

Monika Nowakowska, Bartosz Kaźmierczak, Andrzej Kotowski, Katarzyna Wartalska

Identyfikacja, kalibracja i walidacja hydrodynamicznego modelu systemu odwadniającego tereny miejskie na przykładzie Wrocławia

Modelowanie systemów kanalizacyjnych, zalecane w normie PN-EN 752 z 2008 r. [1], a także wymagane zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z 2014 r. [2] (w zakresie weryfikacji częstości działania przelewów burzowych), jest w Polsce rzadko stosowane, głównie z uwagi na brak odpowiednich baz danych wyjściowych (monitoring opadów i przepływów w sieci) oraz wciąż niedostatecznych podstaw metodycznych. Celowe jest zatem doskonalenie zasad modelowania matematycznego systemów odwodnień terenów z wykorzystaniem lokalnych baz danych z monitoringu.

Znaczna część systemów kanalizacji deszczowej wybudowanych w Polsce została zwymiarowana uproszczonymi metodami – z wykorzystaniem wzoru Błaszczyka na natężenie jednostkowe deszczów (opartego na opadach z przełomu XIX i XX wieku), co powoduje, że mogą one nie spełniać – zwłaszcza w przyszłości – wymagań normy [1] w zakresie dopuszczalnych częstości występowania zjawiska wylewania się ścieków z kanałów na powierzchnię terenu, uwzględniając prognozowany wzrost natężenia opadów atmosferycznych. Wynika stąd konieczność weryfikacji przepustowości hydraulicznej tak zwymiarowanych systemów z wykorzystaniem modelowania hydrodynamicznego i podjęcie odpowiednich działań zaradczych [3, 4].

Dane literaturowe dotyczące podstaw modelowania systemów odwodnień terenów wskazują na kilka problemów, których rozwiązanie wymaga uściślenia metod prowadzenia badań symulacyjnych w programach typu SWMM (storm water management model). Na przykład poziom integracji powierzchni cząstkowych zlewni przyjmuje się – jak dotychczas – intuicyjnie, w związku z czym pomija się najczęściej kanały o średnicy mniejszej niż 0,5 m. Jest kilka wzorów do wyznaczania szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowej, zatem powstaje pytanie – który wzór jest właściwy w danych warunkach zagospodarowania terenu? Ponadto w literaturze brakuje sformalizowanych zasad ustalania wartości parametrów modeli hydrodynamicznych, a także zasad oceny ich jakości [5, 6].

Celem niniejszej pracy było uściślenie metod modelowania systemów odwodnień terenów w programie SWMM na przykładzie badań skanalizowanej zlewni deszczowej Wrocławia. Na tej podstawie zaproponowano zasady identyfikacji parametrów hydrologicznych i hydraulicznych

modeli hydrodynamicznych w toku ich kalibracji i walidacji, przy uwzględnieniu opadów kryterialnych do wymiarowania i sprawdzania przeciążeń kanalizacji (według norm PN-EN 752:2008 i DWA-A118:2006). Do oceny jakości modeli zaproponowano kryteria oparte na miarach statystycznych, w celu porównywania wyników symulacji wartości strumienia (Q) i objętości (V) wód deszczowych z wynikami pomiarów.

Idea uproszczonego odwzorowania systemu odwadniania terenów w modelu SWMM

Do przeprowadzania obliczeń symulacyjnych w programie SWMM konieczny jest dostęp do baz danych, niezbędnych do zbudowania modelu hydrodynamicznego skanalizowanej zlewni, które powinny obejmować:

- charakterystykę powierzchni zlewni i gruntu (rodzaj zagospodarowania, spadki i stopnie uszczelnienia terenu, profile glebowe itp.),
- parametry sieci kanalizacyjnej (długości, przekroje i spadki dna kanałów, objekty itp.),
- pomiary wysokości opadów atmosferycznych w zlewni i strumieni objętości ścieków w kanałach.

W programie SWMM spływ wód deszczowych z powierzchni zlewni do węzła obliczeniowego sieci kanalizacyjnej obliczany jest z zastosowaniem modelu zbiornika liniowego, z układu równań:

$$\begin{cases} Q = W \frac{(h - h_p)^{5/3}}{n_p} i_p^{1/2} \\ \frac{dV}{dt} = F \frac{dh}{dt} = F I_e - Q \end{cases} \quad (1)$$

w których:

Q – strumień objętości wód deszczowych spływających ze zlewni, m^3/s

W – hydrauliczna szerokość zlewni/podzlewni, m

h – wysokość opadu atmosferycznego, m

h_p – wysokość retencji na powierzchniach uszczelnionych i nieuszczelnionych, m

n_p – współczynnik szorstkości powierzchni uszczelnionych i nieuszczelnionych, $s/m^{1/3}$

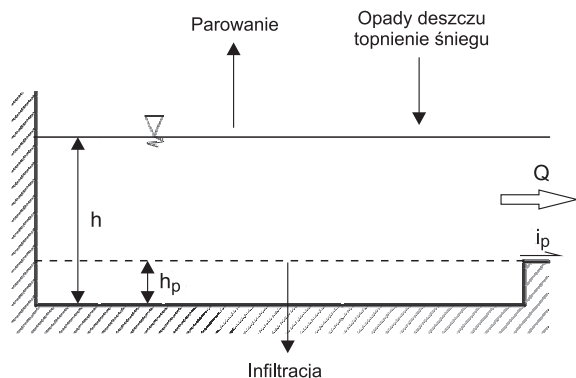
i_p – spadek uszczelnionych i nieuszczelnionych powierzchni zlewni

