

Marcin SKOTNICKI<sup>1</sup>  
Marek SOWIŃSKI<sup>2</sup>

## WPŁYW WŁASNOŚCI MODELU OPAD-ODPŁYW NA RELACJĘ POMIĘDZY DOKŁADNOŚCIĄ ODWZOROWANIA ZLEWNI A CHARAKTERYSTYKAMI ODPŁYWU

W publikacji zaprezentowano wyniki analizy wpływu dokładności odwzorowania zlewni w modelu opad-odpływ na charakterystyki odpływu. Odwzorowanie zlewni odnosi się do sposobu podziału zlewni na zlewnie cząstkowe. Przy użyciu komputerowej wersji modelu opad-odpływ reprezentowanej przez programu SWMM 5.1 opracowano cztery warianty modelu przykładowej zlewni. Do jej odwzorowania w kolejnych wariantach wykorzystano malejącą liczbę zlewni cząstkowych o odpowiednio rosnących powierzchniach. Symulacje odpływu wykonano dla opadu blokowego oraz trzech deszczy historycznych. Dla każdego wariantu modelu analizowano zmiany: odpływu szczytowego, czasu jego osiągnięcia oraz współczynnika efektywności Nasha i Sutcliffe'a stanowiącego miarę dopasowania hydrogramu odpływu, wywołane przez zmiany szorstkości zlewni, szorstkości kanałów i kroku czasowego opadu. Stwierdzono, że spadek dokładności odwzorowania reprezentowany przez zwiększenie wielkości zlewni cząstkowych w modelu powoduje wzrost obliczonego odpływu szczytowego i skrócenie czasu jego osiągnięcia. Wielkość zlewni cząstkowych nie wpływa na liczbę pików hydrogramu odpływu. Wpływ zmian parametrów modelu opad-odpływ jest w niewielkim stopniu zależny od analizowanych wariantów odwzorowania zlewni w modelu. Zmiany tych parametrów mogą zostać wykorzystane do kompensacji wpływu zmniejszania dokładności odwzorowania zlewni.

**Słowa kluczowe:** zlewnia miejska, SWMM5, kalibracja modelu

### 1. Wprowadzenie

Opracowanie modelu symulacyjnego zlewni miejskiej wymaga odwzorowania powierzchni zlewni oraz sieci kanałów w odpowiednim programie kom-

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Marcin Skotnicki, Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Środowiska, ul. Berdychowo 4, 60-965 Poznań, tel. 61 665 24 69, e-mail: marcin.skotnicki@put.poznan.pl

<sup>2</sup> Marek Sowiński, Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Środowiska, ul. Berdychowo 4, 60-965 Poznań, tel. 61 665 24 69, e-mail: marek.sowinski@put.poznan.pl

puterowym. Sieć kanałów jest opisana przez odcinki ograniczone węzłami, które w modelu utożsamia się z istniejącymi studzienkami kanalizacyjnymi. W przypadku powierzchni zlewni należy wykonać dyskretyzację obszaru, rozumianą jako jego podział na zlewnie cząstkowe [6, 20]. Aby uniknąć negatywnego wpływu uproszczeń odwzorowania zlewni zaleca się przestrzeganie ograniczeń dotyczących maksymalnych powierzchni zlewni cząstkowych [22]. Dyskretyzacja zlewni stanowi odzwierciedlenie odwzorowanych w modelu kanałów, dlatego też zaleca się wprowadzanie do modelu kanałów o określonej średnicy minimalnej [7]. W praktyce często pojawia się problem dostępności i wiarygodności danych dotyczących kanałów bocznych o małych średnicach. W takiej sytuacji są one pomijane, co ogranicza sieć odwzorowaną w modelu do kanałów większych średnic. To z kolei prowadzi do uwzględniania dużych zlewni cząstkowych i w rezultacie może skutkować nadmiernym uproszczeniem struktury analizowanego systemu kanalizacyjnego. Dokładność odwzorowania ma istotny wpływ na wyniki symulacji [8]. Charakter wpływu jest zależny od własności zlewni oraz wykorzystywanego w obliczeniach modelu [4]. Zwiększanie stopnia uproszczenia z reguły wywołuje wzrost odpływu szczytowego i przyspiesza jego wystąpienie [21], choć opisywane są także tendencje przeciwne [2]. Wpływ uproszczeń jest istotny na etapie kalibracji modelu, polegającej na doborze parametrów modelu na bazie porównania wyników symulacji z pomiarami. Wartości dobranych parametrów mogą wynikać zarówno z własności analizowanego systemu kanalizacyjnego jak i przyjętych na etapie tworzenia modelu uproszczeń [17, 18]. Wpływ na dobór parametrów może mieć również długość kroku czasowego opadów użytych do kalibracji [12, 19].

W publikacji podjęto temat relacji między stopniem uproszczenia opisu zlewni a charakterystykami obliczonego hydrogramu odpływu. Analizowano także możliwość kompensacji wpływu mniejszej dokładności odwzorowania zlewni poprzez zmiany parametrów modelu opad-odpływ.

