

WPŁYW STOSOWANEJ METODY WYZNACZANIA CHWILOWYCH HYDROGRAMÓW JEDNOSTKOWYCH (IUH) NA DOKŁADNOŚĆ OSZACOWANIA PARAMETRÓW WEZBRAŃ W ZLEWNI MIEJSKIEJ

Anna Sikorska, Kazimierz Banasik

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W pracy przedstawiono porównanie chwilowych hydrogramów jednostkowych (IUH) dla małej zlewni zurbanizowanej – Potoku Służewieckiego w Warszawie, wyznaczonych według czterech metod: formuły SCS, Rao i współautorów, analogii hydrologicznej poprzez transformację hydrogramu z sąsiedniego profilu oraz pomiarów opad – odpływ. Do opisu kształtu chwilowych hydrogramów jednostkowych przyjęto dwuparametrową funkcję gęstości prawdopodobieństwa rozkładu gamma (model Nasha), natomiast do porównania chwilowych hydrogramów jednostkowych przyjęto charakterystyki IUH: u_p – wielkość kulminacji (maksymalną rzędną IUH) [h^{-1}], oraz t_p – czas wystąpienia kulminacji [h]. Do porównania hydrogramów opracowanych według różnych metod wykorzystano IUH wyznaczone na podstawie danych opad – odpływ.

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, iż w sytuacji ograniczonej informacji o zlewni (braku danych pomiarowych) znajduje uzasadnienie stosowanie metody wyznaczenia IUH według formuły Rao i współautorów. Określone w ten sposób IUH mogą posłużyć do obliczenia przepływów maksymalnych, co ma szczególne znaczenie przy projektowaniu budowli hydrotechnicznych, komunikacyjnych oraz przy wyznaczaniu stref zagrożenia powodziowego.

Słowa kluczowe: proces opad – odpływ, zlewnia miejska, IUH, model Nasha, Potok Służewiecki w Warszawie

WSTĘP

Planowanie, projektowanie i eksploataowanie obiektów komunikacyjnych, jak kładki, przepusty czy mosty, oraz obiektów hydrotechnicznych, jak progi czy podpiętrzenia, a także pozyskiwanie danych do wyznaczenia stref zagrożenia powodziowego wymaga

Adres do korespondencji – Corresponding author: Anna Sikorska, Kazimierz Banasik, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, ul. Nowoursynowska 159, 01-776 Warszawa, e-mail: anna_sikorska@sggw.pl; kazimierz_banasik@sggw.pl

określenia przepływów maksymalnych o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia. Wymagania co do konieczności tych obliczeń, a także odpowiednie prawdopodobieństwa przewyższeń przepływów maksymalnych regulują właściwe przepisy [Dyrektywa powodziowa 2006, Rozporządzenie MŚ 2007].

Cieki w zlewniach miejskich zwykle nie mają wieloletnich obserwacji hydrologicznych, dlatego też nie jest możliwe zastosowanie metod bezpośrednich wyznaczenia przepływów maksymalnych. Stąd stosowanie modelowania matematycznego staje się podstawowym sposobem wyznaczenia reakcji zlewni zurbanizowanej na opad. Celem pracy jest porównanie chwilowych hydrogramów jednostkowych wyznaczonych różnymi metodami dla zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie.

OPIS ZLEWNI BADAWCZEJ

Zlewnia Potoku Służewieckiego położona jest na terenie południowo-zachodniej Warszawy, a sam potok jest odbiornikiem wód opadowych dla dzielnic Ochota – Ursynów – Wilanów. Na całym swoim biegu przyjmuje ponad 30 dopływów, z czego 4 stanowią rowy otwarte. Są to: Rów Grabowski, Rów Wyścigi, Kanał Wolica oraz rów uchodzący w końcowym odcinku potoku [Banasik 2002]. Pozostałe dopływy stanowią wyloty kolektorów kanalizacji deszczowych. Rów Grabowski jest największym dopływem potoku na obszarze analizowanej zlewni.

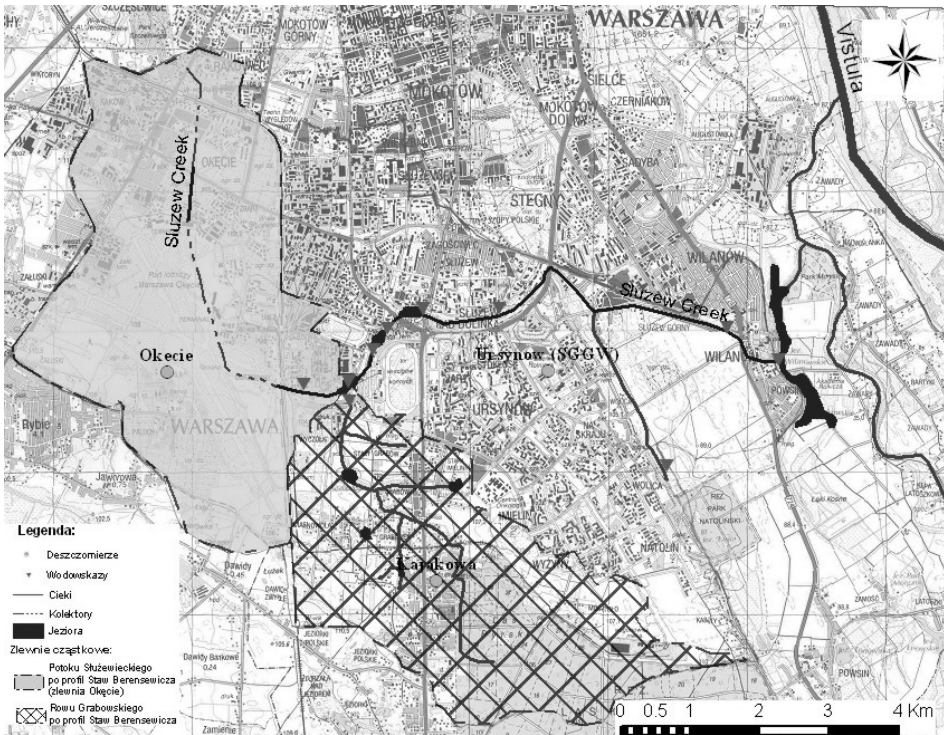
Całkowita powierzchnia zlewni Potoku Służewieckiego wynosi $53,7 \text{ km}^2$, natomiast po profil Staw Berensewicza wraz ze zlewnią Rowu Garbowskiego – $26,9 \text{ km}^2$ [Banasik 2002].