$V(t)$ – objętość wód deszczowych w czasie t , m^3

F – powierzchnia zlewni/podzlewni, m^2

I_e – efektywna (z uwzględnieniem strat) intensywność opadu atmosferycznego, m/s

Dr inż. M. Nowakowska, dr inż. B. Kaźmierczak, prof. dr hab. inż. A. Kotowski, mgr inż. K. Wartalska: Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Wodociągów i Kanalizacji, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
 monika.nowakowska@pwr.edu.pl, bartosz.kazmierczak@pwr.edu.pl, andrzej.kotowski@pwr.edu.pl, katarzyna.wartalska@pwr.edu.pl



Rys. 1. Schemat obliczania odpływu wód deszczowych ze zlewni w programie SWMM

Fig. 1. Stormwater runoff calculation diagram for catchment area using SWMM

Napełnienie zbiornika (rys. 1) odpowiada objętości wody, która znalazła się na terenie zlewni, pomniejszonej o straty na parowanie, infiltrację i wypełnienie nierówności terenu (retencja). Do opisu infiltracji w profilu glebowym stosowany jest najczęściej model Hortona:

$$I_{in}(t) = I_{in,k} + (I_{in,o} - I_{in,k})e^{-rt} \quad (2)$$

w którym:

$I_{in}(t)$ – prędkość infiltracji w czasie t , mm/h

$I_{in,o}$ – początkowa prędkość infiltracji, mm/h

$I_{in,k}$ – końcowa prędkość infiltracji, mm/h

r – stała recesji gruntu, 1/h

Parametry modeli hydrodynamicznych (1) i (2) podzielić można na empiryczne, fizyczne i *quasi*-fizyczne [6–8]. Parametry empiryczne typu hydrologicznego, takie jak wysokość retencji na uszczelnionych (h_{pu}) i nieuszczelnionych (h_{pnu}) powierzchniach zlewni czy ilość wody infiltrującej do gruntu, opisują straty opadów atmosferycznych w zlewni i służą do obliczeń tzw. opadu efektywnego, trafiającego do kanalizacji. Parametry empiryczne typu hydraulicznego, takie jak współczynniki szorstkości (do wzoru Manninga) powierzchni uszczelnionych (n_{pu}) i nieuszczelnionych (n_{pnu}) czy szorstkość ścian kanałów (n), opisują opory ruchu wody na powierzchni zlewni i wewnątrz kanałów, czyli charakteryzują procesy opóźnienia/retencji odpływu wód deszczowych. Wartości liczbowe tego typu parametrów

można zweryfikować jedynie w procesach kalibracji i walidacji modelu danej zlewni deszczowej wraz z systemem kanalizacyjnym, na podstawie symulacji z wykorzystaniem danych z monitoringu opadów atmosferycznych i przepływów ścieków deszczowych w kanałach (tab. 1).

Parametry fizyczne modeli, takie jak długość, średnica i spadek dna kanałów (a także ich zagłębienie i graf połączeń w węzłach) służą do ścisłego opisu zjawiska przepływu ścieków deszczowych w kanałach, natomiast parametry *quasi*-fizyczne, takie jak wielkość, rodzaj i spadek powierzchni (i_p) czy szerokość hydrauliczna (W) danej zlewni cząstkowej, służą do uproszczonego odwzorowania spływu wód deszczowych po powierzchni zlewni. Parametry fizyczne i *quasi*-fizyczne ustalane są zwykle wstępnie w procesie identyfikacji zlewni i kanałów, na podstawie zebranych danych inwentaryzacyjnych, z wykorzystaniem map sytuacyjno-wysokościowych uzbrojenia i zagospodarowania terenu, zdjęć lotniczych (ortofotomapy), modeli numerycznych terenu i innych.

Do oceny jakości modeli stosowane są różne miary statystyczne (wskaźniki) służące do porównywania wyników pomiarów i symulacji odpływu wód deszczowych (Q), jak na przykład [10, 20–22]:

– specjalny współczynnik korelacji (RS):

$$RS = \frac{\sum_{i=1}^n (2Q_{p,i} Q_{s,i} - Q_{s,i}^2)}{\sum_{i=1}^n Q_{p,i}^2} \quad (3)$$

– względny błąd resztowy (WBR):

$$WBR = \frac{\sqrt{n \left(\sum_{i=1}^n (Q_{p,i} - Q_{s,i})^2 \right)}}{\sum Q_{p,i}} \quad (4)$$

– błąd względny strumieni maksymalnych (tzw. pików) (ΔQ_{maks}):

$$\Delta Q_{maks} = \frac{Q_{maks,p} - Q_{maks,s}}{Q_{maks,p}} \quad (5)$$

Tabela 1. Wartości parametrów modeli hydrodynamicznych różnych systemów kanalizacyjnych w programie SWMM
Table 1. Hydrodynamic model parameters of multiple sewerage systems using SWMM

