

Mariusz BARSZCZ¹

ADAPTACJA MODELU *SANTA BARBARA UNIT HYDROGRAPH* DO OBLICZANIA HYDROGRAMU PRZEPIŁYWÓW W ZURBANIZOWANEJ ZLEWNI POTOKU SŁUŻEWIECKIEGO

Celem pracy jest przedstawienie procedury obliczeniowej hydrogramu przepływów za pomocą conceptualnego modelu *Santa Barbara Unit Hydrograph* (SBUH) oraz jej weryfikacja w zlewni cząstkowej Potoku Służewieckiego w Warszawie o powierzchni 14,7 km². Weryfikacja tej procedury i modelu SBUH polegała na ocenie zgodności przepływów maksymalnych, obliczonych za pomocą modelu i pomierzonych w profilu „Rosoła”. Zakres pracy obejmuje wyznaczenie parametrów modelu (t_c , K_c) metodą iteracyjną dla 25 zdarzeń opad-odpływ. Stosując metodę iteracyjną, uzyskano te same wartości dla pomierzonych i symulowanych przepływów maksymalnych. Na podstawie uzyskanych danych opracowano równanie, które umożliwia obliczenie czasu koncentracji (t_c) w relacji do maksymalnej intensywności opadu efektywnego. Korelacja między tymi charakterystykami jest silnym związkiem liniowym ($R = 0,73$). Obliczone za pomocą równania czasu koncentracji wykorzystano do symulacji hydrogramów przepływów modelem SBUH. Wartości najmniejszego i największego błędu względnego (procentowego) ustalone na podstawie pomierzonych i symulowanych przepływów dla analizowanych zdarzeń, wynosiły odpowiednio -0,4 i 71,5%. Średni błąd obliczony przy uwzględnieniu wartości bezwzględnych błędów symulacji dla poszczególnych zdarzeń (zaniedbano znaki minus dla ustalonych błędów względnych) wynosił 17,2%. Do obliczenia opadu efektywnego zastosowano metodę SCS. Wartości parametru CN w tej metodzie wyznaczono dla analizowanych zdarzeń na podstawie danych opad-odpływ. Ustalono wartości wykorzystano do opracowania równania, które umożliwia obliczenie parametru CN na podstawie sumy opadu całkowitego.

Słowa kluczowe: zlewnia zurbanizowana, proces opad-odpływ, model SBUH, opad efektywny, parametr CN, czas koncentracji, przepływy maksymalne

1. Wprowadzenie

Wiele modeli hydrologicznych zostało opracowanych do symulacji hydrogramu przepływów. Charakteryzują się one różnym stopniem złożoności – od prostych wzorów empirycznych lub zależności korelacyjnych do skomplikowa-

¹ Mariusz Barszcz, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, tel. 22 5935284, mariusz_barszcz@sggw.pl

nych modeli matematycznych reprezentujących wszystkie procesy obiegu wody w zlewni [3, 5, 12]. W przeważającej części są to modele przeznaczone do obliczeń w zlewniach nieurbanizowanych. Wyznaczenie hydrogramu przepływów potrzebnych do wymiarowania obiektów hydrotechnicznych na obszarze miasta nadal wymaga opracowania modeli hydrologicznych lub udoskonalenia procedur obliczeniowych, które pozwolą precyzyjnie obliczyć przepływy maksymalne i objętość odpływu w reakcji na opad deszczu o określonych charakterystykach. Jednocześnie modele te powinny się charakteryzować małą liczbą parametrów, które można zidentyfikować za pomocą podstawowych danych pomiarowych lub formuł empirycznych. Dysponowanie prostym modelem hydrologicznym o takich charakterystykach jest pożądane głównie przez biura projektowe, które stosują je do obliczeń dla celów praktycznych. Wykorzystanie złożonych matematycznie modeli do analizy procesu opad-odpływ w zlewniach zurbanizowanych, np. takich jak model SWMM – *Storm Water Management Model* [4], wymaga dużego nakładu pracy i doświadczenia w prowadzeniu obliczeń, ale przede wszystkim identyfikacji wielu parametrów modelu. W określeniu wartości liczbowych parametrów należy dysponować odpowiednim zbiorem danych pomiarowych procesu opad-odpływ. Pomimo rozbudowanych algorytmów obliczeniowych uzyskiwane wyniki często nie są wystarczająco dokładne. Potwierdzenie tej tezy można znaleźć w pracach Barszcza [1, 2], opisujących zastosowanie modelu SWMM w zlewni Potoku Służewieckiego.