W obrębie zlewni potoku po analizowany profil można wyróżnić dwie zlewnie cząstkowe, zróżnicowane pod względem stopnia zurbanizowania – wysoko zurbanizowaną zlewnię Okęcie, czyli zlewnię Potoku Służewieckiego po profil Staw Berensewicza (bez Rowu Grabowskiego), oraz zlewnię Rowu Grabowskiego o bardziej rolniczym charakterze (rys. 1). Powierzchnia zlewni Okęcie wynosi $14,4 \text{ km}^2$, a zlewni Rowu Grabowskiego – $12,5 \text{ km}^2$ [Sikorska i Banasik 2008]. Ponad 63% powierzchni zlewni Okęcie stanowią tereny zabudowane i osiedla mieszkaniowe, z czego największą część zajmuje teren warszawskiego lotniska Okęcie – około 5 km^2 , co stanowi blisko 35% całkowitej powierzchni tej zlewni. Natomiast dla zlewni Rowu Grabowskiego udział powierzchni o ograniczonej przepuszczalności wynosi zaledwie około 17,8% całkowitej powierzchni zlewni.

METODYKA WYZNACZENIA IUH I DANE WEJŚCIOWE

Założenia IUH

Metoda hydrogramów jednostkowych zakłada, iż dla danej zlewni rzecznej opady efektywne o jednakowej wysokości, tj. jednakowym natężeniu i czasie trwania, wywołują wezbrania o jednakowym przebiegu w czasie [Byczkowski 1999]. Jest to spowodowane założeniem niezmienności w analizowanym okresie podstawowych charakterystyk rządzących procesem formowania się odpływu takich, jak: powierzchnia zlewni, jej



Rys. 1. Mapa poglądowa zlewni Potoku Służewieckiego po profilu Staw Berensewicza z uwzględnieniem podziału na zlewnie cząstkowe

Fig. 1. Locality map of the Służew Creek catchment to the Berensewicz Pond stream gauge taking sub-catchments into consideration

kształt, spadki, podłoże, pokrycie terenu czy struktura sieci rzecznej. Ponadto metoda IUH zakłada: niezmiennosc natężenia opadu efektywnego w analizowanym okresie oraz jego równomierne rozłożenie na terenie całej zlewni, stałość całkowitego czasu trwania hydrogramu jednostkowego, odpowiadającego jednostkowemu opadowi efektywnemu, odpowiedniość rzędnych jednostkowych hydrogramów odpływu otrzymanych dla tego samego czasu trwania i całkowitych objętości fal wezbraniowych oraz stałość hydrogramu jednostkowego dla danej zlewni przy uwzględnieniu wszystkich fizycznych charakterystyk zlewni.

W pracy do wyznaczenia chwilowych hydrogramów jednostkowych przyjęto model Nasha, opisujący transformację opadu efektywnego w odpływ bezpośredni za pomocą dwuparametrowej funkcji rozkładu gamma [Banasik i in. 2000]:

$$u(t) = \frac{1}{k\Gamma(N)} \left(\frac{t}{k}\right)^{N-1} \exp\left(-\frac{t}{k}\right) \quad (1)$$

gdzie: $u(t)$ – rzędne chwilowego hydrogramu jednostkowego [h^{-1}],

t – czas od początku układu współrzędnych [h],

k – parametr retencji zbiornika [h],

N – liczba zbiorników [–],

$\Gamma(N)$ – funkcja gamma.

Chwilowe hydrogramy jednostkowe wyznaczone według 4 metod: formuły SCS, Rao, Deuller i Sarma, transformacji z sąsiedniego profilu oraz danych pomiarowych opad – odpływ.

IUH według formuły SCS

W metodzie SCS charakterystyki IUH – t_p i u_p , wyrażone są w funkcji bezwymiarowego parametru CN , stąd metoda ta pozwala na uwzględnienie zmieniających się warunków środowiska [SCS 1986]:

$$t_p = \frac{L^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{2,92 J_z^{0,5}} \quad (2)$$

$$u_p = 0,75 \frac{1}{t_p} \quad (3)$$

gdzie: L – długość głównego ciekę od rozpatrywanego przekroju do wododziału [km],

J_z – średni spadek zlewni [%],

CN – parametr metody SCS [–].

W pracy rzędne chwilowego hydrogramu jednostkowego (IUH), według formuły SCS, wyznaczone zostały jako suma rzędnych chwilowych hydrogramów jednostkowych dla dwóch zlewni cząstkowych, tj. zlewni Okęcie oraz zlewni Rowu Grabowskiego, przy uwzględnieniu wag tych zlewni. Jako wagi zlewni cząstkowych potraktowane zostały ich powierzchnie. Uzasadnieniem rozdzielania zlewni na 2 zlewnie cząstkowe jest ich różnicowanie pod względem zurbanizowania. Rzędne IUH w profilu Staw Berensewicza wyznaczone z zależności:

$$u_{SB}(t) = \varepsilon_{OK} u_{OK}(t) + \varepsilon_{RG} u_{RG}(t) \quad (4)$$

gdzie: $u(t)$ – rzędne chwilowego hydrogramu jednostkowego, odpowiednio: $u_{SB}(t)$ – dla profilu Staw Berensewicza, $u_{OK}(t)$ – dla zlewni Okęcie, $u_{RG}(t)$ – dla zlewni Rowu Grabowskiego, [h^{-1}],

ε_{OK} , ε_{RG} – wagi zlewni, odpowiednio: dla Okęcia i Rowu Grabowskiego, [–], przy czym $\varepsilon_{OK} + \varepsilon_{RG} = 1$.