## **2. Zakres analizy**

### **2.1. Zlewnia i warianty jej odwzorowania w modelu**

Symulacje odpływu wykonano dla zlewni miejskiej o powierzchni 200 ha oraz średnim stopniu uszczelnienia 30%, łączącej elementy obiektu rzeczywistego i syntetycznego [10, 13, 16], określonej jako zlewnia hybrydowa. Trasy kanałów oraz podział analizowanej zlewni na zlewnie cząstkowe ustalono na podstawie planu fragmentu istniejącego miasta. Przekroje kanałów wyznaczono przy użyciu metody granicznych natężeń dla opadu o częstotliwości przewyższenia  $c = 2$  lata. Dla wszystkich odcinków kanałów przyjęto spadek dna wynoszący 5‰. Każdej zlewni cząstkowej przypisano jednakowe wartości parametrów, w celu ułatwienia tworzenia poszczególnych wariantów modelu zlewni, wykorzystywanych na potrzeby analizy wpływu dokładności odwzorowania

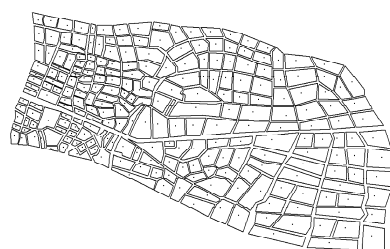
zlewni na postać hydrogramu odpływu. Jedynym parametrem o zmiennej wartości była szerokość hydrauliczna zlewni. Jej wielkość zwiększano w kolejnych wariantach w celu zachowania stałej długości drogi spływu z uszczelnionej części zlewni. Cztery warianty modelu zlewni, różniące się liczbą odwzorowywanych elementów (tab. 1, rys. 1), zrealizowano w programie SWMM5.1 [11].

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki wariantów modelu zlewni

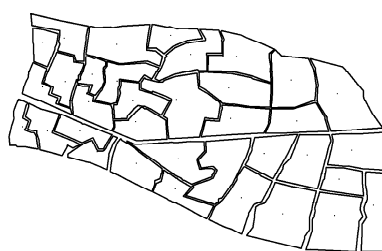
Table 1. Basic characteristics of catchment models structure for different variants

Wariant odwzorowania zlewni	Liczba zlewni cząstkowych	Średnia powierzchnia zlewni cząstkowej [ha]	Liczba odcinków kanałów	Całkowita długość sieci kanałów [km]
A	245	0,8	253	20,3
B	129	1,5	208	15,9
C	61	3,2	151	12,6
D	35	5,6	95	10,3

a) wariant A - zlewnie



b) wariant D - zlewnie



c) wariant A - kanały



d) wariant D - kanały



Rys. 1. Plan zlewni cząstkowych (a, b) oraz schemat sieci kanałów (c, d) w analizowanej zlewni dla wariantu dokładnego (wariant A) i najbardziej uproszczonego (wariant D)

Fig. 1. The layout of subcatchments (a, b) and the scheme of storm sewer network (c, d) of the analysed catchment for the exact (variant A) and the most simplified (variant D) variants

Wariant najdokładniejszy, oznaczony jako A, obejmuje 253 odcinki kanałów oraz 245 zlewni cząstkowych. Warianty uproszczone, oznaczone jako B, C i D otrzymano przez łączenie sąsiednich zlewni cząstkowych oraz pomijanie części odcinków kanałów, które znalazły się o obrębie scalonych zlewni. Podczas scalania zlewni uwzględniano układ kanałów przyjęty w wariantcie A, dlatego w kolejnych wariantach liczba zlewni cząstkowych nie maleje dokładnie o połowę (tab. 1).

## 2.2. Opady obliczeniowe

W analizie wykorzystano cztery opady. Deszcz oznaczony jako opad 1 jest syntetycznym deszczem blokowym o czasie trwania 15 min i wysokości 13,0 mm. Wysokość tę obliczono według formuły Bogdanowicz i Stachy [3] dla częstości przewyższenia  $c = 2$  lata. Odpływ wywołany opadem syntetycznym odpowiada warunkom, dla których dobierano przekroje kanałów analizowanej sieci (punkt 2.1). Napełnienie względne w przekroju kontrolnym (rys. 1) w czasie odpływu wywołanego deszczem blokowym wynosi 80%.

Tabela 2. Charakterystyka analizowanych deszczy historycznych

Table 2. Characteristics of historical rainfalls

Zdarzenie opadowe	Czas trwania [min]	Wysokość opadu [mm]	Położenie piku [min]	Natężenie maksymalne [mm/min]
opad 2	1320	29,2	20	0,80
opad 3	1010	22,0	510	0,20
opad 4	870	24,2	105	1,00

Pozostałe trzy opady to deszcze historyczne, zarejestrowane w latach 2007-2008 na terenie miasta Poznania (tab. 2). Opady generują odpływy szczytowe, przy których napełnienie względne w przekroju kontrolnym kolektora osiąga od 25% do 50%.

Deszczomierze korytkowe użyte do pomiarów opadu rejestrują czas między kolejnymi wychyleniami korytek. Istnieje więc możliwość odwzorowania opadu w programie SWMM5.1 z wykorzystaniem różnej długości kroku czasowego  $\Delta t$  (punkt 3.3). Przy przekształcaniu oryginalnych zapisów z deszczomierzy za czas rozpoczęcia deszczu uznano czas zarejestrowania pierwszego dla danego zdarzenia opadowego wychylenia korytka.

## 2.3. Miary zmian charakterystyk odpływu

W analizie uwzględniano hydrogramy odpływu obliczone dla przekroju kontrolnego zlokalizowanego w końcowym odcinku kolektora głównego



(rys. 1). Przyjęto trzy charakterystyki hydrogramu: odpływ szczytowy  $Q_{MAX}$  (pik hydrogramu), czas osiągnięcia odpływu szczytowego  $T$  oraz współczynnik efektywności Nasha i Sutcliffe'a  $NSE$ , stanowiący miarę dopasowania hydrogramu [9]. Zmiany postaci hydrogramu wyznaczano w odniesieniu do hydrogramu podstawowego, obliczanego dla bazowych wartości parametrów modelu opad-odpływ. Szczegółowy opis wielkości bazowych podano w odpowiednich punktach artykułu (3.1-3.4).

