

## Zastosowanie modelu Santa Barbara Unit Hydrograph do symulacji hydrogramu przepływów w zlewniach zurbanizowanych

*The application of the Santa Barbara Unit Hydrograph model to simulate a flow hydrograph in urbanized catchments*

**MARIUSZ BARSZCZ**

Katedra Inżynierii Wodnej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
02-776 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159; mariusz\_barszcz@sggw.pl

**Zarys treści.** Celem pracy była ocena przydatności konceptualnego modelu Santa Barbara Unit Hydrograph (SBUH) do symulacji hydrogramu przepływów w zlewniach zurbanizowanych. Model testowano w zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie. W artykule przedstawiono procedurę obliczeniową wykorzystaną w autorskim programie komputerowym, który pozwala na symulację przepływu przy użyciu modelu SBUH. Zakres pracy obejmował wyznaczenie parametrów modelu ( $t_c$ ,  $K_r$ ) metodą iteracyjną dla 13 wybranych zdarzeń opad–odpływ. Na podstawie uzyskanych danych opracowano równanie, które można zastosować do obliczenia czasu koncentracji ( $t_c$ ) w relacji do maksymalnej intensywności opadu efektywnego. Obliczony za pomocą tego równania czas koncentracji wykorzystano do symulacji przepływów maksymalnych modelem SBUH. Porównanie przepływów maksymalnych obliczonych przy użyciu modelu oraz pomierzonych w terenie pozwoliło na ocenę opracowanej procedury obliczeniowej oraz modelu SBUH.

**Słowa kluczowe:** zlewnia zurbanizowana, proces opad–odpływ, przepływy maksymalne hydrogramów, czas koncentracji, model SBUH.

### Wprowadzenie

Wyznaczenie hydrogramu przepływów, na przykład do celów projektowania sieci kanalizacyjnej lub zbiorników przeciwpowodziowych na obszarze miasta, wymaga opracowania dokładnych modeli hydrologicznych, za pomocą których możliwe jest obliczenie natężenia przepływu będącego reakcją na opad deszczu o określonych charakterystykach. Jednocześnie, modele stosowane do tego celu powinny cechować się małą liczbą parametrów, gdyż możliwość identyfikacji parametrów modelu (określenia wartości liczbowych) w dużym stopniu zależy od dostępno-

ści danych. Wykorzystanie złożonych matematycznie modeli do analizy procesu transformacji opadu w odpływ w zlewniach zurbanizowanych, na przykład takich jak model SWMM - Storm Water Management Model (Rossman, 2004), wymaga dużego nakładu pracy, identyfikacji wielu parametrów modelu i dysponowania odpowiednim zbiorem danych fizycznych. Pomimo rozbudowanych algorytmów obliczeniowych, uzyskiwane wyniki często nie są wystarczająco dokładne. Potwierdzenie tej tezy można znaleźć w pracach M. Barszcza (2009, 2010), opisujących zastosowanie modelu SWMM w zlewni Potoku Służewieckiego.