Rzędne chwilowych hydrogramów jednostkowych dla dwóch zlewni cząstkowych obliczone zostały na podstawie parametrów IUH tych zlewni, wyznaczonych na podstawie fizjografii zlewni według metody SCS (tab. 1) [Florezack 2007, Sikorska 2007]. Następnie wyznaczone charakterystyki IUH (t_p i u_p), a na ich podstawie parametry IUH

(N i k), odpowiednio: N – na podstawie funkcji $f(N)$ z równania $f(N) = t_p u_p$, oraz k – z zależności $k = \frac{t_p}{N-1}$.

Tabela 1. Wejściowe charakterystyki zlewni cząstkowych wykorzystane do wyznaczenia rzędnych IUH dla Potoku Służewieckiego w profilu Staw Berensewicza

Table 1. Input characteristics of the sub-catchments used to estimation of IUH ordinates for Służew Creek catchment at Berensewicz water gauge

| Wyszczególnienie Specification | Zlewnia cząstkowa – Sub-catchment | |
|---|-----------------------------------|---------------------------------|
| | Okęcie | Rów Grabowski – Grabowski Drain |
| Liczba zbiorników, N [-] Number of reservoirs | 4,7 | 4,7 |
| Parametr retencji zbiornika, k [h] Parameter of linear reservoir retention | 1,1 | 2,49 |
| Powierzchnia, A [km ²] Area | 14,4 | 12,5 |
| Waga zlewni, ε [-] Weight of catchment | 0,54 | 0,46 |

IUH według formuły Rao, Delleur i Sarma

Metoda Rao, Delleur i Sarma, opracowana w 1972 roku [Rao i in., 1972], stosowana była z powodzeniem przez późniejszych autorów, między innymi Jovanovic [1986], Banasik i in. [2007]. Metoda ta wykorzystywana jest do wyznaczenia charakterystyk IUH według modelu Nasha (LAG i k) dla zlewni zurbanizowanych na podstawie wartości powierzchni i stopnia zurbanizowania zlewni, czasu trwania opadu oraz wysokości opadu efektywnego. Poniżej przedstawiono wzory Rao, Delleur i Sarma do wyznaczenia LAG i k :

$$LAG = 1,28A^{0,46} (1+U)^{-1,66} H^{-0,27} D^{0,37} \quad (5)$$

$$k = 0,56A^{0,39} (1+U)^{-0,62} H^{-0,11} D^{0,22} \quad (6)$$

gdzie: LAG – czas opóźnienia [h],
 k – współczynnik retencji zbiornika [h],
 A – powierzchnia zlewni [km²],
 U – zurbanizowanie zlewni [-],
 H – wysokość opadu efektywnego [mm],
 D – czas trwania opadu [h].

Mając wyznaczone wartości charakterystyk LAG i k , można określić wartość parametru N :

$$LAG = Nk \quad (7)$$

wobec czego: $N = \frac{LAG}{k}$

natomiast t_p można wyznaczyć z zależności:

$$t_p = (N - 1)k \quad (8)$$

W tabeli 2 zestawiono dane wejściowe do wyznaczenia LAG i k według metody Rao, Delleur i Sarma.

Tabela 2. Zestawienie danych wejściowych do wyznaczenia LAG i k dla Potoku Służewieckiego w profilu Staw Berensewicza według metody Rao, Delleur i Sarma

Table 2. Input data used to estimation of LAG and k parameters for Służew Creek catchment at the Berensewicz water gauge based on Rao, Delleur and Sarma equation

| Wyszczególnienie Specification | Zlewnia Potok Służewiecki Służew Creek catchment | Zlewnie cząstkowe Sub-catchments | |
|---|---|-------------------------------------|----------------------------------|
| | Profil – Water gauge | | |
| | Staw Berensewicza Berensewicz Pond | Okęcie Okęcie | Rów Grabowski Grabowski Drain |
| Powierzchnia, A [km ²] Area | 26,9 | 14,4 | 12,5 |
| Stopień zurbanizowania, U [-] Fraction of the impervious area in the catchment | 0,237 | 0,325 | 0,132 |
| Parametr CN [-] The Curve Number | 75,8 | 77,5 | 73,8 |
| Warstwa opadu efektywnego, H [mm] Effective rainfall | 1 | | |
| Czas trwania opadu, D [h] Rainfall duration | 1 | | |

Parametr CN oraz urbanizacja zlewni Potoku po profil Staw Berensewicza zostały wyznaczone jako średnia ważona parametrów CN i urbanizacji dla dwóch zlewni cząstkowych – zlewni Okęcie i zlewni Rowu Grabowskiego [Florczak 2007, Sikorska 2007].

IUH według metody analogii hydrologicznej poprzez transformację hydrogramu z sąsiedniego profilu

Metoda analogii hydrologicznej poprzez transformację hydrogramu z sąsiedniego profilu [Rao i in. 1972] wykorzystywana jest do wyznaczenia charakterystyk LAG oraz k dla profilu, dla którego te charakterystyki są poszukiwane na podstawie znanych charakterystyk z innego profilu tego samego cieku.

W pracy przetransformowane zostały charakterystyki IUH dla Potoku Służewieckiego z profilu Rosoła do profilu Staw Berensewicza. Charakterystyki dla profilu Rosoła zostały wyznaczone na podstawie danych pomiarowych z 1985 i 1986 roku [Banasik i in. 2007]. W tabeli 3 przedstawiono dane wejściowe do transformacji charakterystyk LAG i k .