Parametr (symbol), jednostka	Źródło danych				
	[3, 4, 9–15]	[16, 17]	[18]	[19]	[20]
Powierzchnia zlewni (F), ha	–	360	62	69	670
Szerokość hydrauliczna zlewni cząstkowej (W), m	–	$1,5F^{1/2}$	$1,1F^{1/2}$	$F^{1/2}$	$F^{1/2}$
Współczynnik szorstkości – kanały deszczowe (n), $s/m^{1/3}$	$0,013 \pm 0,020$	0,015	0,015	0,013	0,018
Współczynnik szorstkości – powierzchnie uszczelnione (n_{pu}), $s/m^{1/3}$	$0,011 \pm 0,050$	0,013	0,015	0,015	0,015
Współczynnik szorstkości – powierzchnie nieuszczelnione (n_{pnu}), $s/m^{1/3}$	$0,1 \pm 0,8$	0,1	0,15	$0,2 \pm 0,4$	0,2
Wysokość retencji – powierzchnie uszczelnione (h_{pu}), mm	$1,3 \pm 2,5$	1,5	1,5	1,5	1,5
Wysokość retencji – powierzchnie nieuszczelnione (h_{pnu}), mm	$2,5 \pm 7,5$	5	6	6 ± 7	–
Początkowa prędkość infiltracji wg modelu Hortona ($I_{in,o}$), mm/h	8 ± 254	90	90	75	–
Końcowa prędkość infiltracji wg modelu Hortona ($I_{in,k}$), mm/h	$0,2 \pm 20$	5	15	15	–
Stała recesji gruntu wg modelu Hortona (r), 1/h	2 ± 7	4	3	–	–
Czas wysychania gruntu wg modelu Hortona (T_s), d	2 ± 14	7	3	–	–

We wzorach (3)–(5) indeksy p oraz s oznaczają odpowiednio pomiar i symulację, zaś n oznacza liczbę danych – uśrednionych wartości strumieni objętości ścieków deszczowych w przedziałach od 1 min (deszcze krótkotrwałe) do 5 min (deszcze długotrwałe). W zależności od wartości tych wskaźników, model można zakwalifikować do określonej kategorii (tab. 2).

Tabela 2. Kategorie klasyfikacji jakości modeli [20–22]
Table 2. Categories of model quality classification [20–22]

Wskaźnik		Ocena punktowa	Kategoria modelu
RS	WBR, %		
1,00±0,99	0÷3	5,5	znakomity
0,99±0,95	3÷6	5,0	bardzo dobry
0,95±0,90	6÷10	4,0	dobry
0,90±0,85	10÷25	3,0	przeciętny
<0,85	>25	2,0	niezodowalający

RS – specjalny współczynnik korelacji (3)
WBR – względny błąd resztowy (4)

Materiały i metody badawcze

Wrocław, miasto o powierzchni administracyjnej około 293 km², ma mieszany system kanalizacji. W 2010 r. MPWiK SA we Wrocławiu przejęło od Gminy Wrocław zadania związane z zarządzaniem i eksploatacją około 400 km krytej kanalizacji deszczowej. Sieć ta odprowadza ścieki deszczowe i roztopowe przez 120 wylotów kanalizacyjnych do 9 odbiorników (zlewnie rzek i potoków). Przy wyborze pilotowej zlewni deszczowej do badań terenowych kierowano się następującymi kryteriami:

- zlewnia powinna mieć powierzchnię minimum 1 km² i dobrze odzwierciedlać zabudowę Wrocławia,
- zlewnia powinna być położona w pobliżu deszczomierzy sieci MPWiK SA we Wrocławiu, a system kanalizacyjny powinien być łatwy do opomiarowania (mało wylotów do odbiorników),
- średnice kolektorów deszczowych powinny być większe od 1,0 m, a czas przepływu ścieków deszczowych powinien wynosić powyżej 30 min (co praktycznie oznacza długość kolektora powyżej 2 km).

Kryteria te spełniła skanalizowana zlewnia deszczowa osiedli Gaj i Tarnogaj o powierzchni $F=273$ ha (tab. 3), którą następnie zredukowano do powierzchni czynnej $F_{cz}=104$ ha – grawitującej do kolektora deszczowego KD1, po wyłączeniu terenów obejmujących ogródki działkowe, parki i zagłębienia powierzchni, z których wody deszczowe spływają do rowów melioracyjnych (wzdłuż torowisk PKP).

Tabela 3. Parametry zlewni i kanalizacji deszczowej KD1
Table 3. Parameters of catchment area and KD1 stormwater drainage system

Parametr zlewni	Wartość
Powierzchnia czynna zlewni (do P1)	1,04 km ²
Długość kolektora KD1 (do P1)	2712 m
Średnica kanałów deszczowych	0,3÷1,4 m
Czas przepływu ścieków w kolektorze KD1	45 min
Łączna długość kanałów deszczowych	17731 m

P1 – przepływomierz nr 1, KD1 – kolektor deszczowy nr 1

Zgodnie z zaleceniami zawartymi w takich pracach, jak [3, 9, 14, 23–25], poziom integracji zlewni ograniczono do podzlewni o możliwie małych powierzchniach, z uwzględnieniem kanałów o średnicach $d_{min} \geq 0,3$ m, jako typowych w przypadku kanałów zbiorczych z przyłączy rynnowych budynków i wpustów ulicznych.