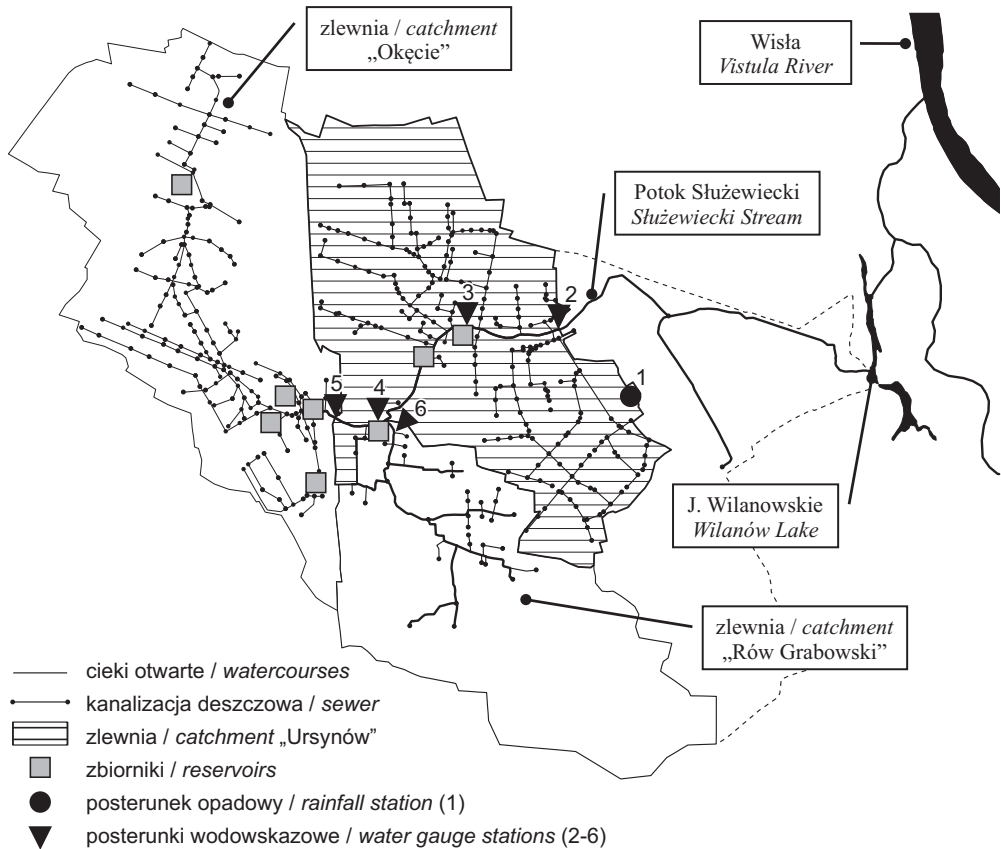
Przedstawione argumenty skłoniły autora do przeprowadzenia oceny możliwości zastosowania prostego, conceptualnego modelu Santa Barbara Unit Hydrograph (Stubchaer, 1975) do symulacji hydrogramów przepływów w zlewniach zurbanizowanych. Jako obiekt badań wybrano zlewnię Potoku Służewieckiego w Warszawie po profil „Rosoła”. W zlewni tej, w ramach prowadzonych badań własnych, dokonano pomiarów opadów i przepływów. Jest to pierwszy przypadek zastosowania modelu SBUH dla zlewni zurbanizowanej w Polsce. Wcześniejsze prace, prowadzone przez J.M. Stubchaera (1975), M.P. Wanielistę (1990) oraz V.A Tsihrintzisa i C.B. Sidan (1998) w zlewniach na obszarze Stanów Zjednoczonych, potwierdziły przydatność tego modelu do symulowania hydrogramów fal wezbraniowych. Uzyskane wyniki wykazały dobrą zgodność pomiędzy pomierzonymi i obliczonymi przepływami.

W niniejszym artykule przedstawiono procedurę autorskiego programu komputerowego, który wykorzystuje model SBUH do symulacji hydrogramów wezbrań w małej zlewni miejskiej. Na podstawie analizy 13 zdarzeń opad–odpływ, przy zastosowaniu metody iteracyjnej, dokonano identyfikacji parametrów modelu, takich jak czas koncentracji ( $t_c$ ) oraz współczynnik retencji zbiornika ( $K_r$ ). Wyznaczone wartości  $t_c$  wykorzystano do ustalenia równania, które na podstawie charakterystyki opadu efektywnego umożliwia obliczenie czasu koncentracji dla poszczególnych zdarzeń. Obliczony za pomocą tego równania czas koncentracji wykorzystano następnie w symulacji hydrogramów przepływów. Symulowane przepływy maksymalne porównano z przepływami pomierzonymi; to pozwoliło ocenić poprawność zastosowanej procedury obliczeniowej oraz modelu SBUH.

## Charakterystyka badanej zlewni

Analiza obejmuje zurbanizowaną zlewnię Potoku Służewieckiego po profil „Rosoła”, zlokalizowany na wysokości dawnej ulicy Rosoła (ryc. 1). Zlewnia położona jest w południowej części Warszawy i obejmuje całość lub fragmenty dzielnic: Okęcie, Wola, Mokotów, Kabaty, Ursynów i Wilanów. Potok Służewiecki jest częściowo kanałem otwartym lub zamkniętym, do którego rozbudowaną siecią kanalizacyjną odprowadzane są wody opadowe z obszaru zlewni. W zlewni występują liczne przepusty i zbiorniki, które mają istotny wpływ na kształtowanie się przepływów w poszczególnych częściach zlewni potoku.

Profil „Rosoła” zamyka zlewnię o powierzchni całkowitej 43,0 km<sup>2</sup>. Obszar ten obejmuje fragment zlewni naturalnej i pokrytej siecią kanalizacji deszczowej. Po przeanalizowaniu przepływów maksymalnych pomierzonych w czterech profilach Potoku Służewieckiego i jednym profilu Rowu Grabowskiego (ryc. 1), zdecydowano, że do przedmiotowej analizy zostanie wybrana zlewnia cząstkowa „Ursynów” o powierzchni 14,7 km<sup>2</sup>. Obszar tej zlewni charakteryzuje około 40-procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych. Dużą jej część pokrywa również sieć kanalizacji deszczowej.