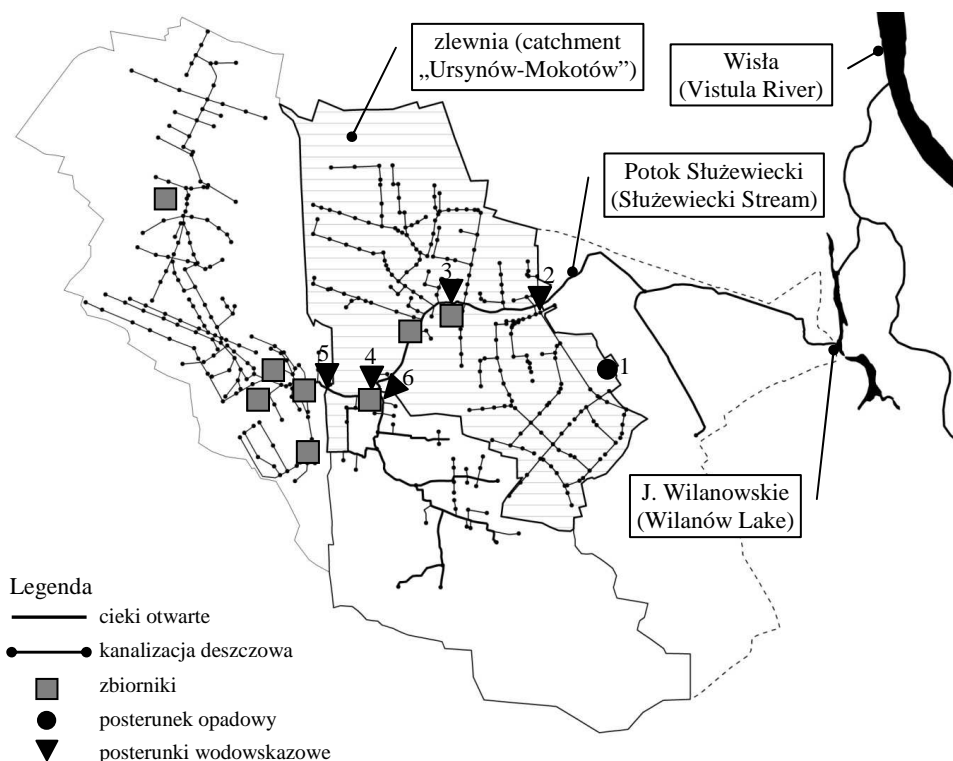
Przedstawione argumenty skłoniły autora do opracowania procedury obliczeniowej hydrogramu przepływów w małych zlewniach zurbanizowanych (miejskich) za pomocą prostego, konceptualnego modelu *Santa Barbara Unit Hydrograph* (SBUH). Weryfikację tej procedury oraz modelu SBUH przeprowadzono w zlewni cząstkowej Potoku Służewieckiego w Warszawie do profilu „Rosofa”. Weryfikacja polegała na ocenie zgodności przepływów maksymalnych, obliczonych za pomocą modelu i pomierzonych w profilu „Rosofa”. Inne prace prowadzone przez Stubchaera [7], Wanielistę [10] oraz Tsihrintzisa i Sidan [8] w zlewniach położonych na obszarze USA potwierdziły przydatność tego modelu do symulowania hydrogramów przepływu.

Zakres pracy obejmował identyfikację parametrów modelu (t_c – czas koncentracji, K_r – współczynnik retencji zbiornika) metodą iteracyjną dla 25 zdarzeń opad-odpływ. Na podstawie uzyskanych danych opracowano równanie, które umożliwia obliczenie czasu koncentracji (t_c) z uwzględnieniem maksymalnej intensywności opadu efektywnego. Obliczone za pomocą równania czasu koncentracji wykorzystano do symulacji hydrogramów przepływów modelem SBUH. Do obliczenia opadu efektywnego zastosowano metodę opracowaną przez SCS – *Soil Conservation Service* (NRCS). Ustalone na podstawie danych opad-odpływ wartości parametru CN (*Curve Number*) w tej metodzie wykorzystano do opracowania równania, które umożliwia obliczenie CN w relacji do sumy opadu całkowitego.

2. Charakterystyka badanej zlewni

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

Profil „Rosoła” zamyka zlewnię o powierzchni całkowitej 43,0 km². Po przeanalizowaniu przepływów maksymalnych pomierzonych w czterech profilach Potoku Służewieckiego i jednym profilu „Rowu Grabowskiego” (rys. 1.) zdecydowano, że do przedmiotowej analizy zostanie wybrana zlewnia cząstko-



Rys. 1. Lokalizacja posterunków wodowskazowych i opadowego oraz granice zlewni cząstkowych: 1 – „Ursynów-SGGW”, 2 – „Rosoła”, 3 – „Staw Służewiecki”, 4 – „Staw Berensewicz”, 5 – „Kłobucka”, 6 – „Rów Grabowski”

Fig. 1. Location of water and rainfall gauge stations as well boundary of subcatchments: 1 – „Ursynów-SGGW”, 2 – „Rosoła”, 3 – „Staw Służewiecki”, 4 – „Staw Berensewicz”, 5 – „Kłobucka”, 6 – „Rów Grabowski”

wa „Ursynów-Mokotów” o powierzchni 14,7 km². Ze względu na bardzo małe wartości przepływów maksymalnych w profilu ujściowym „Rowu Grabowskiego” ($Q_{\max} \approx 1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) oraz w profilu „Kłobucka” (według pozwolenia wodnoprawnego maksymalny przepływ poniżej lotniska nie może przekraczać 1,53 m³·s⁻¹) obszary tych zlewni cząstkowych uznano za nieaktywne hydrologicznie w kontekście badania przepływów w profilu „Rosoła”. Obszar zlewni cząstkowej „Ursynów-Mokotów” charakteryzuje się ok. 40-procentowym udziałem powierzchni nieprzepuszczalnych i dużym skanalizowaniem.