W pierwszym etapie prac identyfikacyjnych wydzielono 75 podzlewni, co dało średnią powierzchnię $F_{i,śr}=1,39$ ha, przy $F_{i,min}=0,22$ ha i $F_{i,max}=5,34$ ha. Następnie ustalono wielkości poszczególnych powierzchni cząstkowych w podzlewniach. Wyróżniono powierzchnie uszczelnione bez retencji (dachy), powierzchnie uszczelnione z retencją (jezdnie asfaltowe, z kostki betonowej lub bruku) oraz powierzchnie nieuszczelnione z retencją (tereny zielone). Spadek powierzchni w danej podzlewni (i_p – do wzoru (1)) interpretowano jako zastępczy – średni ważony (ulice, place, chodniki, stropodachy oraz teren na kierunku spływu powierzchniowego). Poszczególne podzlewnie przyporządkowano do węzłów sieci, do których odprowadzane są wody deszczowe (rys. 2).

Analiza danych literaturowych [3, 4, 8, 20, 23, 24] odnośnie wzorów na szerokość hydrauliczną podzlewni (W), pozwoliła na wyselekcjonowanie kilku ich najczęściej stosowanych postaci, które zostały rozszerzone o własne propozycje – na potrzeby budowy modelu pilotowej zlewni deszczowej we Wrocławiu:

$$W_1 = (2 - S_K)L_K \quad (6)$$

$$W_2 = (F_i)^{1/2} \quad (7)$$

$$W_3 = 1,5L_K \quad (8)$$

$$W_4 = \{1,4; 1,5; 1,6\}(F_i)^{1/2} \quad (9)$$

$$W_5 = \{1,6; 1,8; 2,0\}(F_{u,i})^{1/2} \quad (10)$$

$$W_6 = (F_{u,i})/\{50; 75; 100\} \quad (11)$$

w których:

S_K – współczynnik skośności

L_K – długość kanału, m

F_i – całkowita powierzchnia podzlewni, m²

$F_{u,i}$ – uszczelniona powierzchnia podzlewni, m²

W przypadku podzlewni symetrycznych względem położenia kanału ($S_K=0$), wzór (6) przyjmuje postać $W_1=2L_K$. Nowe zapisy wzorów w postaci (8) i (10) ustalono na podstawie testów wstępnych. We wzorze (11) zastosowano dyskretnie zmienianą długość drogi spływu z powierzchni uszczelnionych – $L_{obj}=50$ m, 75 m i 100 m, jako wielokrotność odległości między wpustami ulicznymi [20].

Do opomiarowania strumienia ścieków deszczowych w kolektorze KD1 zastosowano dwa przepływomierze ultradźwiękowe. Pierwszy, typu Nivus PCM4 (oznaczony jako P1 na rys. 2), został zamontowany przy studziencie nr 18, w pobliżu wylotu kolektora do rzeki Brochówki, na odcinku KD1 o średnicy 1,4 m. Drugi przepływomierz, typu Teledyne ISCO 2100 (P2), zamontowano przy studziencie nr 239, na odcinku kolektora KD1 o średnicy 1,2 m.

Do rejestru opadów atmosferycznych w badanej zlewni służył deszczomierz wagowy typu TRwS 203 (sieć MPWiK SA we Wrocławiu, oznaczony jako R05 na rys. 2), zlokalizowany na południowej granicy badanej zlewni – w odległości około 620 m od jej środka ciężkości. Rejestr opadów atmosferycznych prowadzony był według przyjętych kryteriów, dotyczących czasu trwania deszczu ($t > 40$ min), jego wysokości ($h > 9$ mm) i ciągłości (przerwy do 4 h),



Rys. 2. Graf obliczeniowy skanalizowanej zlewni deszczowej w programie SWMM
 Fig. 2. Calculation graph of stormwater catchment with its drainage using SWMM

z uwzględnieniem różnych typów deszczów (K – konwekcyjne, F – frontalne, N – niżowe). Do kalibracji i walidacji modelu zasadniczo nie nadają się opady atmosferyczne niemające ciągłego rejestru strumienia objętości ścieków deszczowych w przekrojach dwóch przepływomierzy (P1 i P2) lub w przypadku których wystąpiły tak zwane błędy grube rejestru (H, v, Q). Parametry wybranych do kalibracji i walidacji deszczów uszczegółowiono do epizodów o czasie trwania równym (tab. 4):

– czasowi przepływu ścieków deszczowych w kolektorze KD1 na długości 2712 m (od początku do przekroju przepływomierza P1), tj. $t=45$ min – odpowiednio h_{45} , C_{45} , q_{45} oraz I_{45} ,

– czasowi przepływu ścieków deszczowych w kolektorze KD1 na długości 1013 m (od początku do przekroju przepływomierza P2), tj. $t=15$ min – odpowiednio h_{15} , C_{15} , q_{15} oraz I_{15} .

Do opisu intensywności deszczów zastosowano kryteria Chomicza [3, 22, 26] – deszcze zwykle $I < 5$ mm/h ($< 0,08$ mm/min), silne $5 < I < 10$ mm/h ($0,08 < 0,16$ mm/min), ulewy $10 < I < 45$ mm/h ($0,16 < 0,75$ mm/min) oraz deszcze nawalne $45 < I < 120$ mm/h ($0,75 < 2,0$ mm/min).

Z dwóch lat pomiarów (29-07-2013–19-07-2015) do kalibracji modelu wytypowano pięć długotrwałych opadów (1 frontalny i 4 niżowe) o czasach trwania od 7,4 h do 24,5 h i częstości występowania we Wrocławiu od 0,38 do 0,75 roku (tab. 4). Do walidacji modelu przewidziano natomiast trzy deszcze intensywne (konwekcyjne – K) o czasach trwania od 42 min do 106 min oraz częstości występowania od 0,52 do 5,1 roku (epizody 15-minutowe o częstości 0,61, 2,4 oraz 18,4 roku).