Z przekształcenia wzorów (7) i (8) można wyznaczyć k , mając dane LAG i t_p :

$$k = LAG - t_p$$

Mając dane charakterystyki LAG i t_p (a tym samym k), dla profilu Rosoła można wyznaczyć poszukiwane charakterystyki dla profilu Staw Berensewicza, przekształcając odpowiednio wzory Rao, Delleur i Sarma:

$$LAG_{SB} = LAG_R \cdot \left(\frac{A_{SB}}{A_R}\right)^{0,46} \cdot \left(\frac{1+U_{SB}}{1+U_R}\right)^{-1,66} \cdot \left(\frac{H_{SB}}{H_R}\right)^{-0,27} \cdot \left(\frac{D_{SB}}{D_R}\right)^{0,37} \quad (9)$$

$$k_{SB} = k_R \cdot \left(\frac{A_{SB}}{A_R}\right)^{0,39} \cdot \left(\frac{1+U_{SB}}{1+U_R}\right)^{-0,62} \cdot \left(\frac{H_{SB}}{H_R}\right)^{-0,11} \cdot \left(\frac{D_{SB}}{D_R}\right)^{0,22} \quad (10)$$

gdzie: LAG_{SB} , LAG_R – czas opóźnienia, odpowiednio dla profilu Staw Berensewicza i profilu Rosoła [h],

k_{SB} , k_R – współczynnik retencji zbiornika, odpowiednio dla profilu Staw Berensewicza i profilu Rosoła [h],

A_{SB} , A_R – powierzchnia zlewni, odpowiednio dla profilu Staw Berensewicza i profilu Rosoła [km²],

U_{SB} , U_R – zurbanizowanie zlewni, odpowiednio dla profilu Staw Berensewicza i profilu Rosoła [–],

H_{SB} , H_R – wysokość opadu efektywnego, odpowiednio dla profilu Staw Berensewicza i profilu Rosoła [m],

D_{SB} , D_R – czas trwania opadu, odpowiednio dla profilu Staw Berensewicza i profilu Rosoła [h].

Tabela 3. Zestawienie danych do wyznaczenia LAG i k dla Potoku Służewieckiego w profilu Staw Berensewicza na podstawie charakterystyk z profilu Rosoła

Table 3. Input data to estimation of LAG and k parameters for Służew Creek catchment at Berensewicz water gauge based on Rosoła water gauge characteristics

| Wyszczególnienie Specification | Profil – Water gauge | |
|---|----------------------|---------------------------------------|
| | Rosoła Rosola | Staw Berensewicza Berensewicz Pond |
| Powierzchnia, A [km ²] Area | 35,1 | 26,9 |
| Stopień zurbanizowania, U [–] Fraction of the impervious area in the catchment | 0,183 | 0,237 |
| Parametr CN [–] The Curve Number | 75,7 | 75,8 |
| Warstwa opadu efektywnego, H [mm] Effective rainfall | 2,02 | 1 |
| Czas trwania opadu, D [h] Rainfall duration | 1,67 | 1 |
| Czas opóźnienia, LAG [h] Lag time | 5,51 | ? |
| Czas osiągnięcia kulminacji, t_p [h] Time to peak | 2,97 | ? |
| Wartość kulminacji, u_p [h ⁻¹] Peak | 0,14 | ? |
| Parametr retencji zbiornika, k [h] Parameter of linear reservoir retention | 2,54 | ? |
| Liczba zbiorników, N [–] Number of linear reservoirs | 2,17 | ? |

IUH według pomiarów opad – odpływ

W celu wyznaczenia parametrów IUH na podstawie pomiarów poddano analizie okres 2 lat hydrologicznych, tj. 2007 i 2008 rok. Spośród wszystkich zaobserwowanych zdarzeń do analizy wybrano te, dla których Q_{\max} był większy bądź równy pięciokrotnej wartości średniego przepływu w analizowanym profilu ($SQ = 0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) [Banasik 2002]. Zatem wybrano zdarzenia o $Q_{\max} \geq 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co odpowiada maksymalnemu stanowi wody $H_{\max} \geq 75 \text{ cm}$ (tab. 4).

Tabela 4. Charakterystyka zdarzeń wybranych z 2 lat hydrologicznych: 2007 i 2008, dla Potoku Służewieckiego w profilu Staw Berensewicza

Table 4. Characteristic of events, chosen from the 2 hydrologic years: 2007 and 2008, for the Służew Creek catchment at the Berensewicz water gauge

| Nr No | Rok hydrologiczny Hydrological year | Data wezbrania Date of occurrence | Opad całkowity [mm] Rainfall | Opad efektywny [mm] Effective rainfall | Czas trwania opadu [h] Rainfall duration | Natężenie [mm·h ⁻¹] Intensivity | Max stan wody Max water level | Max zaobserwowany przepływ [m ³ ·s ⁻¹] Max observed discharge |
|-------|--|--------------------------------------|------------------------------------|--|--|---|----------------------------------|--|
| 1 | 2007 | 6.06.2007 | 5,7 | 1,04 | 0,33 | 17,10 | 114,8 | 2,150 |
| 2 | | 9.06.2007 | 19,2 | 2,17 | 3,38 | 5,67 | 102,8 | 1,779 |
| 3 | | 10.06.2007 | 7,1 | 0,57 | 2,20 | 3,23 | 113,9 | 2,118 |
| 4 | | 13.06.2007 | 11,2 | 1,38 | 1,45 | 7,72 | 90,9 | 1,424 |
| 5 | | 21.06.2007 | 4,9 | 0,99 | 4,17 | 1,18 | 85,3 | 1,255 |
| 6 | | 2.07.2007 | 7,4 | 0,89 | 4,47 | 1,66 | 77,1 | 1,049 |
| 7 | | 20.07.2007 | 5,2 | 0,79 | 0,78 | 6,64 | 92,2 | 1,453 |
| 8 | | 22.07.2007 | 11,2 | 1,86 | 0,43 | 25,85 | 120,4 | 2,313 |
| 9 | | 27.07.2007 | 9,4 | 1,06 | 2,47 | 3,81 | 76,8 | 1,049 |
| 10 | | 10.08.2007 | 13,5 | 1,56 | 3,80 | 3,55 | 81,5 | 1,174 |
| 11 | | 12.08.2007 | 15,5 | 2,99 | 2,53 | 6,12 | 147,2 | 3,259 |
| 12 | | 5.09.2007 | 19,3 | 1,83 | 13,97 | 1,38 | 77,2 | 1,049 |
| 13 | | 9.09.2007 | 5,3 | 0,52 | 4,33 | 1,22 | 82,2 | 1,174 |
| 14 | | 6.10.2007 | 3,6 | 0,63 | 2,60 | 1,38 | 96,1 | 1,570 |
| 15 | | 19.10.2007 | 17,8 | 1,74 | 14,73 | 1,21 | 78,6 | 1,101 |
| 16 | 2008 | 7.11.2007 | 6,2 | 0,48 | 5,25 | 1,18 | 76,8 | 0,958 |
| 18 | | 21.05.2008 | 7,7 | 1,05 | 3,18 | 2,42 | 100,1 | 1,550 |
| 19 | | 27.06.2008 | 8,0 | 0,76 | 0,80 | 10,00 | 84,9 | 1,207 |
| 20 | | 13.07.2008 | 26,0 | 3,27 | 6,18 | 4,20 | 132,6 | 2,653 |
| 21 | | 15.08.2008 | 32,5 | 4,98 | 6,95 | 4,68 | 137,5 | 2,829 |
| 22 | | 16.08.2008 | 6,6 | 0,69 | 0,75 | 8,80 | 88,6 | 1,308 |
| 23 | | 8.09.2008 | 10,6 | 2,03 | 2,37 | 4,48 | 79,9 | 1,064 |