Zmiany charakterystyk hydrogramu opisanych powyżej wyznaczano z następujących zależności:

$$\Delta Q_{MAX} = \frac{Q_{MAX,j} - Q_{MAX,p}}{Q_{MAX,p}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (1)$$

$$\Delta T = T_j - T_p \text{ [min]} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n [q_{k,j} - q_{k,p}]^2}{\sum_{k=1}^n [q_{k,j} - \bar{q}_p]^2} \quad (3)$$

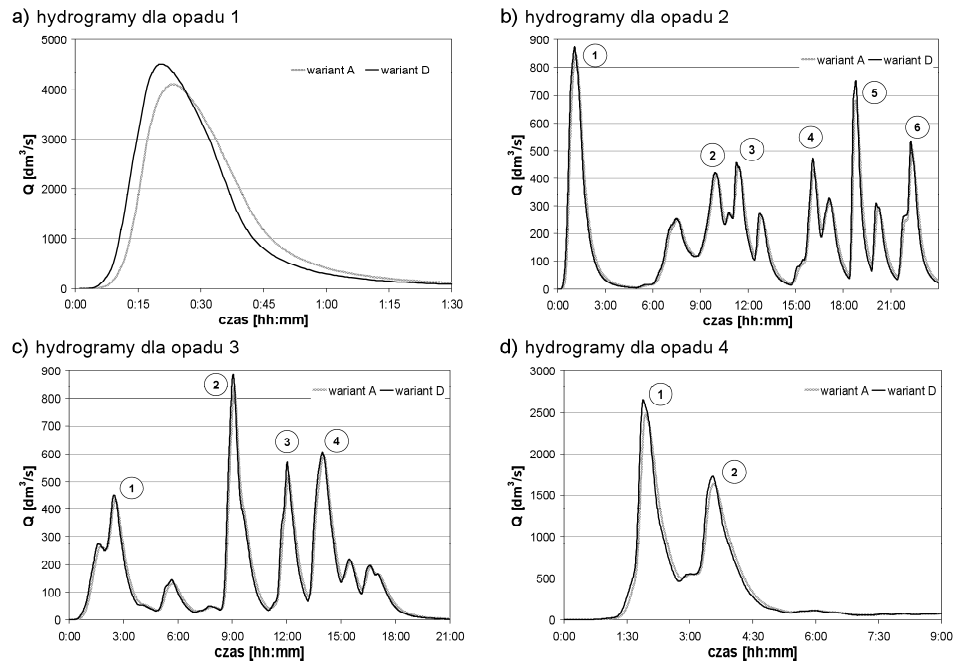
Indeksy we wzorach 1-3 oznaczają:

- $j$  – wartość obliczona dla aktualnego hydrogramu,
- $p$  – wartość obliczona dla hydrogramu podstawowego,
- $k$  – kolejny punkt tworzący hydrogram,
- $n$  – łączna liczba punktów tworzących hydrogram

### 3. Wyniki analizy

#### 3.1. Wpływ wielkości zlewni cząstkowych na charakterystyki odpływu

W pierwszym etapie analizy rozpatrywano wpływ uproszczenia odwzorowania zlewni na charakterystyki hydrogramu odpływu. Obliczenia wykonano dla jednego deszczu syntetycznego i trzech deszczów historycznych (punkt 2.3). Wyznaczono 16 hydrogramów odpływu, jeden dla każdego opadu i wariantu odwzorowania zlewni. W obliczeniach przyjęto bazowe wartości szorstkości zlewni  $n_Z$  oraz szorstkości kanałów  $n_K$  równe  $0,015 \text{ [s} \cdot \text{m}^{-1/3}]$  i krok czasowy opadu  $\Delta t$  wynoszący 1 min. Jako podstawowy przyjęto hydrogram obliczony dla najdokładniejszego wariantu odwzorowania zlewni (wariant A). Analizowano piki hydrogramu o wartości co najmniej 50% maksymalnego odpływu dla danego opadu.



Rys. 2. Hydrogramy odpływu dla wybranych wariantów odwzorowania zlewni i bazowych wartości parametrów modelu opad - odpływ

Fig. 2. Outflow hydrographs for analysed variants of catchment representation and basic rainfall-runoff model parameters

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem stopnia uproszczenia odwzorowania zlewni rośnie odpływ szczytowy  $Q_{MAX}$  a czas jego osiągnięcia  $T$  ulega skróceniu (rys. 2, tab. 3). Wyniki te są zgodne z prezentowanymi w literaturze [21].

Zmiana odpływu szczytowego nie ma związku z wielkością pików ani jego położeniem w hydrogramie. Największe przyrosty odpływu szczytowego, zanotowane dla najbardziej uproszczonego wariantu odwzorowania zlewni (wariant D) nieznacznie przekraczają 10% (tab. 3). Wartości odpływów szczytowych  $Q_{MAX}$  wzrastają wraz ze wzrostem uproszczenia zlewni lecz zmiany te nie są takie same dla wszystkich pików w danym hydrogramie, podobnie jak zmiany czasów  $T$ . Jedynie dla ostatniego pików w hydrogramie obliczonym dla opadu 2 (wariant C) zanotowano nieznaczny spadek wartości  $Q_{MAX}$  (tab. 3). Nie znaleziono wyjaśnienia przyczyny tego odstępstwa od relacji zaobserwowanej dla pozostałych pików i hydrogramów.

Czas  $T$  ulega skróceniu dla wszystkich analizowanych w danym hydrogramie pików, choć zmiana ta nie jest jednakowa. Niektóre odpływy szczytowe obliczone dla wariantów B oraz C nie ulegają przesunięciu. Piki pojawiają się od 3 minut (wariant B) do 7 minut (wariant D) wcześniej niż w odpowiednich hydrogramach obliczonych dla wariantu A (tab. 3).