Wysokości opadów dla analizowanych zdarzeń opad-odpływ z okresu 2006-2008 r. zarejestrowano za pomocą elektronicznego deszczomierza korytkowego na posterunku opadowym „Ursynów-SGGW”. Stany wody pomierzono w profilu badawczym „Rosoła” za pomocą 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 dla analizowanych zdarzeń. Postępki wodowskazowe i opadowy zainstalowano w ramach projektu badawczego COST/210/2006.

3. Procedura obliczania hydrogramu przepływów

Do wyznaczenia hydrogramów przepływów w badanej zlewni zastosowano model SBUH – *Santa Barbara Unit Hydrograph* [7], który został opracowany w Stanach Zjednoczonych do obliczeń 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] (oznaczającego najdłuższy czas przepływu kropli wody do rozpatrywanego profilu w zlewni) i przyjętego kroku czasowego obliczeń Δt [h] według zależności [11]:

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

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 [m³·s⁻¹],
 $R(t)$ – wysokość opadu efektywnego w kolejnych przedziałach czasu Δt [mm],
 Δt – krok czasowy obliczeń [h],
 A – powierzchnia zlewni [km²].

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 metodą iteracyjną na podstawie danych o opadzie i przepływach w profilu „Rosoła” dla 25 zdarzeń (tab. 1.). Stosując metodę iteracyjną, uzyskano te same wartości dla pomierzonych i symulowanych przepływów maksymalnych. Następnie obliczono czasy koncentracji dla poszczególnych zdarzeń za pomocą ustalonego równania w relacji do maksymalnych intensywności opadu efektywnego.

Wysokości opadu efektywnego, parametry modelu SBUH oraz rzędne symulowanych hydrogramów przepływów w reakcji na pomierzone sumy opadów deszczu obliczono w badanej zlewni cząstkowej „Ursynów-Mokotów” ($A = 14,7 \text{ km}^2$) za pomocą autorskiego programu komputerowego. Przyjęty krok czasowy obliczeń wynosił 10 min. Procedura opracowanego programu (obejmująca tylko opcje zastosowane do analiz w pracy) umożliwiła wyznaczenie hydrogramów w dwóch etapach:

1. Obliczenie opadu efektywnego

- wysokość opadu efektywnego w kolejnych przedziałach czasowych obliczono metodą opracowaną przez *Soil Conservation Service – SCS* [6, 9], której parametrem jest CN,
- wartości parametru CN wyznaczono: 1) dla 25 zdarzeń na podstawie danych pomiarowych opad-odpływ (warstwy odpływu obliczono na podstawie pomierzonych hydrogramów przepływu), 2) dla dwóch przykładowych zdarzeń na podstawie ustalonej w pracy zależności między parametrem CN i sumą opadu całkowitego.

2. Obliczenie parametrów modelu i rzędnych hydrogramu przepływu

- czas koncentracji (t_c) obliczono: 1) dla analizowanych zdarzeń metodą iteracyjną, 2) na podstawie ustalonej w pracy zależności między czasem koncentracji i charakterystyką opadu efektywnego (równanie (4), tj. maksymalną intensywnością opadu efektywnego (opad efektywny obliczono z wykorzystaniem parametrów CN wyznaczonych na podstawie danych pomiarowych), 3) dla dwóch przykładowych zdarzeń na podstawie opisanej zależności, ale do obliczania wysokości opadu efektywnego przyjęto parametry CN wyznaczone za pomocą zależności między tym parametrem i sumą opadu całkowitego (równanie (5)),
- 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)).

4. Analiza parametrów modelu i symulowanych przepływów

Korzystając z autorskiego programu komputerowego, obliczono parametry modelu *Santa Barbara Unit Hydrograph* (t_c , K_r) oraz symulowano przepływy w reakcji na opady deszczu pomierzone dla 25 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) warstwy opadu większej od 5,0 mm, 2) przepływów maksymalnych hydrogramów pomierzonych w profilu „Rosofa” większych od $5,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Wykorzystane w analizie pomierzone opady oraz przepływy maksymalne były znacząco zróżnicowane. Sumy opadu mieściły się w przedziale 5,1–43,6 mm (średnio 14,4 mm). Przepływy maksymalne hydrogramów wynosiły od 5,010 do 22,066 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, przy średniej 9,522 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Czas koncentracji i zależny od niego parametr K_r obliczono dla poszczególnych zdarzeń metodą iteracyjną. Obliczone czasy koncentracji (t_c iter.) oraz współczynniki retencji zbiornika (K_r) były zróżnicowane i wynosiły odpowiednio od 0,154 do 1,749 h (średnio 0,783 h) oraz od 0,045 do 0,351 h (średnio 0,119 h).