Kolorem szarym oznaczono wezbranie wzięte do dalszej analizy.

Events signed with the grey were chosen to the following analysis.

Spośród 23 zdarzeń zaobserwowanych w ciągu 2 lat hydrologicznych do dalszej analizy wybrano zdarzenia spełniające kryteria pod względem czasu trwania opadu (tj. wybrano zdarzenia o krótkotrwałym opadzie) oraz kształtu hydrogramu (tj. odrzucono wezbrania o nieregularnym kształcie hydrogramu wezbrania, powstałym na skutek zablokowania odpływu z profilu zamykającego zlewnię przez istniejący przepust pod ul. Łączyny). W ten sposób uzyskano 8 wezbrań spełniających powyższe kryteria. Dla wybranych zdarzeń wyznaczono średni opad całkowity na terenie zlewni Potoku po profil Staw Berensewicza, stosując metodę wielokątów równego zadeszczenia według de Thiessona [Byczkowski 1999]. Do rozdziału opadu całkowitego na opad efektywny i starty zastosowano metodę CN – SCS.

Dla 8 zdarzeń wygenerowano symulowane hydrogramy wezbrań za pomocą programu SNE (opracowanego w katedrze ZWIRŚ) oraz wyznaczono parametry IUH według modelu Nasha – N i k (tab. 5). Następnie dokonano oceny zgodności symulowanych hydrogramów za pomocą programu SNE z hydrogramami obserwowanymi, według 3 współczynników korelacji zaproponowanych przez Sarma i innych [1973], stosowanych później także przez Banasika i Ignara [1983]:

- współczynnika korelacji (R):

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n Q_{O(i)} Q_{C(i)} - \left(\sum_{i=1}^n Q_{O(i)} \right) \left(\sum_{i=1}^n Q_{C(i)} \right)}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n (Q_{O(i)})^2 - \left(\sum_{i=1}^n Q_{O(i)} \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n (Q_{C(i)})^2 - \left(\sum_{i=1}^n Q_{C(i)} \right)^2 \right]}} \quad (11)$$

- całkowitego błędu kwadratowego (CBK):

$$CBK = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{O(i)} - Q_{C(i)})^2 \right]^{1/2}}{\sum_{i=1}^n Q_{O(i)}} \cdot 100\% \quad (12)$$

- specjalnego współczynnika korelacji (RS):

$$RS = \left[\frac{2 \sum_{i=1}^n Q_{O(i)} Q_{C(i)} - \sum_{i=1}^n (Q_{C(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{O(i)})^2} \right]^{1/2} \quad (13)$$

gdzie: $Q_{O(i)}$ i $Q_{C(i)}$ – odpowiednio i -ta wartość przepływu obserwowanego i obliczonego,
 n – liczebność ciągu przepływów.

Według specjalnego współczynnika korelacji (RS), który okazał się najłagodniejszym kryterium oceny, uzyskano 1 wezbranie o doskonałej zgodności ($0,99 \leq RS < 1,0$) oraz 7 wezbrań o bardzo dobrej zgodności ($0,95 \leq RS < 0,99$). Ze względu na pozostałe 2 współczynniki uzyskano odpowiednio, według współczynnika korelacji R: 1 wezbranie o doskonałej zgodności ($0,99 \leq R < 1,0$), 4 wezbrania o bardzo dobrej zgodności ($0,95 \leq R < 0,99$) oraz 3 wezbrania o dobrej zgodności ($0,90 \leq R < 0,95$). Natomiast według całkowitego błędu kwadratowego uzyskano 2 wezbrania o doskonałej zgodności ($0,0\% < CBK \leq 3,0\%$), 5 wezbrań o bardzo dobrej zgodności ($3,0\% < CBK \leq 6,0\%$) i 1 wezbranie o dobrej zgodności ($6,0\% < CBK \leq 10,0\%$).