Tabela 3. Zmiany odpływu szczytowego  $Q_{MAX}$  i czasu jego osiągnięcia  $T$  dla rozpatrywanych wariantów odwzorowania zlewniTable 3. Changes of peak flow  $Q_{MAX}$  and time to peak  $T$  for considered variants of catchment representation

Zdarzenie opadowe	Oznaczenie pików w hydrogramie	$\Delta Q_{MAX}$ [%]			$T$ [min]		
		Wariant odwzorowania zlewni			Wariant odwzorowania zlewni		
		B	C	D	B	C	D
opad 1	-	1,26	2,79	9,80	0	0	-2
opad 2	1	0,89	2,10	3,05	-1	-2	-4
	2	0,66	1,75	2,83	-3	-3	-6
	3	0,71	0,45	3,19	-1	0	-7
	4	0,70	2,88	9,65	-1	-2	-5
	5	2,74	5,59	10,53	0	-1	-2
	6	0,76	-0,32	5,92	0	0	-5
opad 3	1	0,42	1,46	3,94	0	-1	-3
	2	1,57	3,77	6,03	-1	-2	-4
	3	1,19	3,57	9,06	-1	-3	-5
	4	0,56	0,80	2,19	-1	-4	-5
opad 4	1	1,20	2,69	6,95	0	-1	-4
	2	1,01	2,67	5,67	-1	-1	-1

Wzrost wartości odpływu szczytowego  $Q_{MAX}$  i skrócenie czasu  $T$  związane ze zwiększeniem powierzchni zlewni cząstkowych jest w głównej mierze wynikiem zmiany udziału czasu przepływu kanałami w procesie transformacji hydrogramu odpływu [5, 15]. Wraz ze wzrostem powierzchni zlewni zmniejsza się liczba odcinków, maleje więc długość drogi przepływu w kanałach. Skróceniu ulega zatem czas dopływu do przekroju kontrolnego, a hydrogram odpływu ulega mniejszemu „spłaszczeniu”.

Liczba pików w hydrogramie odpływu jest niezależna od wariantu odwzorowania zlewni (rys. 2). Oznacza to, że uproszczenie struktury modelu w analizowanym zakresie nie zmniejsza w istotny sposób jego zdolności do transformacji deszczu w hydrogram odpływu dla danego zdarzenia opadowego. Obliczenia wykonane przy wykorzystaniu modelu uproszczonego zawierają te same istotne informacje dotyczące hydrogramu odpływu jak w przypadku modelu dokładnego.

Wartości współczynnika NSE maleją wraz ze wzrostem stopnia uproszczenia odwzorowania zlewni. Dla wariantu B zmiana jest nieznaczna, wynosi niezależnie od opadu 0,998 (tab. 4). Wraz ze zmniejszającą się liczbą zlewni częściowych użytych w modelu do odwzorowania całej zlewni współczynnik NSE przyjmuje wartości od 0,936 do 0,972 (w zależności od opadu) w wariancie najbardziej uproszczonym D.

Tabela 4. Zmiany wartości współczynnika NSE w zależności od dokładności odwzorowania zlewni (bazowe wartości parametrów modelu opad-odpływ)

Table 4. Changes of NSE coefficient for analysed variants of catchment representation (basic rainfall-runoff model parameters)

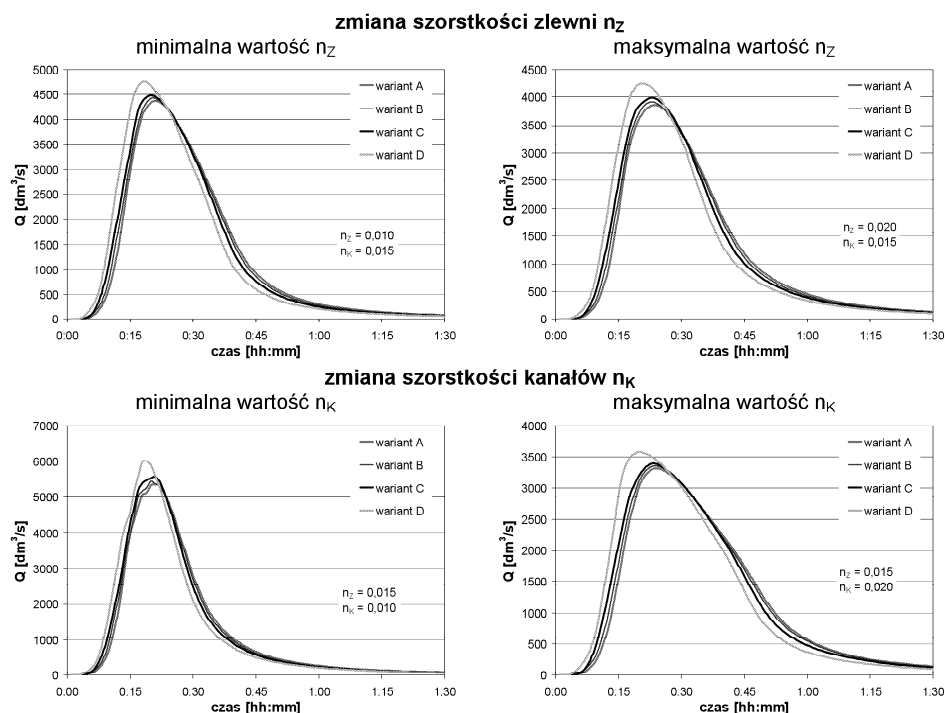
Zdarzenie opadowe	Wariant odwzorowania zlewni		
	B	C	D
opad 1	0,998	0,987	0,936
opad 2	0,998	0,988	0,942
opad 3	0,998	0,992	0,963
opad 4	0,999	0,994	0,972