Na podstawie warstw opadu efektywnego obliczonych w poszczególnych krokach czasowych ustalono maksymalną intensywność opadu efektywnego ($I_{\text{max,ef}}$, obl. 1.) dla analizowanych zdarzeń (tab. 1.). Zawierały się one w przedziale 1,90–21,06 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (średnio 8,34 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$). Wartości parametru CN w metodzie opracowanej przez SCS [9] do obliczania opadu efektywnego, ustalone na podstawie danych pomiarowych opad-odpływ, zawierały się w przedziale 85,3–97,6. Średnia wartość CN dla wszystkich zdarzeń wynosiła 93,0.

Na podstawie uzyskanych danych opracowano zależność między maksymalnymi intensywnościami opadu efektywnego a czasami koncentracji (rys. 2.). W ten sposób otrzymano równanie, które umożliwia wyznaczenie podstawowego parametru modelu SBUH, jakim jest czas koncentracji:

$$t_c = 0,0513I_{\text{max,ef}} + 0,355 \quad (4)$$

gdzie t_c , $I_{\text{max,ef}}$ – zmienne oznaczające odpowiednio wartości czasu koncentracji [h] oraz maksymalnej intensywności opadu efektywnego [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$].

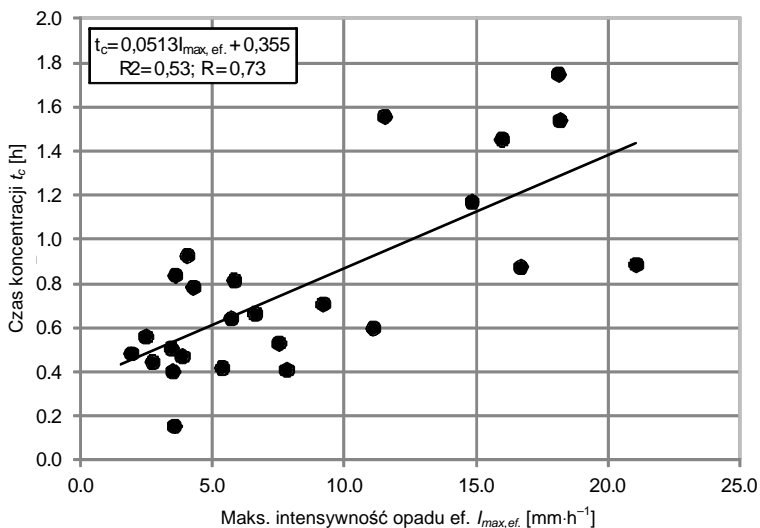
Tabela 1. Wartości parametrów modelu SBUH oraz symulowane i pomierzone przepływy maksymalne

Table 1. The values of the SBUH model parameters and simulated and measured maximum flows

Data wystąpienia zdarzenia	P [mm]	$t_{c,iter.}$ [h]	K_r [h]	CN [-]	$I_{max,ef.}$ obl. 1. [mm·h ⁻¹]	t_c obl. 1. [h]	Q_{max} sym. 1. [m ³ ·s ⁻¹]	Q_{max} pom. [m ³ ·s ⁻¹]	Błąd względny [%]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
12.07.2006	20,8	0,471	0,150	85,3	3,84	0,552	8,345	8,861	-5,8
20.09.2006	16,2	0,707	0,105	89,6	9,18	0,826	9,937	10,909	-8,9
15.05.2007	13,9	0,409	0,169	94,9	7,80	0,755	15,107	12,914	17,0
09.06.2007	8,1	1,557	0,051	97,4	11,52	0,946	10,642	6,207	71,5
10.06.2007	7,1	0,815	0,093	96,5	5,81	0,653	7,825	6,644	17,8
19.06.2007	5,8	0,154	0,351	97,1	3,54	0,537	5,182	6,017	-13,9
21.06.2007	12,3	0,559	0,130	94,3	2,46	0,481	5,993	5,265	13,8
02.07.2007	11,0	0,507	0,141	92,8	3,42	0,530	6,579	6,311	4,2
04.07.2007	5,6	0,418	0,166	97,6	5,34	0,629	6,702	8,273	-19,0
22.07.2007	14,5	0,876	0,087	93,2	16,68	1,211	10,918	13,802	-20,9
27.07.2007	5,7	0,664	0,112	97,4	6,60	0,694	6,214	6,119	1,6
11.07.2008	8,1	0,643	0,115	93,8	5,70	0,647	4,988	5,010	-0,4
02.08.2008	6,2	0,445	0,158	96,7	2,70	0,494	6,328	5,916	7,0
15.08.2008	43,6	1,539	0,051	86,5	18,18	1,288	22,606	22,035	2,6
16.08.2008	15,2	0,887	0,086	93,4	21,06	1,435	10,036	15,378	-34,7
30.05.2009	13,5	0,926	0,083	91,5	4,02	0,561	9,284	6,722	38,1
06.06.2009	9,3	0,483	0,147	95,3	1,90	0,452	5,816	5,647	3,0
09.06.2009	19,8	0,784	0,096	87,3	4,25	0,573	8,948	7,995	11,9
16.06.2009	11,6	0,838	0,090	93,7	3,58	0,539	7,958	6,326	25,8
23.06.2009	5,1	0,401	0,172	96,9	3,47	0,533	4,779	5,774	-17,2
25.06.2009	29,6	1,169	0,067	89,8	14,83	1,116	18,036	17,548	2,8
30.06.2009	11,9	1,453	0,054	94,5	15,97	1,174	8,83	7,309	20,8
05.07.2009	12,0	0,530	0,136	91,2	7,51	0,740	6,039	7,824	-22,8
05.07.2009	17,9	0,597	0,122	90,7	11,08	0,923	8,485	11,180	-24,1
17.07.2009	34,0	1,749	0,045	88,4	18,11	1,284	27,447	22,066	24,4
Minimum	5,1	0,154	0,045	85,3	1,90	0,452	4,779	5,010	-0,4
Maksimum	43,6	1,749	0,351	97,6	21,06	1,435	27,447	22,066	71,5
Średnia	14,4	0,783	0,119	93,0	8,34	0,783	9,721	9,522	17,2
Odczylenie standardowe	9,4	0,415	0,062	3,7	5,87	0,301	5,573	5,047	15,3