Tabela 5. Charakterystyki 8 zdarzeń wybranych z 2 lat hydrologicznych: 2007 i 2008, dla Potoku Służewieckiego w profilu Staw Berensewicza, wyznaczone za pomocą programu SNE
Table 5. Characteristics of 8 events, chosen from the 2 hydrologic years: 2007 and 2008, for the Służew Creek catchment at the Berensewicz water gauge, estimated by SNE programme for each event

| Nr No | Data wezbrania Date of occurrence | N [-] | k [h] | LAG [h] | CN-SCS [-] | Alfa [-] | t_p [h] | u_p [h ⁻¹] | R | RS | CBK [%] | |
|--|--|-------|-------|---------|---------------|-------------|-----------|--------------------------|-------|-------|------------|------|
| | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 13.06.2007 | 2,97 | 1,64 | 4,86 | 91,46 | 0,123 | 3,23 | 0,166 | 0,972 | 0,987 | 3,5 | |
| 7 | 20.07.2007 | 3,00 | 1,31 | 3,94 | 96,24 | 0,152 | 2,63 | 0,206 | 0,941 | 0,972 | 6,5 | |
| 8 | 22.07.2007 | 2,55 | 1,94 | 4,95 | 92,61 | 0,166 | 3,01 | 0,157 | 0,971 | 0,986 | 3,8 | |
| 11 | 12.08.2007 | 2,06 | 3,52 | 7,24 | 90,83 | 0,193 | 3,72 | 0,102 | 0,937 | 0,972 | 4,5 | |
| 14 | 6.10.2007 | 2,94 | 0,84 | 2,47 | 97,56 | 0,174 | 1,63 | 0,326 | 0,995 | 0,998 | 2,1 | |
| 20 | 13.07.2008 | 1,27 | 5,07 | 6,42 | 82,32 | 0,126 | 1,35 | 0,118 | 0,979 | 0,987 | 2,9 | |
| 21 | 15.08.2008 | 1,71 | 4,72 | 8,10 | 80,48 | 0,153 | 3,37 | 0,089 | 0,948 | 0,968 | 4,0 | |
| 22 | 16.08.2008 | 2,89 | 1,87 | 5,39 | 94,39 | 0,104 | 3,52 | 0,149 | 0,958 | 0,983 | 3,7 | |
| Średnia Mean | | 2,42 | 2,61 | 5,42 | 90,74 | 0,15 | 2,81 | 0,16 | 0,96 | 0,98 | 3,88 | |
| Zakres zmienności Variability range | | min | 1,27 | 0,84 | 2,47 | 80,48 | 0,10 | 1,35 | 0,09 | 0,94 | 0,97 | 2,10 |
| | | max | 3,00 | 5,07 | 8,10 | 97,56 | 0,19 | 3,72 | 0,33 | 1,00 | 1,00 | 6,50 |

Średnie wartości charakterystyk IUH, czasu do osiągnięcia kulminacji (t_p) oraz wartości kulminacji (u_p) wyznaczone za pomocą metody Serbana [Ignar i Banasik 1986]:

$$\overline{t_p} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{pi}}{m} \quad (14)$$

$$\overline{u_{(tp)}} = \frac{\sum_{i=1}^m u_{(tpi)}}{m} \quad (15)$$

gdzie: $\overline{t_p}$ – uśredniona wartość czasu do kulminacji [h],

$\overline{u_{(tp)}}$ – uśredniona wartość kulminacji [h^{-1}],

t_{pi} – wartości i -tego IUH czasu do kulminacji [h],

u_{tpi} – wartości i -tego IUH kulminacji [h^{-1}],

m – liczba uśrednionych hydrogramów.

Wartości t_{pi} oraz u_{tpi} dla każdego wezbrania obliczono ze wzorów:

$$t_{pi} = k_i (N_i - 1) \quad (16)$$

$$u_{(tpi)} = \frac{1}{k_i \Gamma(N_i)} \cdot \frac{(N_i - 1)^{N_i - 1}}{\exp(N_i - 1)} \quad (17)$$

gdzie: N_i – liczba zbiorników dla i -tego IUH [-],

k_i – współczynnik retencji zbiornika dla i -tego IUH [h].

Na podstawie średnich wartości charakterystyk t_p i u_p wyznaczono średnie wartości parametrów IUH – \overline{N} i \overline{k} , odpowiednio:

$$f(\overline{N}) = \frac{1}{\Gamma(\overline{N})} \cdot \frac{(\overline{N} - 1)^{\overline{N}}}{\exp(\overline{N} - 1)} = \overline{t_p} \cdot \overline{u_{tp}} \quad (18)$$

$$\overline{k} = \frac{\overline{t_p}}{\overline{N} - 1} \quad (19)$$

WYNIKI

W tabeli 6 zestawiono wartości charakterystyk IUH dla Potoku Służewieckiego w profilu Staw Berensewicz za wyznaczone analizowanymi metodami.

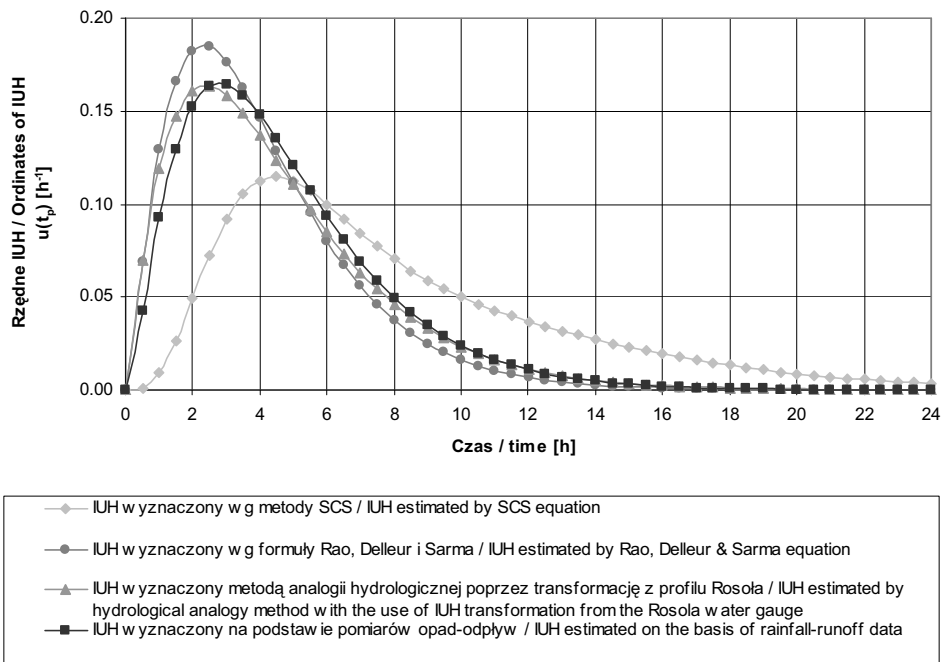
Na podstawie charakterystyk dla profilu Staw Berensewicz za wyznaczono chwilowy hydrogram jednostkowy. Na rysunku 2 przedstawiono chwilowe hydrogramy jednostkowe wygenerowane dla omówionych w pracy metod.