Kalibracja modelu

Wartości parametrów hydrologicznych i hydraulicznych modelu (1)–(2) ustala się zwykle w iteracyjnym procesie kalibracji, przy czym kalibracja modelu może być przeprowadzona według różnych założeń – można stosować jednakowe wartości parametrów w całej zlewni lub różne w poszczególnych podzlewniach cząstkowych. Na przykład parametry infiltracji do modelu Hortona (2) są z dostateczną dokładnością identyfikowane i uśredniane na podstawie opisów rodzaju gruntu w zlewni [3, 4, 8, 13]. Mieści się to zwykle w klasie dokładności opisu zjawiska opad-odpływ. Tak zwana kalibracja ekspercka polega więc na ustaleniu wartości głównych parametrów empirycznych modelu, mających zwykle decydujący wpływ na opis badanych zjawisk, w sposób jak najbardziej zbliżony do rzeczywistości (Q, V).

Kalibracja modelu hydrodynamicznego badanego systemu kanalizacyjnego w oprogramowaniu SWMM polegała na ustaleniu wartości parametrów hydraulicznych – współczynników szorstkości różnych rodzajów powierzchni terenu (n_{pu} , n_{pnu}) i wnętrza kanałów (n) oraz wartości parametrów hydrologicznych – wysokości retencji terenowej na powierzchniach uszczelnionych i nieuszczelnionych (h_{pu} , h_{pnu}), wraz z weryfikacją metod określania szerokości hydraulicznej (W) podzlewni. Najważniejsze przy tym było osiągnięcie zgodności symulowanych i zmierzonych objętości spływających wód deszczowych (V) oraz dodatkowo wartości współczynnika spływu powierzchniowego (ψ). W tabeli 5 zestawiono wartości parametrów empirycznych skalibrowanego modelu.

Tabela 4. Parametry deszczów wybranych do kalibracji (5) oraz do walidacji (3) modelu
Table 4. Parameters of precipitation selected for model calibration (5) and validation (3)

Data (typ deszczu)	Czas przed deszczem	Godzina od-do	Parametr, jednostka											
			t, min	Σh , mm	C, a	q , $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$	Σh_{45} , mm	C_{45} , a	q_{45} , $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$	I_{45} , mm/h	Σh_{15} , mm	C_{15} , a	q_{15} , $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$	I_{15} , mm/h
deszcze użyte do kalibracji – od deszczów zwykłych do ulew ($I_{15}=4,1+12,0$ mm/h)														
17 V 2014 (F)	14 h	9:45–17:09	444	15,1	0,55	5,7	5,6	0,36	20,6	7,41	3,0	0,27	33,2	12,0
23/24 VII 2014 (N)	13 d 16 h	23:34–15:09	935	13,1	0,41	2,3	3,4	0,19	12,5	4,51	1,7	0,13	18,9	6,8
1/2 IX 2014 (N)	13,8 h	15:27–13:47	1340	13,4	0,40	1,7	1,7	<0,1	6,4	2,29	1,0	<0,1	11,3	4,1
11 IX 2014 (N)	2 d 10 h	8:01–22:54	894	11,7	0,38	2,2	2,4	0,12	8,9	3,19	1,6	0,11	17,2	6,2
22/23 X 2014 (N)	19,8 h	1:00–1:28	1468	28,4	0,75	3,2	2,2	0,11	8,3	2,97	1,5	0,11	16,4	5,9
deszcze użyte do walidacji – od ulew do deszczów nawalnych ($I_{15}=24,5+88,4$ mm/h)														
29 VII 2013 (K)	14 d 17 h	20:26–22:12	106	15,7	0,85	24,68	14,6	1,1	54,0	19,44	13,4	2,4	149,0	53,6
17 X 2014 (K)	1 d 6 h	18:37–20:12	95	9,7	0,52	17,0	8,6	0,59	31,9	11,48	6,1	0,61	68,0	24,5
19 VII 2015 (K)	1 d 7 h	19:57–20:39	42	23,8	5,10	94,53	23,8	4,7	88,2	31,76	22,1	18,4	245,6	88,4

K – konwekcyjny, F – frontalny, N – niżowy

Tabela 5. Wartości parametrów skalibrowanego modelu badanego systemu kanalizacyjnego
Table 5. Parameter values of the calibrated model of tested drainage system

Parametr, jednostka	W, m	n , $\text{s}/\text{m}^{1/3}$	n_{pu} , $\text{s}/\text{m}^{1/3}$	n_{pnu} , $\text{s}/\text{m}^{1/3}$	h_{pu} , mm	h_{pnu} , mm	$l_{in,o}$, mm/h	$l_{in,k}$, mm/h	r, 1/h	T_s , d
Wartość	$1,6F^{1/2}$	0,02	0,02	0,30	2,0	5,0	90	10	4	7

O optymalnych wartościach skalibrowanych parametrów empirycznych modelu świadczyły osiągnięte wartości wskaźników RS i WBR – przyjęte jako kryteria statystyczne. W tabeli 6 przedstawiono wyniki dokładności modelu z zastosowaniem różnych wzorów na szerokość hydrauliczną podzlewni w przypadku pięciu opadów kalibracyjnych (Q, V – w przekrojach przepływomierzy P1 i P2).