$t_{c,iter.}$, t_c obl. 1. – czas koncentracji obliczony metodą iteracyjną i za pomocą równania (4) (time of concentration calculated using the iterative method and the equation (4)), K_r – parametr modelu obliczony metodą iteracyjną (model's parameter calc. using the iterative method), CN – parametr obliczony na podstawie danych opad-odpływ (parameter calculated based on rainfall-runoff data), $I_{max,ef.}$ obl. 1. – maksymalna intensywność opadu efektywnego (maximum intensity of effective rainfall), Q_{max} pom., Q_{max} sym. 1. – pomierzone i symulowane przepływy maksymalne (measured and simulated maximum flows)

Wizualna ocena położenia punktów na rys. 2. wskazuje, że większe różnice w wartościach czasu koncentracji występują w relacji do maksymalnych intensywności opadu efektywnego większych niż $10 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Dla zdarzeń pomierzonych w dniach 09.06.2007 i 05.07.2009, charakteryzujących się prawie równymi wartościami maksymalnej intensywności opadu efektywnego ($11,52$ i $11,08 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$), ustalone metodą iteracyjną czasy koncentracji są znacząco różne i wynoszą odpowiednio $1,557$ i $0,597 \text{ h}$.



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

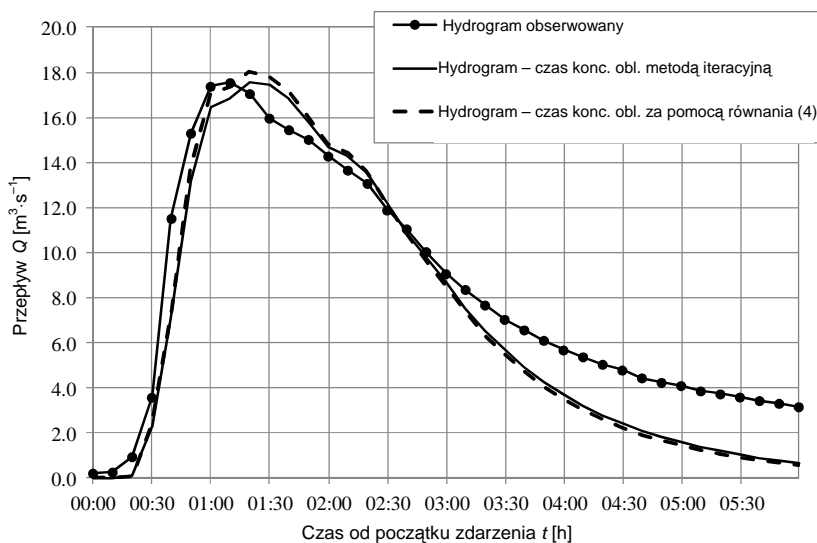
Fig. 2. The relationship between the time of concentration and the maximum intensity of effective rainfall

Analiza statystyczna wykazała, że opisana zależność charakteryzuje się współczynnikami determinacji i korelacji wynoszącymi odpowiednio $0,53$ i $0,73$. Między badanymi charakterystykami istnieje korelacja, która jest silnym związkiem liniowym. Ustalona wartość współczynnika korelacji ($R = 0,73$) jest większa od wartości krytycznej ($R = 0,40$) dla przyjętego poziomu istotności $0,05$. Oznacza to, że korelacja między czasem koncentracji i maksymalną intensywnością opadu efektywnego jest istotna statystycznie.

