejsze wezbrania są widoczne przy stosowaniu hietogramów z bardziej symetrycznym przebiegiem opadów.

3. Model NRSC-UH jest wrażliwy na zmiany parametru CN decydującego o możliwości tworzenia się spływu powierzchniowego. Wzrost o 1% parametru CN prowadzi do zwiększenia przepływów Q_{\max} o 1,1%. Mniejszy wpływ na wartości wyjściowe z modelu wywiera czas opóźnienia. Ważne jest, aby projektanci bardzo rzetelnie ustalali wartości najistotniejszych parametrów modeli hydrologicznych, gdyż w przeciwnym razie istnieje groźba znacznego przekłamania obliczonych wartości przepływów, co może przenosić się np. na wielkość wyznaczonych stref zalewu, a tym samym ma ogromny wpływ na planowanie przestrzenne.

PIŚMIENNICTWO

- Application of Hydrologic Methods in Maryland, 2005. State Highway Administration.
- Barszcz M., Banasik K., Tönsmann F., 2006. Estimation of lag times of rainfall events for three small river basins. *Electr. J. Pol. Agric. Univer., Environ. Develop.* 9(2).
- Butler D., Davies J.W., 2011. *Urban drainage*. Wyd. 3. Spon Press London – New York.
- Cho S.M., Lee M.W., 2001. Sensitivity considerations when modeling hydrologic processes with digital elevation model. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37(4), 931–934.
- DWVK 1985. Niederschlag – Starkegenauswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer. Regeln 124. Verlag Paul Parey Hamburg.
- Fang X., Prakash K., Cleveland T., Thompson D., Pradhan P., 2005. Revisit of NRCS Unit Hydrograph Procedures. *Proc. of the ASCE*. Austin.
- Handbook on good practices for Flood mapping in Europe. 2007. EXIMAP.
- Hydrologic Modelling System HEC-HMS. User's Manual. 2009. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Kamali M., 2009. Calibration of Hydrologic Models Using Distributed Surrogate Model Optimization Techniques: A WATCLASS Case Study. *Doctors work*. University of Waterloo Ontario (Can.).
- Kupeczyk E., Suligowski R., 1997. Statystyczny opis struktury opadów atmosferycznych jako elementu wejścia do modeli hydrologicznych. [W:] *Przydział opadów i wezbrań o zadanym czasie powtarzalności*. Red. Prof. Urszula Soczyńska. Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego Warszawa, 21–86.
- Maidment D.W., Hoogerwerf T.N., 2002. Parameter Sensitivity in Hydrologic Modeling. *Technical Report*. The University of Texas Austin
- Metodyka obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ. 2009. Stowarzyszenie Hydrologów Polskich Warszawa
- Ponce V.M., 1989. *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall Upper Saddle River (NJ).
- Stachy J., Fal B., 1986. Zasady obliczania maksymalnych przepływów prawdopodobnych. *Pr. Instytutu Badawczego Dróg i Mostów* 3–4
- Wąlega A., Cupak A., Miernik W., 2011. Wpływ parametrów wejściowych na wielkość przepływów maksymalnych uzyskanych z modelu NRCS-UH. *Infrast. Ekol. Ter. Wiejsk.* 7, 85–95.

Więzik B., 2010. Przepływy maksymalne roczne o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w małych zlewniach niekontrolowanych. [W:] Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej. T. 1. Red. B. Więzik. Monografie 68. Komitet Inżynierii Środowiska PAN Warszawa, 153–165.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 17.10.2012