Do jakościowej oceny skalibrowanego modelu, w zakresie szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowych (W_1 – W_6), zastosowano analizę skupień metodą Warda. Na rysunku 3 przedstawiono wynik hierarchicznej analizy skupień wartości parametru W, przy kryterium wartości wskaźnika statystycznego RS. Na podstawie wyników tej

analizy, spośród postaci wzorów na szerokość hydrauliczną podzlewni, wyróżniono dwie podstawowe grupy:

– pierwsza grupa objęła sześć wzorów: $W_4(1,4)$, $W_4(1,5)$, $W_4(1,6)$ oraz $W_5(1,8)$, $W_5(2,0)$ i $W_6(50)$,

– druga grupa objęła także sześć wzorów: W_1 , W_2 , W_3 i $W_5(1,6)$ oraz $W_6(75)$ i $W_6(100)$.

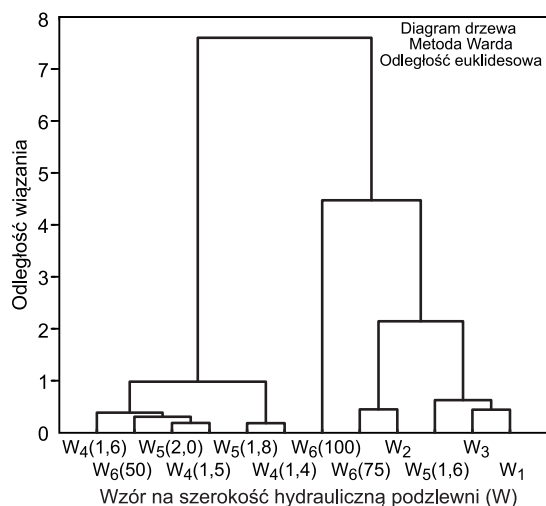
W pierwszej grupie wzorów wydzielono dodatkowo dwie podgrupy, obejmujące:

– cztery wzory silnie powiązane, najdokładniej opisujące wartości W (do praktycznego stosowania) – $W_4(1,6)$, $W_4(1,5)$ i $W_5(2)$ oraz $W_6(50)$,

– dwa wzory luźniej powiązane, względnie dokładnie odzwierciedlające obliczone wartości – $W_4(1,4)$ i $W_5(1,8)$.

Tabela 6. Wyniki obliczeń kalibracyjnych modelu ze względu na szerokość hydrauliczną zlewni cząstkowych (W)
Table 6. Calibration calculation results for the model in terms of hydraulic width of partial catchments (W)

Wzór	Wskaźnik	Data wystąpienia opadu atmosferycznego (typ deszczu), przekrój przepływomierza									
		17 V 2014 (F)		23/24 VII 2014 (N)		1/2 IX 2014 (N)		11 IX 2014 (N)		22/23 X 2014 (N)	
		P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
$W_1=(2-S_k)L_k$	RS	0,980	0,940	0,979	0,971	0,969	0,975	0,961	0,948	0,980	0,976
	WBR, %	3,7	6,7	5,6	7,1	5,9	5,6	6,6	9,0	4,3	5,2
	ΔQ_{maks} , %	13,9	18,1	0,9	-8,7	8,4	-3,3	16,7	10,1	16,5	12,3
$W_2=F^{1/2}$	RS	0,977	0,930	0,977	0,970	0,967	0,973	0,958	0,938	0,980	0,976
	WBR, %	4,0	7,3	5,9	7,2	6,0	5,9	6,8	9,8	4,7	5,2
	ΔQ_{maks} , %	14,9	20,8	0,9	-6,4	9,8	0,9	18,2	13,7	16,5	12,3
$W_3=1,5L_k$	RS	0,980	0,939	0,979	0,971	0,968	0,975	0,961	0,947	0,980	0,976
	WBR, %	3,7	6,8	5,6	7,1	5,9	5,6	6,6	9,1	4,7	5,3
	ΔQ_{maks} , %	13,9	18,0	0,9	-8,6	8,4	-2,9	16,6	10,3	16,5	12,4
$W_4(1,4)=1,4F^{1/2}$	RS	0,984	0,946	0,982	0,971	0,971	0,976	0,967	0,952	0,981	0,977
	WBR, %	3,3	6,4	5,2	7,2	5,7	5,5	6,1	8,7	4,5	5,1
	ΔQ_{maks} , %	12,0	15,6	-0,2	-9,9	7,3	-5,2	15,1	8,1	16,2	12,0
$W_4(1,5)=1,5F^{1/2}$	RS	0,985	0,949	0,983	0,970	0,971	0,976	0,968	0,954	0,982	0,978
	WBR, %	3,2	6,2	5,1	7,2	5,6	5,4	6,0	8,5	4,5	5,0
	ΔQ_{maks} , %	11,5	14,5	-0,4	-10,6	6,9	-6,3	14,5	7,1	16,1	11,8
$W_4(1,6)=1,6F^{1/2}$	RS	0,986	0,951	0,983	0,970	0,972	0,977	0,969	0,956	0,982	0,979
	WBR, %	3,1	6,1	5,0	7,3	5,6	5,4	5,9	8,3	4,4	5,0
	ΔQ_{maks} , %	11,0	13,6	-0,6	-11,2	6,5	-7,4	14,0	6,3	16,0	11,7
$W_5(1,6)=1,6F_u^{1/2}$	RS	0,983	0,940	0,980	0,971	0,969	0,975	0,964	0,947	0,981	0,976
	WBR, %	3,5	6,7	5,4	7,1	5,8	5,6	6,3	9,1	4,6	5,3
	ΔQ_{maks} , %	12,7	17,4	-0,3	-8,6	8,6	-3,0	16,9	10,0	16,5	12,3
$W_5(1,8)=1,8F_u^{1/2}$	RS	0,985	0,945	0,982	0,971	0,970	0,976	0,967	0,952	0,982	0,977
	WBR, %	3,3	6,4	5,2	7,2	5,7	5,5	6,1	8,7	4,5	5,1
	ΔQ_{maks} , %	11,7	15,5	-0,7	-9,8	7,9	-5,0	15,9	8,2	16,3	12,0
$W_5(2,0)=2F_u^{1/2}$	RS	0,986	0,949	0,983	0,970	0,971	0,977	0,968	0,955	0,982	0,978
	WBR, %	3,1	6,2	5,1	7,2	5,6	5,4	5,9	8,4	4,4	5,0
	ΔQ_{maks} , %	11,0	13,9	-1,0	-10,9	7,2	-6,8	15,1	6,7	16,1	11,8
$W_6(50)=F_u/50$	RS	0,986	0,948	0,982	0,970	0,971	0,976	0,967	0,955	0,982	0,978
	WBR, %	3,2	6,3	5,2	7,3	5,7	5,4	6,0	8,4	4,4	5,1
	ΔQ_{maks} , %	10,9	14,1	-1,8	-11,0	8,3	-7,1	16,6	6,4	16,3	11,7
$W_6(75)=F_u/75$	RS	0,979	0,929	0,977	0,970	0,967	0,973	0,960	0,938	0,980	0,974
	WBR, %	3,8	7,3	5,8	7,3	6,0	5,9	6,7	9,8	4,7	5,5
	ΔQ_{maks} , %	14,3	20,4	-0,4	-6,8	11,0	0,2	19,9	12,9	16,9	12,7
$W_6(100)=F_u/100$	RS	0,970	0,911	0,971	0,966	0,964	0,968	0,952	0,921	0,977	0,970
	WBR, %	4,5	8,2	6,5	7,7	6,3	6,3	7,3	11,0	5,0	5,9
	ΔQ_{maks} , %	17,0	24,9	1,1	-4,7	12,9	4,8	22,2	18,6	17,6	13,8