Następnie za pomocą ustalonego równania (4) obliczono wartości czasu koncentracji (t_c obl. 1.) dla analizowanych zdarzeń na podstawie wartości maksymalnej intensywności opadu efektywnego. Obliczone czasy koncentracji wykorzystane w modelu SBUH do symulacji przepływów (Q_{max} sym. 1.), wynosiły od $0,452$ do $1,435 \text{ h}$ przy wartości średniej $0,783 \text{ h}$ (tab. 1.). Średnie wartości czasu koncentracji obliczone metodą iteracyjną i za pomocą równania były takie same. Symulowane wartości przepływów wynosiły od $4,779$ do $27,447 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,

średnio $9,721 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wartości najmniejszego i największego błędu względnego (procentowego) ustalone na podstawie pomierzonych i symulowanych przepływów dla analizowanych zdarzeń wynosiły odpowiednio $-0,4$ i $71,5\%$. Średni błąd obliczony przy uwzględnieniu wartości bezwzględnych błędów symulacji dla poszczególnych zdarzeń (zaniedbano znaki minus dla ustalonych błędów względnych) wynosił $17,2\%$. Ustalone błędy symulacji przepływów były mniejsze od 15% dla 12 zdarzeń, a mniejsze od 25% dla 21 zdarzeń.

W celu wizualnej oceny zgodności hydrogramów przepływów, pomierzonych dla przykładowego zdarzenia w dniu 25.06.2009 r. oraz symulowanych modelem SBUH dla czasów koncentracji obliczonych metodą iteracyjną i za pomocą równania (4), na wspólnym wykresie (rys. 3.) przedstawiono wymienione hydrogramy. Hydrogram przepływów dla tego zdarzenia był wywołany opadem o wysokości $29,6 \text{ mm}$, który był jednym z największych opadów w badanym okresie.



Rys. 3. Hydrogramy obserwowane i obliczone za pomocą dwóch metod dla zdarzenia z dnia 25.06.2009 r.

Fig. 3. The Hydrographs observed and calculated using the two methods for the event on 25.06.2009

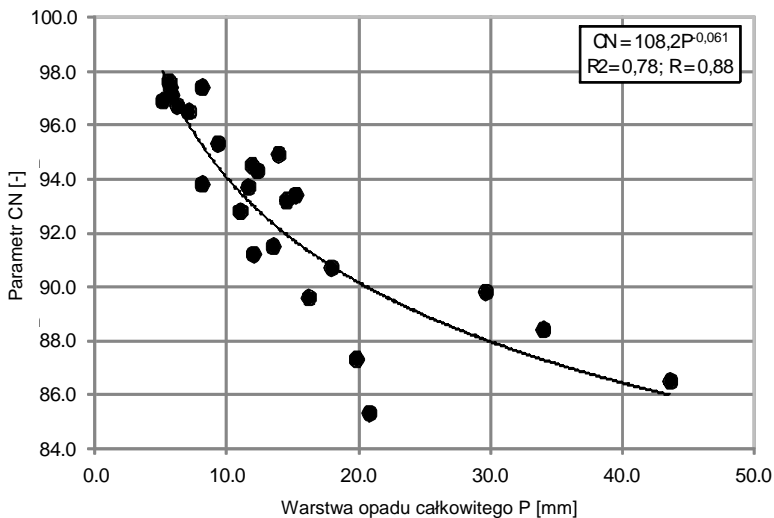
Zastosowanie równania (4) do wyznaczenia podstawowego parametru modelu SBUH, jakim jest czas koncentracji, wymaga ustalenia wartości maksymalnej intensywności opadu efektywnego dla określonego zdarzenia opadowego. W opracowanej metodyce obliczania hydrogramu przepływu ustalenie wartości tej charakterystyki opadu efektywnego w badanej zlewni lub w innej zlewni zurbanizowanej, w której nie prowadzi się pomiarów opadu i przepływu, jest uza-

leżnione od wyznaczenia dla określonego zdarzenia parametru CN w metodzie SCS obliczania opadu efektywnego.

Na podstawie uzyskanych danych opracowano zależność między sumami opadu całkowitego pomierzonymi dla analizowanych zdarzeń a obliczonymi wartościami parametru CN (rys. 4.). W ten sposób otrzymano równanie (5), które umożliwia wyznaczenie parametru CN na podstawie sumy opadu pomierzonej lub obliczonej dla deszczy o określonych charakterystykach. Opracowane równanie może mieć potencjalne zastosowanie w zurbanizowanych zlewniach niekontrolowanych, które charakteryzują się podobnymi warunkami hydrologicznymi do badanej zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie. Analiza statystyczna wykazała, że zależność między parametrem CN i sumą opadu charakteryzuje się współczynnikami determinacji i korelacji wynoszącymi odpowiednio 0,78 i 0,88. Korelacja jest silna i istotna statystycznie.

$$CN = 108,2 P^{-0,061} \quad (5)$$

gdzie CN, P – zmienne oznaczające odpowiednio wartości parametru CN [-] oraz sumy opadu całkowitego [mm].