Ryc. 1. Lokalizacja posterunków opadowych i wodowskazowych oraz granice zlewni cząstkowych

Locations of rainfall and water-gauge stations, as well as the boundaries of sub-catchments  
 Posterunki opadowe i wodowskazowe / Rainfall and water-gauge stations: 1 – Ursynów-SGGW, 2 – Rosoła, 3 – Staw Służewiecki, 4 – Staw Berensewicz, 5 – Kłobucka, 6 – Rów Grabowski

Ze względu na małe wartości przepływów maksymalnych w profilu ujściowym Rowu Grabowskiego ( $Q_{\max} \approx 1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), obszar tej zlewni cząstkowej ( $11,8 \text{ km}^2$ ) uznano za nieaktywny hydrologicznie w kontekście badania przepływów w profilu „Rosoła”. Podobnie, ze względu na stosunkowo małe wartości przepływów maksymalnych w profilu „Kłobucka”, wynikające z retencji odpływu w zbiornikach podziemnych na obszarze lotniska Okęcie o łącznej pojemności  $42\,900 \text{ m}^3$  (wg pozwolenia wodno-prawnego maksymalny przepływ poniżej lotniska nie może przekraczać  $1,53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; Barszcz, 2010), wyłączono z analiz w pracy zlewnię cząstkową „Okęcie” ( $16,5 \text{ km}^2$ ).

Wysokość opadów w analizowanych w pracy zdarzeniach opad–odpływ zarejestrowano za pomocą elektronicznego deszczomierza korytkowego na posterunku opadowym „Ursynów-SGGW”. Stany wody pomierzono w profilu badawczym „Rosoła” przy użyciu elektronicznego czujnika typu „Diver”, który umożliwił ich ciągłą rejestrację w przyjętych 10-minutowych przedziałach czasowych. Na podstawie pomierzonych stanów wody i opracowanej krzywej przepływu obliczono przepływy w czasie analizowanych zdarzeń z okresu 2006-2008. Posterunek opadowy oraz czujniki do pomiaru stanów wody zainstalowano w ramach projektu badawczego COST/210/2006.

### Procedura obliczania hydrogramu przepływów

Do wyznaczenia hydrogramów przepływów w badanej zlewni zastosowano model Santa Barbara Unit Hydrograph (SBUH), opracowany do symulacji wzebrań w zlewniach zurbanizowanych. Koncepcja modelu opiera się na zbiorniku liniowym, którego parametr  $K_r$ , określany mianem współczynnika retencji zbiornika, oblicza się na podstawie czasu koncentracji  $t_c$  (h) i przyjętego kroku czasowego obliczeń  $\Delta t$  (h) według zależności (Wanielista i inni, 1997):

$$K_r = \frac{\Delta t}{(2t_c + \Delta t)} \quad [1]$$

Funkcja hydrogramu jednostkowego w modelu SBUH (dostosowana przez autora do układu jednostek miar SI) ma postać:

$$I(t) = 0,275 \frac{R(t)A}{\Delta t} \quad [2]$$

gdzie:

$I(t)$  – rzędne hydrogramu jednostkowego ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),

$R(t)$  – wysokość opadu efektywnego w kolejnych przedziałach czasu  $\Delta t$  (mm),

$\Delta t$  – krok czasowy obliczeń (h),

$A$  – powierzchnia zlewni ( $\text{km}^2$ ).

Rzędne hydrogramu przepływów ustala się na podstawie zależności:

$$Q(t) = Q(t - \Delta t) + K_r [I(t - \Delta t) + I(t) - 2Q(t - \Delta t)] \quad [3]$$

gdzie:

$Q(t)$  – rzędne hydrogramu przepływów ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),

$I(t)$  – rzędne hydrogramu jednostkowego ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

W przyjętej przez autora metodyce czas koncentracji  $t_c$  i zależny od niego parametr  $K_r$  najpierw obliczono przy zastosowaniu metody iteracyjnej. Analizowano dane o opadzie i odpływie dotyczące 13 zdarzeń opad–odpływ (tab. 1). Stosując metodę iteracyjną uzyskano te same wartości dla pomierzonych i symulowanych przepływów maksymalnych. Wysokości opadu efektywnego, parametry modelu SBUH oraz rzędne symulowanych hydrogramów przepływów w reakcji na pomierzone sumy opadów deszczy obliczono za pomocą autorskiego programu komputerowego. Procedura opracowanego programu (obejmująca tylko opcje zastosowane do analiz w pracy) umożliwiła symulację hydrogramów według następujących kroków obliczeniowych:

1. Dane wejściowe i założenia

- czas trwania opadu deszczu: przyjęto czasy odpowiadające pomierzonym opadom;
- wysokość opadu całkowitego w kolejnych przedziałach czasu trwania opadu: pomierzone wysokości opadu;
- krok czasowy obliczeń:  $\Delta t = 10$  min;
- powierzchnia zlewni:  $A = 14,7$  km<sup>2</sup>.