### 3.2. Wpływ parametrów modelu na relację między dokładnością odwzorowania zlewni a charakterystykami odpływu

Ocenie poddano wpływ zmian parametrów modelu opad-odpływ na relację między stopniem uproszczenia odwzorowania zlewni a charakterystykami odpływu. W analizie uwzględniono szorstkość zlewni  $n_z$  jako parametr reprezentujący fazę spływu powierzchniowego oraz szorstkość kanałów  $n_k$ , opisującą fazę przepływu w kanałach. Przyjęto zmienność parametrów  $n_z$  oraz  $n_k$  w przedziale od 0,010 do 0,020 [ $s \cdot m^{-1/3}$ ] z krokiem 0,001 [ $s \cdot m^{-1/3}$ ]. Obliczenia zrealizowano dla kroku czasowego opadu  $\Delta t = 1$  min. Dla każdego wariantu dokładności odwzorowania zlewni przyjęto oddzielny hydrogram podstawowy, obliczony dla wartości parametrów  $n_z$  oraz  $n_k$  równych 0,015 [ $s \cdot m^{-1/3}$ ]. Analizę wykonano przy wykorzystaniu hydrogramów odpływu generowanych przez deszcz syntetyczny (opad 1). Hydrogramy te charakteryzują się jednym pikiem, co zapewnia jednoznaczność wyników i ułatwia ich interpretację. Rozpatrywano łącznie 84 hydrogramy odpływu.

Wraz ze wzrostem szorstkości zlewni  $n_z$  oraz kanałów  $n_k$  odpływ szczytowy  $Q_{MAX}$  maleje (rys. 3 i 4a, b). Zmiany szorstkości zlewni  $n_z$  wywołują zmiany odpływu szczytowego w zakresie od -6,0% do 6,5% dla wariantu A oraz od -5,7% do 5,6% dla wariantu D. Oznacza to, że wraz ze wzrostem stopnia uproszczenia zlewni reakcja modelu, wyrażona za pomocą hydrogramów, na zmiany szorstkości zlewni  $n_z$  ulega osłabieniu. W przypadku szorstkości ka-

nałów odpływ szczytowy zmienia się w przedziale od -19,1% do 30,6% dla wariantu A oraz od -20,4% do 33,3% dla wariantu D. Spadek dokładności odwzorowania zlewni skutkuje niewielkim zwiększeniem wpływu zmian szorstkości kanałów.



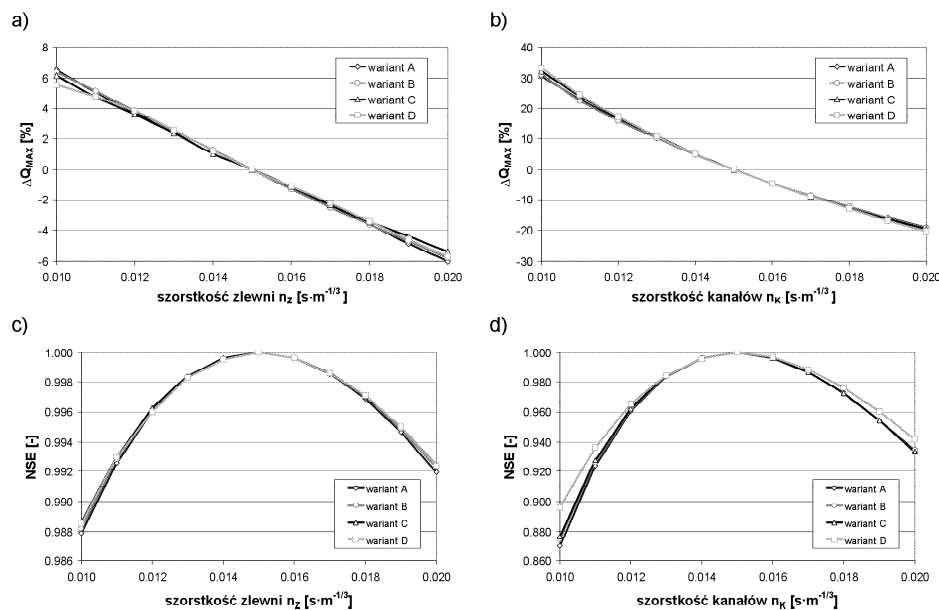
Rys. 3. Przykładowe hydrogramy odpływu dla rozpatrywanych wariantów odwzorowania zlewni i ekstremalnych wartości szorstkości zlewni  $n_Z$  oraz szorstkości kanałów  $n_K$  (opad syntetyczny)

Fig. 3. Exemplary outflow hydrographs for analysed variants of catchment representation and extreme values of surface roughness  $n_Z$  and channel roughness  $n_K$

Zwiększenie wartości obu szorstkości skutkuje opóźnieniem czasu wystąpienia odpływu szczytowego  $T$ . Zmiany te są niewielkie i mieszczą się w przedziale od -2 do 2 min dla wszystkich analizowanych wartości parametrów i wariantów odwzorowania zlewni.

Zmiany wartości współczynnika NSE (rys. 4c) w funkcji zmian szorstkości zlewni  $n_Z$  są praktycznie niezależne od wariantu odwzorowania zlewni w modelu. Dla szorstkości kanałów i wariantów A, B oraz C wpływ uproszczenia odwzorowania zlewni jest również nieznaczący. Dla wariantu najmniej dokładnego (wariant D) współczynnik NSE osiąga największe wartości (rys. 4d). Sugeruje to, że zmiany wartości  $n_K$  skutkują mniejszymi zmianami postaci hydrogramu, choć analiza charakterystyki  $Q_{MAX}$  wskazuje na relację przeciwną (rys. 4b).