Rys. 4. Zależność między parametrem CN a sumą opadu całkowitego

Fig. 4. The relationship between the CN parameter and the sum of the total rainfall

Na podstawie pomierzonych sum opadu całkowitego dla dwóch wybranych zdarzeń (tab. 2.) obliczono parametry CN za pomocą ustalonego równania (5). Obliczone parametry (CN obl. 1.) wykorzystano do wyznaczenia wysokości opadu efektywnego w kolejnych przedziałach czasowych trwania opadu, a następnie maksymalnych intensywności opadu efektywnego ($I_{\max,ef}$ obl. 2.). Na ich

podstawie za pomocą równania (4) obliczono czasy koncentracji (t_c obl. 2.), które zastosowano do symulacji przepływów w modelu SBUH (Q_{\max} sym. 2.). Symulowane wartości przepływów wynosiły 15,750 i 25,876 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Przeprowadzenie obliczeń według przedstawionej procedury, w której do wyznaczenia parametru CN i czasu koncentracji wykorzystano równania (4) i (5), pozwoliło uzyskać stosunkowo dobrą zgodność symulowanych i pomierzonych przepływów maksymalnych. Wartości błędu względnego symulacji przepływów dla dwóch przyjętych do tej analizy zdarzeń wynosiły -10,2 i 17,3%. Błędy względne, które uzyskano w poprzednich obliczeniach przy zastosowaniu parametru CN ustalonego na podstawie danych opad-odpływ, były do nich zbliżone i wynosiły odpowiednio 2,8 i 24,4% (tab. 1.).

Tabela 2. Błędy symulacji przepływów dla parametru CN i czasu koncentracji obliczonych za pomocą równań

Tab. 2. The errors of flows simulation for the CN and the time of concentration calculated using equations

Data wystąpienia zdarzenia	P [mm]	CN obl. 1. [-]	$I_{\max,ef}$ obl. 2. [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$]	t_c obl. 2. [h]	Q_{\max} sym. 2. [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Q_{\max} pom. [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Błąd względny [%]
	1	2	3	4	5	6	7
25.06.2009	29,6	88,0	12,65	1,004	15,750	17,548	-10,2
17.07.2009	34,0	87,2	16,58	1,206	25,876	22,066	17,3

CN obl. 1. – parametr obliczony za pomocą równania (5) (parameter calculated using the equation (5)), $I_{\max,ef}$ obl. 2. – maksymalna intensywność opadu efektywnego (maximum intensity of effective rainfall), t_c obl. 2. – czas koncentracji obliczony za pomocą równania (4) (time of concentration calculate using the eq. (4)), Q_{\max} pom., Q_{\max} sym. 2. – pomierzone i symulowane przepływy maksymalne (measured and simulated maximum flows)

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono procedurę obliczeniową hydrogramu przepływów w zlewni zurbanizowanej za pomocą modelu *Santa Barbara Unit Hydrograph* (SBUH). Weryfikację opracowanej procedury oraz modelu SBUH przeprowadzono w zlewni cząstkowej Potoku Służewieckiego w Warszawie o powierzchni 14,7 km^2 . Parametry modelu (czas koncentracji t_c i zależny od niego współczynnik retencji zbiornika K_r) wyznaczono metodą iteracyjną dla 25 pomierzonych w zlewni zdarzeń opad-odpływ. Na podstawie uzyskanych danych opracowano równanie, które wykorzystano do obliczenia czasu koncentracji dla analizowanych zdarzeń w relacji do maksymalnych intensywności opadu efektywnego. Obliczone za pomocą równania czasy koncentracji zastosowano do symulacji hydrogramów przepływów modelem SBUH w reakcji na pomierzone opady. Dane opad-odpływ wykorzystano do wyznaczenia wartości parametru CN w metodzie SCS obliczania opadu efektywnego. Ustalone wartości posłużyły

również do opracowania równania, które umożliwi obliczenie parametru CN na podstawie sumy opadu całkowitego. Za pomocą tego równania obliczono wartości parametru CN dla dwóch wybranych zdarzeń, które wykorzystano do symulacji hydrogramów przepływów.

Przedstawione analizy umożliwiają sformułowanie następujących wniosków:

1. Obliczone metodą iteracyjną wartości czasu koncentracji t_c i współczynnika retencji zbiornika K_r wynosiły odpowiednio od 0,154 do 1,749 h (średnio 0,783 h) oraz od 0,045 do 0,351 h (średnio 0,119 h). Obliczone za pomocą ustalonego równania (4) wartości czasu koncentracji wynosiły od 0,452 do 1,435 h przy wartości średniej 0,783 h. Średnie wartości czasu koncentracji obliczone metodą iteracyjną i za pomocą równania były takie same.
2. Wyznaczone na podstawie danych pomiarowych opad-odpływ wartości parametru CN w metodzie SCS obliczania opadu efektywnego zawierały się w przedziale od 85,3 do 97,6. Średnia wartość CN dla 25 analizowanych zdarzeń była wysoka i wynosiła 93,0.
3. Przepływy maksymalne, które uzyskano w wyniku symulacji modelem SBUH przy wykorzystaniu czasów koncentracji obliczonych za pomocą równania (4) i parametrów CN wyznaczonych na podstawie danych pomiarowych, wynosiły od 4,779 do 27,447 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Średnia wartość przepływu maksymalnego dla zdarzeń wynosiła 9,721 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i była zbliżona do średniej pomierzonych przepływów (9,522 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).
4. Najmniejsza i największa wartość błędu względnego ustalona na podstawie pomierzonych i symulowanych przepływów maksymalnych wynosiła odpowiednio $-0,4$ i $71,5\%$. Średni błąd obliczony przy uwzględnieniu wartości bezwzględnych błędów symulacji dla poszczególnych zdarzeń wynosił $17,2\%$. Ustalone błędy symulacji przepływów były mniejsze od 15 i 25% odpowiednio dla 12 i 21 zdarzeń.
5. Wartości błędu względnego symulacji przepływów maksymalnych dla dwóch wybranych zdarzeń, w której parametry CN i czasy koncentracji wyznaczono za pomocą ustalonych równań (4) i (5), wynosiły $-10,2$ i $17,3\%$. Błędy symulacji przepływów, które uzyskano dla tych zdarzeń przy wykorzystaniu parametru CN wyznaczonego na podstawie danych pomiarowych, były zbliżone do wartości błędów w tej symulacji i wynosiły odpowiednio $2,8$ i $24,4\%$.
6. Weryfikacja opracowanej procedury obliczeniowej i modelu SBUH w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego wykazała dobrą zgodność między pomierzonymi i symulowanymi przepływami maksymalnymi w reakcji na analizowane opady. Opracowane równania do wyznaczania parametru CN i czasu koncentracji wymagają weryfikacji w innych zlewniach, aby potwierdzić ich przydatność do obliczania hydrogramu przepływów w niekontrolowanych zlewniach zurbanizowanych za pomocą modelu *Santa Barbara Unit Hydrograph*.