2. Obliczenie opadu efektywnego

- wysokość opadu efektywnego w kolejnych przedziałach czasowych: obliczono metodą SCS (USDA-SCS, 1975) przy wykorzystaniu parametrów CN;
- wartości parametru CN: obliczono dla poszczególnych zdarzeń na podstawie danych pomiarowych opad–odpływ (warstwy odpływu obliczono na podstawie podanych w programie pomierzonych hydrogramów przepływów);

3. Obliczenie parametrów modelu i rzędnych hydrogramu przepływów

- metoda obliczania hydrogramów: model Santa Barbara Unit Hydrograph (SBUH);
- czas koncentracji ( $t_c$ ): 1 – ustalono dla analizowanych zdarzeń metodą iteracyjną; 2 – obliczono na podstawie ustalonej w pracy zależności pomiędzy czasem koncentracji i charakterystyką opadu efektywnego (równanie 4);
- współczynnik retencji zbiornika ( $K_r$ ): obliczono dla zdarzeń na podstawie wartości czasu koncentracji i przyjętego kroku czasowego obliczeń (równanie 1);
- rzędne hydrogramu jednostkowego: obliczono na podstawie wysokości opadu efektywnego cząstkowego, powierzchni zlewni i przyjętego w obliczeniach kroku czasowego (równanie 2);
- rzędne hydrogramu przepływów: obliczono na podstawie rzędnych hydrogramu jednostkowego oraz wartości parametru  $K_r$  (równanie 3).

## Analiza parametrów modelu i symulowanych przepływów

Przy wykorzystaniu autorskiego programu komputerowego symulowano przepływy w reakcji na opady deszczu pomierzone dla 13 zdarzeń (tab. 1). Do analizy wybrano zdarzenia opad–odpływ, dla których dysponowano wysokościami opadu zarejestrowanymi na posterunku opadowym „Ursynów-SGGW” oraz spełniające dwa inne kryteria: (1) warstwa opadu była większa od 5,0 mm; (2) przepływy maksymalne hydrogramów pomierzonych w profilu „Rosofa” były większe od  $5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Tabela 1. Parametry modelu SBUH oraz symulowane i pomierzone przepływy maksymalne  
Values of model's parameters and simulated and measured maximum flows

| Lp.<br>No.                  | Data<br>zdarzenia<br><i>Date of the<br/>event</i> | <i>P</i><br><i>Rainfall</i><br>(mm) | $t_c$ obl.1<br>(h) | $K_r$<br>(h) | $I_{\text{max, ef.}}$<br>(mm<br>$\text{h}^{-1}$ ) | $t_c$ obl.2<br>(h) | $Q_{\text{max}}$<br>sym.<br>( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) | $Q_{\text{max}}$<br>pom.<br>( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) | Błąd<br>wzgl.<br><i>Error</i><br>(%) |
|-----------------------------|---|-------------------------------------|--------------------|--------------|---|--------------------|--|--|--------------------------------------|
|                             |   | 1                                   | 2                  | 3            | 4   | 5                  | 6  | 7  | 8                                    |
| 1                           | 12.07.2006  | 20,8                                | 0,471              | 0,150        | 3,84  | 0,482              | 8,957  | 8,861  | 1,1                                  |
| 2                           | 20.09.2006  | 16,2                                | 0,707              | 0,105        | 9,18  | 0,733              | 10,846   | 10,909   | -0,6                                 |
| 3                           | 15.05.2007  | 13,9                                | 0,409              | 0,169        | 7,80  | 0,668              | 16,103   | 12,914   | 24,7                                 |
| 4                           | 9.06.2007   | 8,1                                 | 1,557              | 0,051        | 11,52   | 0,843              | 11,644   | 6,207  | 87,6                                 |
| 5                           | 19.06.2007  | 5,8                                 | 0,154              | 0,351        | 3,54  | 0,468              | 5,609  | 6,017  | -6,8                                 |
| 6                           | 21.06.2007  | 12,3                                | 0,559              | 0,130        | 2,46  | 0,417              | 6,161  | 5,265  | 17,0                                 |
| 7                           | 2.07.2007   | 11,0                                | 0,507              | 0,141        | 3,42  | 0,462              | 7,009  | 6,311  | 11,1                                 |
| 8                           | 4.07.2007   | 5,6                                 | 0,418              | 0,166        | 5,34  | 0,552              | 7,274  | 8,273  | -12,1                                |
| 9                           | 22.07.2007  | 14,5                                | 0,876              | 0,087        | 16,68   | 1,085              | 11,972   | 13,802   | -13,3                                |
| 10                          | 27.07.2007  | 5,7                                 | 0,664              | 0,112        | 6,60  | 0,612              | 6,717  | 6,119  | 9,8                                  |
| 11                          | 2.08.2008   | 6,2                                 | 0,445              | 0,158        | 2,70  | 0,428              | 6,759  | 5,916  | 14,2                                 |
| 12                          | 15.08.2008  | 43,6                                | 1,539              | 0,051        | 18,18   | 1,156              | 24,385   | 22,035   | 10,7                                 |
| 13                          | 16.08.2008  | 15,2                                | 0,887              | 0,086        | 21,06   | 1,291              | 11,021   | 15,378   | -28,3                                |
| Minimum / <i>Min</i>        |   | 5,6                                 | 0,154              | 0,051        | 2,46  | 0,417              | 5,609  | 5,265  | -28,3                                |
| Maksimum / <i>Max</i>       |   | 43,6                                | 1,557              | 0,351        | 21,06   | 1,291              | 24,385   | 22,035   | 87,6                                 |
| Średnia / <i>Average</i>    |   | 13,8                                | 0,707              | 0,135        | 8,64  | 0,707              | 10,343   | 9,847  | 8,9                                  |
| Odch. stand./ <i>St. d.</i> |   | 10,2                                | 0,422              | 0,076        | 6,35  | 0,298              | 5,194  | 4,996  | 27,8                                 |