Możliwą przyczyną jest zmniejszenie liczby elementów opisujących model w wariancie D. Do sieci kanałów doprowadzone są większe odpływy (z większych zlewni cząstkowych) niż w modelach dokładnych, stąd większa reakcja odpływu szczytowego na zmiany szorstkości kanałów. Z uwagi na krótszą drogę przepływu w kanałach wynikającą z mniejszej liczby odcinków, postać hydrogramu mierzona wartością NSE ulega mniejszej transformacji.



Rys. 4. Zmiany odpływu szczytowego  $Q_{MAX}$  oraz współczynnika NSE dla deszczu syntetycznego (blokowego) przy różnym stopniu uproszczenia odwzorowania zlewni w zależności od zmian szorstkości zlewni  $n_z$  (a, c) oraz szorstkości kanałów  $n_K$  (b, d)

Fig. 4. Changes of peak flow  $Q_{MAX}$  and NSE coefficient for a synthetic (block) rainfall by different variant of catchment representation in dependence on changes of surface roughness  $n_z$  (a, c) and channel roughness  $n_K$  (b, d)

### 3.3. Wpływ kroku czasowego deszczu na relację między dokładnością odwzorowania zlewni a charakterystykami odpływu

W analizie badano relację między wpływem uproszczenia odwzorowania zlewni a zmianami parametru opadu. Jako parametr opadu przyjęto krok czasowy  $\Delta t$  odwzorowania opadu w programie SWMM5.1. Jego podstawową (bazową) wartością jest 1 min. W analizie rozpatrywano wpływ zwiększania wartości  $\Delta t$  na postać hydrogramu odpływu. Uwzględniano wartości kroku czasowego odpowiednio 3, 5 i 10 min, co w przybliżeniu odpowiada podwojeniu  $\Delta t$  w każ-

dym kolejnym etapie obliczeń. Przyjęto bazowe wartości parametrów  $n_Z$  oraz  $n_K$  równe  $0,015 \text{ [s} \cdot \text{m}^{-1/3}]$ .

Tabela 5. Zmiany odpływu szczytowego  $Q_{MAX}$  i czasu jego osiągnięcia  $T$  uśrednione dla poszczególnych wariantów odwzorowania zlewni w funkcji kroku czasowego opadu (deszcze historyczne)

Table 5. Changes of peak flow  $Q_{MAX}$  and time to peak averaged for each analysed variant of catchment representation in dependence on rainfall time step (historical rainfalls)

Zdarzenie opadowe	Oznaczenie piknu w hydrogramie	$\Delta Q_{MAX} [\%]$			$T [\text{min}]$		
		Krok czasowy $\Delta t$ [min]			Krok czasowy $\Delta t$ [min]		
		3	5	10	3	5	10
opad 2	1	0,21	-1,87	-1,34	1	3	8
	2	1,30	1,98	1,51	-1	5	8
	3	-0,73	-1,11	1,08	2	3	7
	4	-0,26	1,04	-2,88	1	1	6
	5	-1,14	-1,21	-0,78	2	3	6
	6	-1,33	-0,22	-3,60	2	2	7
opad 3	1	0,00	2,33	6,53	2	3	4
	2	-1,18	-1,57	-2,85	2	4	6
	3	0,46	-0,34	-4,99	2	3	8
	4	-0,02	-2,16	-2,76	1	0	3
opad 4	1	-0,45	-0,31	4,08	2	4	6
	2	-0,48	-1,11	-3,58	2	4	6

Hydrogramy podstawowe dobrano oddzielnie dla każdego wariantu odwzorowania zlewni, jak w poprzednim etapie analizy (punkt 3.2). W obliczeniach wykorzystano 48 hydrogramów odpływu generowanych przez trzy deszcze historyczne (punkt 2.3). Pominęto opad syntetyczny, gdyż z uwagi na jego krótki czas trwania (15 min) należy oczekiwać znikomego wpływu zmian kroku czasowego  $\Delta t$  na wyniki symulacji.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zmiana postaci hydrogramu odpływu wywołana zmianami kroku czasowego  $\Delta t$  jest praktycznie niezależna od dokładności odwzorowania zlewni. Dla zwiększenia czytelności wyników zmiany odpływu szczytowego oraz czasu jego osiągnięcia przedstawiono jako uśrednione dla wszystkich wariantów modelu (tab. 5). Wydłużenie kroku czasowego  $\Delta t$  powoduje zmiany odpływu szczytowego  $Q_{MAX}$  w zakresie kilku

procent. Zmiany nie są związane z wysokością piku ani jego położeniem w hydrogramie. Wraz ze wzrostem długości kroku czasowego  $\Delta t$  rośnie opóźnienie czasu osiągnięcia odpływu szczytowego dla niemal wszystkich pików hydrogramu (tab. 5). Wzrost czasu  $T$  jest od 1 min do 2 min mniejszy niż wartość liczbowa kroku czasowego  $\Delta t$ . Zakres wpływu kroku czasowego  $\Delta t$  na charakterystyki hydrogramu odpływu jest porównywalny z wpływem dokładności odwzorowania zlewni (punkt 3.1) ale inne są tendencje zmian.

Wartości współczynnika NSE (tab. 6) są zbliżone do obliczonych dla hydrogramów wyznaczonych dla różnych wariantów dokładności odwzorowania zlewni, co świadczy o podobnym wpływie obu czynników na wyniki symulacji.