Literatura

- [1] Barszcz M.: Ocena zagrożenia powodziowego i możliwości jego ograniczenia w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 68, 2010, s. 219-230.
- [2] Barszcz M.: Prognoza maksymalnych przepływów prawdopodobnych wywołanych ulewami w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, XVIII, nr 4 (46), 2009, s. 3-21.
- [3] Beven K.: Rainfall-runoff modeling. The Primer. John Wiley & Sons, England 2001.
- [4] Rossman L.A.: Storm water management model – User`s manual version 5.0. United States Environmental Protection Agency (EPA), Cincinnati, OH 2004.
- [5] Singh V.P.: Computer models of watersheds hydrology. Water Resources Publication, Colorado, USA 1995.
- [6] Soil Conservation Service Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release, no 55, 1986, pp. 2.5-2.8.
- [7] Stubchaer J.M.: The Santa Barbara Urban Hydrograph Method. Proc. of National Sympos. on Urban Hydrology and Sediment Control. Univeristy of Kentucky, Lexington, July 28-31, 1975, pp. 131-141.
- [8] Tsihrintzis V.A., Sidan C.B.: Modeling urban stormwater runoff processes using the Santa Barbara Method. Water Resources Management, no 12, 1998, pp. 139-166.
- [9] USDA-SCS, (U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service). National Engineering Handbook. Section 4, Washington, DC 1975.
- [10] Wanielista M.P.: Hydrology and water quantity control. John Wiley & Sons, New York 1990.
- [11] Wanielista M.P, Kersten R., Eaglin R.: Hydrology: Water quantity and quality control, 2nd ed. John Wiley & Sons, USA 1997.
- [12] WMO: Guide to hydrological practices. WMO, no 168, 5th. Geneva, Switzerland 1994.

ADAPTATION OF THE SANTA BARBARA UNIT HYDROGRAPH MODEL FOR THE CALCULATION OF A FLOW HYDROGRAPH IN URBANIZED CATCHMENT OF THE SŁUŻEWIECKI STREAM

Summary

The aim of the study was to present the calculation procedure of a flow hydrograph using the conceptual *Santa Barbara Unit Hydrograph* (SBUH) model and its verification in the Służewiecki Stream sub catchment ($A = 14.7 \text{ km}^2$) in Warsaw. The verification of this procedure and the SBUH model was based on an assessment of the compatibility of maximum flows, calculated using the model and measured in the "Rosofa" profile. The scope of the work included determining the parameters of the model (t_c , K_r) using the iterative method for 25 rainfall-runoff events. When determining the parameters of the model, there were no differences between the measured and simulated maximal flows. The obtained data were used to devise a formula which enabled the time of concentration (t_c) to be calculated in relation to the maximum intensity of effective rainfall. The

correlation between these characteristics is a strong linear relationship ($R = 0.73$). The times of concentration calculated using the formula were applied when simulating flow hydrographs by means of the SBUH model. The values of the smallest and the largest relative error (percentage), determined on the basis of measured and simulated flows for the analyzed events, amounted to 0.4 and 71.5%, respectively. The average error, calculated taking into account the absolute values of simulation errors for individual events (neglected minus signs for determined relative errors), amounted to 17.2%. When calculating the effective rainfall there was used the CN-SCS method. The CN parameters values of this method were established for analyzed events based on the rainfall-runoff data. The determined values were used to devise a formula which enabled the CN parameter to be calculated based on the sum of the total rainfall.

Keywords: urbanized catchment, rainfall-runoff process, SBUH model, effective rainfall, runoff curve number (CN), time of concentration, maximum flows

Przesłano do redakcji: 27.05.2014 r.

Przyjęto do druku: 02.12.2014 r.

DOI:10.7862/rb.2014.124