$Q_{\text{max}}$  pom.,  $Q_{\text{max}}$  sym. – pomierzone i symulowane przepływy maksymalne / measured and simulated maximum flows;

$t_c$  obl.1,  $t_c$  obl.2 – czasy koncentracji obliczone metodą iteracyjną i za pomocą równania / times of concentration calculated using the iterative method and an equation;

$K_r$  – parametr modelu obliczony metodą iteracyjną / parameter of the model calculated using the iterative method;

$I_{\text{max, ef.}}$  – maksymalna intensywność opadu efektywnego / maximum intensity of effective rainfall.

Opracowanie własne. / Author's own calculations.

Uwzględnione w analizie pomierzone opady oraz przepływy maksymalne były zróżnicowane. Sumy opadu mieściły się w przedziale 5,6-43,6 mm, przy średniej 13,8 mm. Przepływy maksymalne, pomierzone w profilu „Rosola”, wynosiły od 5,265 do 22,035 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, przy średniej 9,847 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

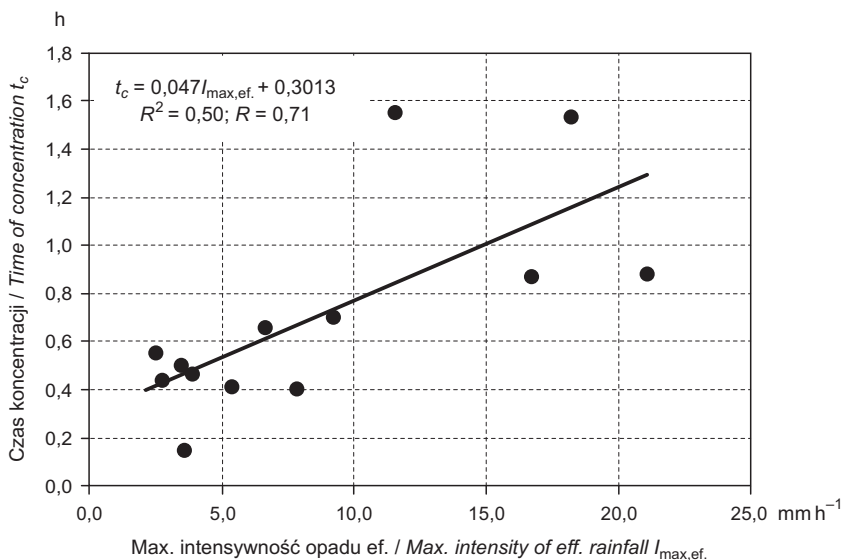
Czas koncentracji i zależny od niego parametr  $K_r$  obliczono dla poszczególnych zdarzeń metodą iteracyjną. Obliczony czas koncentracji ( $t_c$  obl.) oraz współczynniki retencji zbiornika ( $K_r$ ) były zróżnicowane i wynosiły odpowiednio od 0,154 do 1,557 h (średnio 0,707 h) oraz od 0,051 do 0,351 h (średnio 0,135 h).