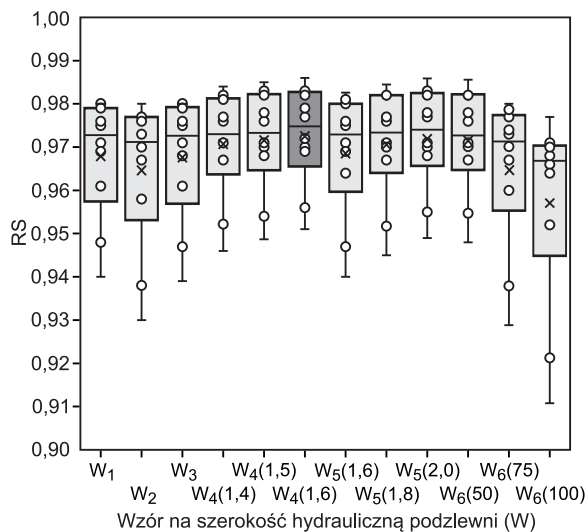


Rys. 3. Hierarchiczna analiza skupień wartości parametru W według wskaźnika statystycznego RS

Fig. 3. Hierarchical cluster analysis of W parameter value according to RS statistical index

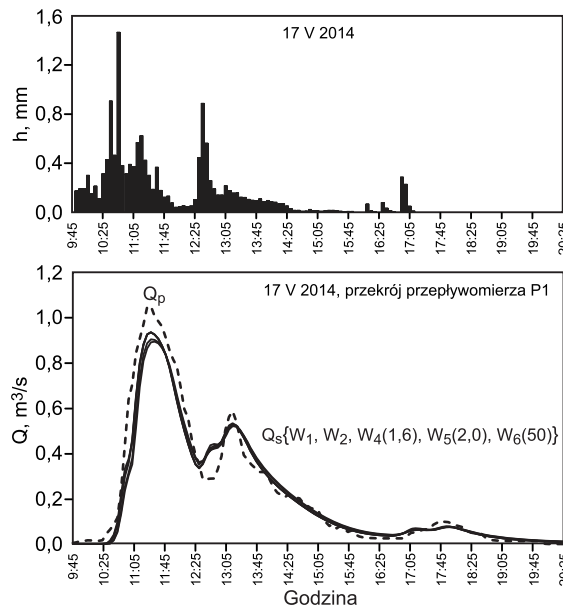
Druga grupa, obejmująca sześć pozostałych wzorów na szerokość hydrauliczną podzlewni, charakteryzowała się małą siłą powiązań, dlatego nie wydzielono w niej podgrup – wyniki obliczeń wartości W były najmniej dokładne. W tej grupie znalazł się między innymi wzór na W₁, wymagający pracochłonnych danych i obliczeń, co było przedmiotem kolejnej analizy. Do oceny ilościowej modelu, przy parametrach ustalonych w procesie kalibracji, zastosowano tak zwane wykresy pudełkowe. Długość pudełka jest równa rozstępowi kwartylnemu, czyli różnicy między pierwszym i trzecim kwartylem. Na rysunku 4 zilustrowano charakterystykę dokładności skalibrowanego modelu w przypadku 12 wzorów na szerokość hydrauliczną podzlewni, z zastosowaniem kryterium wartości wskaźnika RS.