Hydrogram jednostkowy wyznaczony na podstawie pomiarów opad – odpływ ($t_p = 2,81$ h; $u_p = 0,16$ h^{-1}), wygenerowany na podstawie bezpośrednich pomiarów, należy traktować jako porównawczy dla pozostałych metod. Stąd największą zgodność z tym hydrogramem uzyskano dla 2 metod wyznaczania IUH według formuły Rao, Delleur i Sarma. Przy czym dla metody według formuły Rao, Delleur i Sarma uzyskano zadowalającą zgodność ($t_p = 2,32$ h; $u_p = 0,18$ h^{-1}), natomiast dla metody wyznaczania IUH według analogii hydrologicznej poprzez transformację hydrogramu z sąsiedniego profilu, jako metody bazującej na pośrednich danych z innego profilu, uzyskano wysoką zgodność pod względem wartości kulminacji IUH ($t_p = 2,38$ h; $u_p = 0,16$ h^{-1}). Dla IUH wyznaczonego według metody SCS uzyskano zaniżoną wartość kulminacji IUH oraz dużo

Tabela 6. Zestawienie charakterystyk IUH dla Potoku Służewieckiego w profilu Staw Berensewicza wyznaczonych za pomocą 4 metod

Table 6. IUH characteristics estimated with the use of each of 4 methods

| Charakterystyki IUH IUH characteristics | Metoda wyznaczenia charakterystyk IUH Method of estimation of IUH parameters | | | |
|--|---|---|--|--|
| | Metoda SCS SCS formula | Według formu- ły Rao, Delleur i Sarma Rao, Delleur and Sarma equations | Metoda ana- logii hydrolo- gicznej Hydrological analogy method | Według danych opad – odpływ On the basis of recorded data |
| Czas osiągnięcia kulminacji, t_p [h] Time to peak | 4,45 | 2,32 | 2,38 | 2,81 |
| Wartość kulminacji, u_p [h^{-1}] Peak | 0,11 | 0,18 | 0,16 | 0,16 |
| Liczba zbiorników, N [-] Number of linear reservoirs | 2,66 | 2,31 | 2,11 | 2,49 |
| Parametr retencji zbiornika, k [h] Parameter of linear reservoir retention | 2,68 | 1,77 | 2,15 | 1,88 |



Rys. 2. Chwilowe hydrogramy jednostkowe dla Potoku Służewieckiego w profilu Staw Berensewicza wygenerowane na podstawie 4 metod

Fig. 2. Instantaneous Unit Hydrographs (IUH) estimated for Sluzew Creek catchment calculated with four methods

dłuższy czas do osiągnięcia szczytu IUH ($t_p = 4,45$ h; $u_p = 0,11$ h⁻¹) niż dla hydrogramu wyznaczonego na podstawie pomiarów.

PODSUMOWANIE

W pracy dokonano porównania czterech metod wyznaczenia chwilowych hydrogramów jednostkowych dla małej zlewni zurbanizowanej – Potoku Służewieckiego po profil Staw Berensewicza, poczynając od metody wymagającej najmniejszej liczby informacji o zlewni, według formuły SCS, według formuły Rao, Delleur i Sarma, według analogii hydrologicznej poprzez transformację hydrogramu z sąsiedniego profilu (Rosoła), według tych samych autorów, oraz na podstawie analizy danych pomiarowych opad – odpływ z dwóch lat hydrologicznych, tj. 2007 i 2008 roku.

Hydrogram jednostkowy wyznaczony na podstawie bezpośrednich pomiarów (danych opad – odpływ) należy traktować jako miarodajny do wyznaczenia przepływów maksymalnych. Jednakże, jako że w zlewniach miejskich ciekii wodne zwykle nie mają bogatego materiału obserwacyjnego, konieczne staje się stosowanie pośrednich metod określania przepływów maksymalnych. Stąd przedstawione w pracy 3 metody wyznaczania chwilowych hydrogramów jednostkowych według formuł empirycznych znajdują powszechne zastosowanie. Do oceny zgodności hydrogramów wyznaczonych według formuł empirycznych z hydrogramem wyznaczonym na podstawie danych opad – odpływ zastosowano charakterystyki IUH: t_p – czas osiągnięcia kulminacji IUH i u_p – wartości kulminacji IUH.

Pośród porównywanych metod wyznaczania IUH dużą zgodność uzyskano dla metody analogii hydrologicznej poprzez transformację hydrogramu z sąsiedniego profilu w porównaniu do dla IUH wyznaczonego na podstawie danych pomiarowych, co jest uzasadnione wykorzystaniem dostępnych danych pomiarowych dla tego samego ciekii, ale innego profilu niż analizowany. Natomiast w przypadku całkowitego braku danych pomiarowych dla danego ciekii znajduje uzasadnienie stosowanie metody Rao, Delleur i Sarma, dla której uzyskano zadowalającą zgodność hydrogramów w stosunku do IUH wyznaczonego na podstawie danych opad – odpływ. Metoda ta daje dużo lepsze wyniki niż metoda SCS.

Dokładność określenia przepływów maksymalnych ma zasadnicze znaczenie przy projektowaniu obiektów komunikacyjnych oraz obiektów hydrotechnicznych, a także pozyskiwaniu danych do wyznaczenia stref zagrożenia powodziowego. Stąd różnice w wyznaczonych charakterystykach IUH według różnych metod będą skutkowały stopniem dokładności określenia przepływów maksymalnych w zlewni miejskiej. W związku z tym należałoby odrzucić metodę empiryczną jako niedokładną zarówno w określeniu wielkości przepływu maksymalnego, jak i jego czasu wystąpienia. Natomiast przydatna może się okazać metoda oparta na wyznaczaniu IUH według Rao, Delleur i Sarma w sytuacji braku dostatecznej liczby danych, gdy nie można zastosować bezpośredniej metody wyznaczania IUH na podstawie analizy danych opad – odpływ.