Na podstawie warstw opadu efektywnego, obliczonych w poszczególnych krokach czasowych, ustalono maksymalną intensywność opadu efektywnego ( $I_{\max, \text{ef}}$ ) dla analizowanych zdarzeń (tab. 1). Mieściły się one w przedziale 2,46-21,06 mmh<sup>-1</sup> (średnio 8,64 mmh<sup>-1</sup>). Następnie opracowano zależność pomiędzy maksymalną intensywnością opadu efektywnego a czasem koncentracji (ryc. 2). W ten sposób otrzymano równanie, które umożliwia wyznaczenie podstawowego parametru modelu SBUH, jakim jest czas koncentracji  $t_c$ . Równanie przyjęło postać:

$$t_c = 0,047 I_{\max, \text{ef}} + 0,3013 \quad [4]$$

gdzie:

$t_c$ ,  $I_{\max, \text{ef}}$  – zmienne oznaczające odpowiednio wartości czasu koncentracji (h) oraz maksymalnej intensywności opadu efektywnego (mm h<sup>-1</sup>).



Ryc. 2. Zależność między czasem koncentracji i maksymalną intensywnością opadu efektywnego

Relationship between time of concentration and maximum intensity of effective rainfall

Wizualna ocena rozmieszczenia punktów na rycinie 2, przedstawiających zależność między maksymalnymi intensywnościami opadu efektywnego i czasami koncentracji, wskazuje na większy rozrzut punktów dla wartości intensywności opadu efektywnego większych od  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . Analiza statystyczna wykazała, że opisaną zależność charakteryzują się współczynniki determinacji i korelacji wynoszące odpowiednio 0,50 i 0,71. Między badanymi charakterystykami istnieje korelacja, która jest silnym związkiem liniowym. Ustalona wartość współczynnika korelacji ( $R = 0,71$ ) jest większa od wartości krytycznej ( $R = 0,55$ ) dla poziomu istotności 0,05. Obliczona w programie Statistica wartość „p” wynosiła 0,007. Uzyskane miary wskazują, że analizowana zależność jest statystycznie istotna.

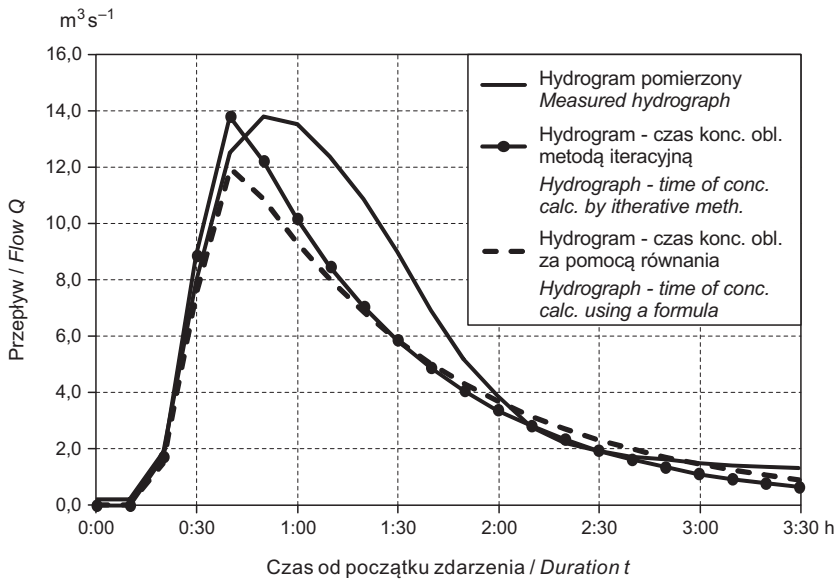
Ustalone równanie [4] ma potencjalne zastosowanie do obliczania czasu koncentracji w modelu SBUH i zależnego od niego parametru  $K_r$  dla różnych wysokości opadu, przyjętych do symulacji przepływów w badanej zlewni. Dalsze prace autora będą ukierunkowane na szczegółową analizę zależności między badanymi charakterystykami na podstawie większej liczby danych pomiarowych oraz jej weryfikację w innych zlewniach zurbanizowanych.