Tabela 6. Zmiany współczynnika NSE dla poszczególnych wariantów odwzorowania zlewni i kroku czasowego opadu (deszcze historyczne)

Table 6. Changes of NSE coefficient for analysed variants of catchment representation and rainfall time step (historical rainfalls)

Zdarzenie opadowe	Wariant odwzorowania zlewni	Krok czasowy opadu $\Delta t$ [min]		
		3	5	10
opad 2	A	0,997	0,991	0,935
	B	0,996	0,991	0,934
	C	0,996	0,991	0,933
	D	0,995	0,977	0,924
opad 3	A	0,995	0,986	0,956
	B	0,995	0,985	0,956
	C	0,995	0,985	0,954
	D	0,994	0,984	0,951
opad 4	A	0,990	0,977	0,923
	B	0,989	0,977	0,921
	C	0,989	0,976	0,917
	D	0,987	0,972	0,904

### 3.4. Kompensacja wpływu dokładności odwzorowania zlewni

Prezentowane wyniki analizy wskazują, że zmiana parametrów modelu opad-odpływ wywiera na hydrogram odpływu wpływ zbliżony do wpływu dokładności odwzorowania zlewni. Analizowano zatem możliwość redukcji wpływu uproszczenia odwzorowania zlewni za pomocą zmian szorstkości zlewni  $n_z$ , szorstkości kanałów  $n_k$  oraz kroku czasowego opadu  $\Delta t$ . Przyjęto bazowe wartości parametrów  $n_z$  i  $n_k$  równe  $0,015 \text{ [s} \cdot \text{m}^{-1/3}]$  oraz bazowy krok czasowy



$\Delta t = 1$  min. Jako podstawowy wykorzystano hydrogram obliczony dla wariantu A charakteryzującego się najdokładniejszym odwzorowaniem zlewni. Do oceny dopasowania hydrogramów użyto współczynnika efektywności NSE. Wartości parametrów zapewniających najlepsze dopasowanie hydrogramów dobrano metodą prób i błędów (tab. 7).

Wykorzystanie szorstkości zlewni do kompensacji wpływu uproszczenia odwzorowania zlewni wymaga znacznej zmiany wartości parametru  $n_z$  w stosunku do wartości bazowej. Zwiększenie szorstkości zlewni  $n_z$  wywołuje obniżenie odpływu szczytowego oraz niweluje różnicę czasu wystąpienia  $Q_{MAX}$  obliczonych dla wariantu A oraz D. Do zmiany charakterystyk hydrogramu zapewniającej kompensację wpływu uproszczenia odwzorowania zlewni wystarczy mniejsza zmiana wartości szorstkości kanałów  $n_K$  niż w przypadku szorstkości zlewni  $n_K$ . Wpływ obu parametrów jest zbliżony, dopasowanie hydrogramu dla wariantów A oraz D wiąże się z redukcją  $Q_{MAX}$  oraz wydłużeniem czasu T.

Tabela 7. Wartości parametrów modelu opad-odpływ zapewniających najlepsze dopasowanie hydrogramów odpływu obliczonych dla wariantu D oraz A

Table 7. Parameters of rainfall-runoff model assuring the best adjustment of outflow hydrographs evaluated for variant D and A

Zdarzenie opadowe	Rodzaj dopasowania parametrów modelu						
	Brak (parametry bazowe)	Zmiana $n_z$		Zmiana $n_K$		Zmiana $\Delta t$	
		$n_z$	NSE	$n_K$	NSE	$\Delta t$	NSE
	NSE [-]	$[s \cdot m^{-1/3}]$	[-]	$[s \cdot m^{-1/3}]$	[-]	[min]	[-]
opad 2	0,942	0,026	0,991	0,021	0,993	10	0,989
opad 3	0,963	0,026	0,993	0,021	0,997	10	0,994
opad 4	0,972	0,028	0,997	0,020	0,996	5	0,997

Należy zwrócić uwagę, że zmiana szorstkości kanałów wiąże się ze zmianą relacji między przepływem a napełnieniem w kanale (zależność nie była analizowana w ramach publikacji) [14], co ogranicza możliwości wykorzystania parametru  $n_K$  dla potrzeb zwiększenia dopasowania hydrogramów. Parametrem użytym do kompensacji wpływu dokładności odwzorowania zlewni powinna być szorstkość zlewni lub parametry o takim samym wpływie na wyniki obliczeń odpływu – szerokość hydrauliczna lub nachylenie zlewni [20, 22]. Zwiększenie dopasowania hydrogramów odpływu obliczonych dla wariantów odwzorowania zlewni w wariantach A oraz D przy wykorzystaniu zmian kroku czasowego opadu jest rezultatem przede wszystkim opóźnienia wystąpienia odpływu szczytowego. Wartości  $Q_{MAX}$  w efekcie wydłużania kroku  $\Delta t$  zmieniają się w niewielkim stopniu, stąd wartości współczynnika efektywności dla opadów

2 i 3 są nieco niższe niż dla zmian szorstkości. W przypadku opadu 4 wartości NSE są porównywalne, bowiem opad jest krótki i hydrogram charakteryzuje się tylko dwoma pikami. Wykorzystanie kroku czasowego opadu do kompensacji wpływu uproszczenia zlewni wydaje się uzasadnione z uwagi na brak ingerencji w wartości parametrów  $n_z$  oraz  $n_k$ . Można przyjąć, że zmniejszenie dokładności odwzorowania zlewni powinno wiązać się z odpowiednim zmniejszeniem precyzji odwzorowania opadu polegającym na wydłużeniu kroku czasowego  $\Delta t$ . Przedstawione wyniki mogą zostać wykorzystane podczas kalibracji modeli zlewni miejskich [16].

#### 4. Wnioski

Na podstawie wykonanej analizy sformułowano następujące wnioski:

- a) Zmniejszenie dokładności odwzorowania zlewni (wzrost uproszczenia) wywołuje zwiększenie odpływu szczytowego i skrócenie czasu jego osiągnięcia.
- b) Wpływ dokładności odwzorowania zlewni jest niezależny od wysokości piku oraz położenia piku w hydrogramie odpływu.
- c) Wzrost szorstkości zlewni oraz szorstkości kanałów obniża odpływ szczytowy i wydłuża czas jego osiągnięcia.
- d) Zwiększenie kroku czasowego odwzorowania opadu opóźnia wystąpienie odpływu szczytowego.
- e) Wpływ parametrów modelu opad-odpływ (wnioski c i d) jest w niewielkim stopniu zależny od wariantu odwzorowania zlewni w modelu.
- f) Wpływ zmian wymienionych parametrów modelu może w ograniczonym zakresie kompensować zmiany charakterystyk hydrogramu wywołane zmniejszeniem dokładności odwzorowania zlewni.