WNIOSKI

1. Spośród przedstawionych w pracy metod wyznaczania chwilowych hydrogramów jednostkowych największą zgodność w porównaniu do hydrogramu wyznaczonego na podstawie danych obserwowanych i pomierzonych uzyskano na podstawie metody analogii hydrologicznej hydrogramu poprzez transformację hydrogramu z sąsiedniego profilu.

2. Otrzymany hydrogram obliczony metodą Rao, Delleur i Sarma jest zbliżony do hydrogramu obliczonego na podstawie danych opad – odpływ. Pozwala to na stosowanie tej metody do wyznaczania hydrogramów w przypadku braku danych obserwacyjnych.

3. Spośród zastosowanych w pracy metod najmniejszą zgodność z hydrogramem wyznaczonym na podstawie danych obserwowanych i pomierzonych uzyskano dla hydrogramu otrzymanego na podstawie obliczeń według metody SCS. Dla hydrogramu tego uzyskano zaniżoną wartość kulminacji IUH oraz dużo dłuższy czas wznoszenia IUH w porównaniu do hydrogramu wyznaczonego na podstawie danych pomiarowych.

PIŚMIENNICTWO

- Banasik K., 2002. Operat hydrologiczny Potoku Służewieckiego w przekroju ul. Przyczółkowej. Katedra Inżynierii Wodnej i Rekułtywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- Banasik K., Ignar S., 1983. Próba określenia wpływu metody rozdziału opadu na zgodność symulowanych i obserwowanych hydrogramów odpływu powierzchniowego. Przegląd geofizyczny XXVIII, 3–4, 409–415.
- Banasik K., Górski D., Ignar S., 2000. Modelowanie wezbrań opadowych i jakości odpływu z małych nieobserwowanych zlewni rolniczych, Wydaw. SGGW, Warszawa.
- Banasik K., Barszcz M., Hejduk L., 2007. Current and perspective flood flow consequences of land use changes in Sluzew Creek (suburb of Warsaw). Special aspects of urban flood management, Proceedings Coast Session Aquaterra Conference 2007, Institut fur Wasserbau, Technische Universitat Hamburg, 3–16.
- Byczkowski A., 1999. Hydrologia. T. II. Wydaw. SGGW, Warszawa.
- Dyrektywa Powodziowa, 2007. Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny zagrożenia powodziowego i zarządzania nim (DzU 288 z dn. 6.11.2007, 27).
- Florczak F., 2007. Przebiegi wezbrań Potoku Służewieckiego w profilu Staw Berensowicza. Praca inżynierska. SGGW, Warszawa.
- Gradowski Ł., 2007. Wpływ zbiornika wodnego – Staw Berensowicza na redukcję fali powodziowej. Praca magisterska. SGGW, Warszawa.
- Ignar S., Banasik K., 1986. Wpływ metody wyznaczania opadu efektywnego na parametry modelu Nasha małej zlewni rolniczej. Gospodarka Wodna 4, 85–88.
- Jovanovic J., 1986. Hydrologic approaches In Urban drainage system modeling, Proceedings of the 3rd International Conference “Urban Storm Drainage”. Eds. C. Maksimiwic, M. Radokovic. Pergamon Press, Oxford, UK, 185–208.
- Rao R.A., Delleur J.W., Sarma S.P., 1972. Conceptual Hydrologic Models for Urbanizing Basins. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, HY7, 1205–1220.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 20 kwietnia 2007 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (DzU 86, poz. 579).

- SCS (Soil Conservation Service), 1986. Urban hydrology for small watersheds. Tech. Report 55, US Dept. of Agric., Washington DC, USA.
- Sarma P.B.S., Delleur J.W., Rao A.R., 1973. Comparison of rainfall-runoff models for urban areas. *Journal of Hydrology* 18, 329–347.
- Sikorska A., 2007. Wpływ urbanizacji na zmiany przepływów wezbraniowych w zlewni rzecznej Rowu Grabowskiego. Praca inżynierska. SGGW, Warszawa.
- Sikorska A., 2008. Analiza przepływów wezbraniowych zlewni rzecznej Potoku Służewieckiego profilu Staw Berensewicza. Praca magisterska. SGGW, Warszawa.
- Sikorska A., Banasik K., 2008. Wyznaczenie czasu opóźnienia odpływu bezpośredniego w zlewni Potoku Służewieckiego na podstawie danych pomiarowych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska XVII* 4 (42), 19–29.

INFLUENCE OF USE OF VARIOUS METHODS TO ESTIMATE INSTANTANEOUS UNIT HYDROGRAPHS (IUH) ON THE ACCURACY OF EVALUATION OF PARAMETERS FOR AN URBAN CATCHMENT

Abstract. The main goal of this article was comparison of estimated Instantaneous Unit Hydrograph – IUH calculated with four methods: on the basis of recorded data, SCS formula, with Rao, Delleur and Sarma equations and hydrological analogy with the use of IUH transformation from the adjoining stream gauge. The object of case study was Służew Creek catchment, located in Warsaw (Poland). The IUH based on the Nash model was used to transform effective rainfall into direct runoff, moreover the comparison of four methods was based on Nash model characteristics: t_p – time to peak of IUH, and u_p – peak of IUH, estimated for each method. The measured IUH has been chosen as a reference standard of IUH for the others methods. Conducted analysis has shown that IUH estimated with the use of Rao, Delleur and Sarma equation has been the closest one to measured IUH. Therefore, in situation of limited information, this method could be useful to calculate and predict flood flows in urban catchments with relation to designing hydro-engineering objects.

Key words: rainfall-runoff process, urban catchment, IUH, Nash model, Służew Creek in Warsaw

Accepted for print – Zaakceptowano do druku: 15.12.2008