Za pomocą ustalonego równania [4] obliczono wartości czasu koncentracji ( $t_c$  obl.2) dla analizowanych zdarzeń na podstawie wartości maksymalnej intensywności opadu efektywnego. Obliczone czasy koncentracji wykorzystano następnie w modelu SBUH do symulacji przepływów ( $Q_{\text{max}}$  sym.). Obliczone czasy koncentracji wynosiły od 0,417 do 1,291 h, przy wartości średniej 0,707 h (tab. 1). Średnie wartości czasu koncentracji, obliczone metodą iteracyjną i za pomocą równania, były takie same. Czas koncentracji obliczony tymi dwiema metodami był jednak znacząco różny w odniesieniu do niektórych zdarzeń. Symulowane wartości przepływów wynosiły od 5,609 do 24,385  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , średnio 10,343  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  (tab. 1). W celu wizualnej oceny zgodności hydrogramów przepływów, pomierzonego dla przykładowego zdarzenia w dniu 22.07.2007 r. oraz symulowanych modelem SBUH dla czasów koncentracji obliczonych metodą iteracyjną i za pomocą równania [4], przedstawiono wymienione hydrogramy na wspólnym wykresie (ryc. 3). Hydrogram przepływów dla tego przykładowego zdarzenia był wywołany opadem o wysokości 14,5 mm, która jest zbliżona do wartości średniej opadu dla analizowanych zdarzeń.

Wartości błędu względnego (procentowego), ustalone na podstawie pomierzonych i symulowanych przepływów ( $Q_{\text{max}}$  sym.), wynosiły dla analizowanych zdarzeń od -28,3 do 87,6%, przy wartości średniej 8,9% i odchyleniu standardowym 27,8%. Błędy względne symulacji przepływów dla dziewięciu zdarzeń były mniejsze od 15%. Średni błąd względny, obliczony bez uwzględnienia największego błędu dla zdarzenia w dniu 9.06.2007 r. (znacznie odbiegającego od pozostałych wartości), wyniósł 2,3%.

Wartość średnia błędu względnego symulacji przepływów maksymalnych (8,9%), obliczona za pomocą konceptualnego modelu SBUH, była mniejsza od wartości średniej błędu, ustalonej w innych analizach autora dla zlewni Potoku





Ryc. 3. Hydrogramy pomierzony i obliczone za pomocą dwóch metod  
Hydrographs measured and calculated using two methods

Służewieckiego przy wykorzystaniu modelu SWMM, wynoszącej 11,3% (Barszcz, 2009). Oznacza to, że przy użyciu prostego i łatwego w zastosowaniu modelu konceptualnego (model o parametrach skupionych) uzyskano mniejszy błąd symulacji przepływów niż przy zastosowaniu złożonego matematycznie i cechującego się dużą liczbą parametrów modelu SWMM (model o parametrach rozłożonych).

### Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono procedurę obliczeniową autorskiego programu komputerowego, którą wykorzystano do symulacji hydrogramów przepływu w zurbanizowanej zlewni cząstkowej ( $A = 14,7 \text{ km}^2$ ) Potoku Służewieckiego w Warszawie. Zastosowana procedura wykorzystuje konceptualny model hydrologiczny Santa Barbara Unit Hydrograph (SBUH). Analizując dane o opadzie i odpływie dla 13 wybranych zdarzeń, posługując się metodą iteracyjną wyznaczono parametry modelu SBUH ( $t_c$ ,  $K_r$ ). Wyznaczając parametry modelu uzyskano pełną zgodność pomiędzy pomierzonymi i symulowanymi przepływami maksymalnymi. Obliczone wartości czasu koncentracji ( $t_c$  obl.1) wykorzystano do ustalenia równania, które umożliwia obliczenie czasu koncentracji i zależnego od niego współczynnika retencji zbiornika  $K_r$  na podstawie maksymalnych intensywności opadu efektywnego. Opracowane równanie sprawdzono, obli-

czając czasy koncentracji, które następnie wykorzystano w modelu SBUH do symulacji hydrogramów przepływów w profilu „Rosola”. Przepływy maksymalne obliczone modelem SBUH oraz pomierzone w terenie porównano ze sobą. Różnice oceniono obliczając błąd względny. Przedstawione analizy umożliwiają sformułowanie następujących wniosków.

Obliczone metodą iteracyjną wartości czasu koncentracji i współczynnika retencji zbiornika ( $K_r$ ) wynosiły odpowiednio od 0,154 do 1,557 h (średnio 0,707 h) oraz od 0,051 do 0,351 h (średnio 0,135 h). Zakres zmienności tych parametrów w analizowanych zdarzeniach opad–odpływ był bardzo zróżnicowany.

Na podstawie czasu koncentracji i maksymalnych intensywności opadu efektywnego obliczonych dla poszczególnych zdarzeń sformułowano równanie do obliczania czasu koncentracji [4]. Obliczone za jego pomocą wartości czasu koncentracji wynosiły od 0,417 do 1,291 h, przy średniej 0,707 h. Średnie wartości czasu koncentracji, obliczone metodą iteracyjną i za pomocą równania, były takie same.