#### Literatura

- [1] Aronica G., Freni G., Oliveri E.: Uncertainty analysis of the influence of rainfall time resolution in the modeling of urban drainage system, *Hydrological Processes*, 19, 2005, pp. 1055-1071.
- [2] Aronica G., Cannarozzo M.: Studying the hydrological response of urban catchments using a semi-distributed linear non-linear model, *Journal of Hydrology*, 238, 2000, pp. 35-43.
- [3] Bogdanowicz E., Stachý J.: Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe. Materiały badawcze, seria: Oceanologia i Hydrologia, IMGW, Warszawa 1998.
- [4] Cantone J P., Schmidt A. R.: Potential Dangers of Simplifying Combined Sewer Hydrologic/Hydraulic Models, *Journal of Hydrologic Engineering* 14(6), 2009, pp. 596-605.
- [5] Ghosh I., Hellweger F.: Effects of Spatial Resolution in Urban Hydrologic Simulations, *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(1), 2012, pp. 129-137.

- [6] James W.: Rules for responsible modeling, CHI, Guelph, Ontario 2003.
- [7] Krebs G., Kokkonen T., Valtanen M, Setälä H., Koivusalo H.: Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, 512, 2014, pp. 482–497.
- [8] Mazion E. Jr., Yen B.: Computational Discretization Effect on Rainfall-Runoff Simulation, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(5), 1994, pp. 715–734.
- [9] Nash J. E., Sutcliffe J. V.: River flow forecasting through conceptual models. Part I – a discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10/1970, pp. 282-290.
- [10] Pawlak A.: Analiza wpływu wybranych parametrów modelu opad-odpływ na wyniki symulacji spływu wód deszczowych, praca magisterska, Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Środowiska, 2015.
- [11] Rossman L. A.: Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1, 09.2015, [www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm](http://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm).
- [12] Schilling W.: Rainfall data for urban hydrology: what do we need?, *Atmospheric Research*, vol. 27, n. 1-3, 1991, pp. 5-22.
- [13] Sienicki B.: Wpływ dokładności odwzorowania sieci kanalizacji deszczowej na wyniki symulacji odpływu, praca magisterska, Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Środowiska, 2013.
- [14] Skotnicki M.: Modelowanie odpływu ze zlewni miejskich z uwzględnieniem czasowo-przestrzennej zmienności opadów, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Środowiska, 2009.
- [15] Skotnicki M., Sowiński M.: Wpływ wybranych charakterystyk zlewni zurbanizowanej na odpływ szczytowy wód opadowych, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 07, 2013, s. 275-280.
- [16] Skotnicki M., Sowiński M.: Dokładność odwzorowania struktury systemu kanalizacji deszczowej na potrzeby modelowania odpływu ze zlewni miejskiej, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 11, 2015, s. 393-397.
- [17] Stephenson, D.: Selection of Stormwater Model Parameters, *Journal of Environmental Engineering*, 115(1), 1989, pp. 210-220.
- [18] Sun N., Hall M., Hong B., Zhang L.: Impact of SWMM Catchment Discretization: Case Study in Syracuse, New York, *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(1), 2014, pp. 223-234.
- [19] Vaes G., Willems P., Berlamont J.: Rainfall input requirements for hydrological calculation, *Urban Water*, 3, 2001, pp. 107-112.
- [20] Zaghoul N. A.: SWMM Model and Level of Discretization, *Journal of the Hydraulics Division*, 107 (11), 1981, pp. 1535-1545.
- [21] Zaghoul N. A.: Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation, *Advances in Water Resources*, 6(4), 1983, pp. 214–223.
- [22] Zawilski M.: Integracja zlewni zurbanizowanej w symulacji spływu ścieków opadowych, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 06, 2010, s. 28-32.

## THE INFLUENCE OF RAINFALL-RUNOFF MODEL PROPERTIES ON THE RELATION AMONG CATCHMENT REPRESENTATION AND OUTFLOW CHARACTERISTICS

### Summary

The paper contains results of analysis examining the influence of a catchment representation precision in a rainfall-runoff model on characteristics of outflow. The catchment representation is referred to the way of the whole catchment area partition into smaller subcatchments. Using the computer version of rainfall-runoff model represented by the package SWMM5 four variants of exemplary catchment model have been evaluated. Rainfalls have been simulated by a synthetic block rain and three historical rains measured in Poznań during last 10 years. For each variant of catchment model the changes of outflow characteristics i.e. a peak of total outflow from sewer network, a time to this peak from the beginning of a rainfall and a value of Nash and Sutcliffe coefficient as the adjustment measure of outflow hydrographs have been analyzed. They have been generated for modified rainfall-runoff model parameters: catchment and storm sewer roughness and rainfall time step. It has been found that decrease of the catchment representation precision represented by the subcatchment size increase in a model results in the computed peak outflow increase and the decrease of time to peak flow. A size of subcatchment has no influence on a number of outflow hydrographs peaks. An influence of rainfall-runoff parameters changes on outflow characteristics is dependant in small degree on analyzed catchment variants in a model. However changes of these parameters can be used for an influence compensation of precision decrease of catchment representation.

**Keywords:** urban catchment, SWMM5, model calibration

DOI:10.7862/rb.2016.175

*Przesłano do redakcji: 01.05.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 28.06.2016 r.*