Obliczony za pomocą równania [4] czas koncentracji wykorzystano w symulacji przepływów maksymalnych, których wartości wynosiły od 5,609 do 24,385 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Średnia wartość przepływu maksymalnego wynosiła 10,343 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> i była zbliżona do wartości średniej pomierzonych przepływów (9,847 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>).

Wartości błędu względnego, ustalone na podstawie pomierzonych i symulowanych przepływów maksymalnych, wynosiły dla analizowanych zdarzeń od -28,3 do 87,6% (średnio 8,9%). Błędy względne symulacji przepływów dla dzie więciu zdarzeń były mniejsze od 15%.

Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność modelu SBUH do symulacji hydrogramów przepływów w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego. Dalsze prace autora będą ukierunkowane na szczegółową analizę zależności między czasem koncentracji i charakterystykami opadu. Prowadzone prace będą miały na celu wykorzystanie modelu SBUH w zlewniach zurbanizowanych, w których nie prowadzi się pomiarów przepływów.

## Piśmiennictwo / References

- Barszcz M., 2009, *Prognoza maksymalnych przepływów prawdopodobnych wywołanych ulewami w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 18, 4 (46), s. 3-21.
- Barszcz M., 2010, *Ocena zagrożenia powodziowego i możliwości jego ograniczenia w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 68, s. 219-230.
- Rossman L.A., 2004, *Storm Water Management Model – User`s Manual Version 5.0*, United States Environmental Protection Agency (EPA), Cincinnati, OH.
- Stubchaer J.M., 1975, *The Santa Barbara Urban Hydrograph Method*, [w:] *Proceedings of National Symposium on Urban Hydrology and Sediment Control, July 28-31*, University of Kentucky, Lexington, s. 131-141.

- Tsihrintzis V.A., Sidan C.B., 1998, *Modelling urban stormwater runoff processes using the Santa Barbara Method*, Water Resources Management, 12, s. 139-166.
- USDA-SCS, *National Engineering Handbook*, 1975, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service Section 4, Washington, DC.
- Wanielista M.P., 1990, *Hydrology and Water Quantity Control*, Wiley, New York.
- Wanielista M.P., Kersten R., Eaglin R., 1997, *Hydrology: Water Quantity and Quality Control*, John Wiley & Sons, New York (2nd ed.).

[Wpłynęło: listopad 2013; poprawiono: kwiecień 2014 r.]

MARIUSZ BARSZCZ

#### THE APPLICATION OF THE SANTA BARBARA UNIT HYDROGRAPH MODEL TO SIMULATE A FLOW HYDROGRAPH IN URBANIZED CATCHMENTS

The aim of the work detailed here was to assess the suitability of the conceptual Santa Barbara Unit Hydrograph model for simulating a flow hydrograph in urbanised catchments exemplified by that of the Służewiec Stream sub-catchment ( $A = 14.7 \text{ km}^2$ ) in Warsaw, Poland. The area of the sub-catchment was characterised by a 40% share of impermeable surfaces, a large portion of which are equipped with a stormwater drainage system.

The article presents the calculation procedure applied in a computer program developed by the author, which can be used to simulate flows on the basis of the SBUH model. The scope of the work included determination of parameters of the model ( $t_c$ ,  $K_r$ ), using the iterative method for 13 selected rainfall-runoff events measured in the catchment during the 2006-2008 period. As parameters of the model were determined, no differences between measured and simulated maximal flows were noted, while parameters calculated for the individual analyzed rainfall-runoff events were found to vary markedly.

The data obtained were used to devise a formula providing for calculation of the retention coefficient for the reservoir ( $K_r$ ), as well as the time of concentration ( $t_c$ ) based on the coefficient, and calculated in relation to the maximum intensity of effective rainfall. Values for the time of concentration calculated using the formula ranged from 0.417 to 1.291 h, with a mean value of 0.707 h. Mean values for concentrations determined using the iterative method were found to be the same as those obtained through application of the formula described above.

The times of concentration calculated using the formula were applied in simulating maximum flows using the SBUH model, with values found to range between  $5.609$  and  $24.385 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . The average value for the maximum flow of  $10.343 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  did not differ much from the average value of measured flows ( $9.847 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ).

Maximum flows calculated using the model were compared with those measured in the field, in this way making possible an assessment of the calculation procedure and the SBUH model. Relative error values established on the basis of these flows ranged from  $-28.3$  to  $87.6\%$  ( $8.9\%$  on average). Relative errors of flow simulations for the 9 events did not exceed  $15\%$ . The results obtained confirm the suitability of the SBUH model for simulating flow hydrographs in the urbanized Służewiecki Stream sub-catchment.