Najlepszy rezultat dokładności modelu zapewnił wzór W₄(1,6) (seria 6). Położenie pudełek i wąsów było w tym wypadku stosunkowo najbliższe wartości 1,0, a rozstęp ćwiartkowy wyników był najmniejszy. Na podstawie wartości wskaźników RS i WBR odnoszących się do wzoru W₄(1,6) (tab. 6), sklasyfikowano model na granicy oceny dobrej i bardzo dobrej (tab. 2).



Rys. 4. Dokładność modelu w przypadku parametru W i danych kalibracyjnych przy kryterium wartości wskaźnika RS
Fig. 4. Model accuracy for W parameter and calibration data according to the criterion of RS index value

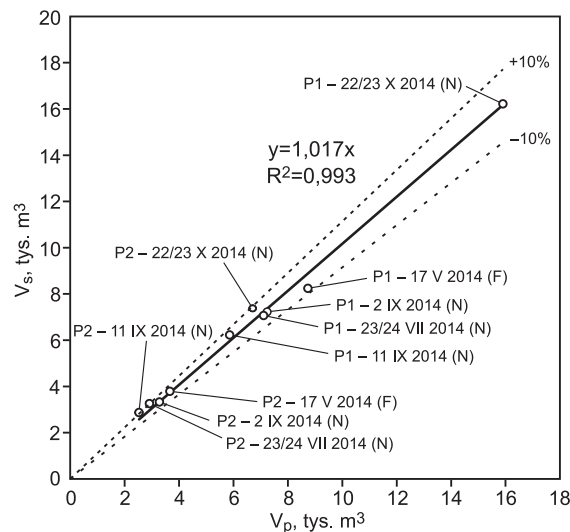
Na rysunku 5 przedstawiono histogram deszczu oraz zmierzone (Q_p) i symulowane (Q_s) w skalibrowanym modelu hydrogramy strumieni objętości ścieków deszczowych, według wzorów W₁, W₂, W₄(1,6), W₅(2,0) i W₆(50), w przekroju P1 kolektora KD1 (deszcz frontalny z 17-05-2014).



Rys. 5. Histogram oraz symulowane hydrogramy odpływu w kolektorze KD1 podczas deszczu frontalnego z 17-05-2014
Fig. 5. Histogram of the frontal rainfall and simulated hydrographs for the KD1 collector on the day of 17 May 2014

W tabeli 7 podano wyniki obliczeń bilansowych – objętości wód deszczowych (V), objętości spływów (V_p i V_s) oraz zgodności wartości współczynnika spływu powierzchniowego ($\psi_{sr} \approx 0,53$) w przypadku pięciu opadów kalibracyjnych z użyciem wzoru W₄(1,6).

Na rysunku 6 przedstawiono bilans objętości wód deszczowych (V) w skalibrowanym modelu, z którego wynika, że objętości spływu (z symulacji i z pomiarów) opisuje równanie $V_s = 1,017V_p$, przy $R^2 = 0,993$, co oznacza stosunkowo wysoką zgodność opisu. W przypadku pięciu deszczów kalibracyjnych, 10 wyników symulacji (P1 i P2) znajdowało się w przedziale dokładności $\pm 10\%$.



Rys. 6. Bilans objętości spływu wód deszczowych (V) według skalibrowanego modelu oraz wzoru W₄(1,6)
Fig. 6. Balance of stormwater runoff volume (V) according to the calibrated model and W₄(1,6) formula

Tabela 7. Wyniki obliczeń bilansu objętości wód deszczowych (V) i współczynnika spływu (ψ)
Table 7. Calculation results of stormwater volume (V) and runoff coefficient (ψ) balance

Data opadu atmosferycznego (typ deszczu)	Parametr, jednostka							
	h, mm	V, m ³	V _p , m ³	V _s , m ³	ψ_p	ψ_s	$\psi_{p,śr}$	$\psi_{s,śr}$
przekrój przepływomierza P1 (F _{P1} =1039800 m ²)								
17 V 2014 (F)	15,08	15680,2	8736,0	8239,6	0,56	0,53	0,52	0,52
23/24 VII 2014 (N)	13,11	13631,8	7110,2	7067,2	0,52	0,52		
1/2 IX 2014 (N)	13,42	13954,1	7241,3	7222,0	0,52	0,52		
11 IX 2014 (N)	11,69	12155,3	5864,3	6224,0	0,48	0,51		
22/23 X 2014 (N)	28,39	29519,9	15903,9	16216,0	0,54	0,55		
przekrój przepływomierza P2 (F _{P2} =456300 m ²)								
17 V 2014 (F)	15,08	6881,0	3668,0	3787,7	0,53	0,55	0,51	0,55
23/24 VII 2014 (N)	13,11	5982,1	2913,5	3255,7	0,49	0,54		
1/2 IX 2014 (N)	13,42	6123,5	3279,3	3326,8	0,54	0,54		
11 IX 2014 (N)	11,69	5334,1	2532,2	2871,1	0,47	0,54		
22/23 X 2014 (N)	28,39	12954,4	6707,0	7372,2	0,52	0,57		

Walidacja modelu

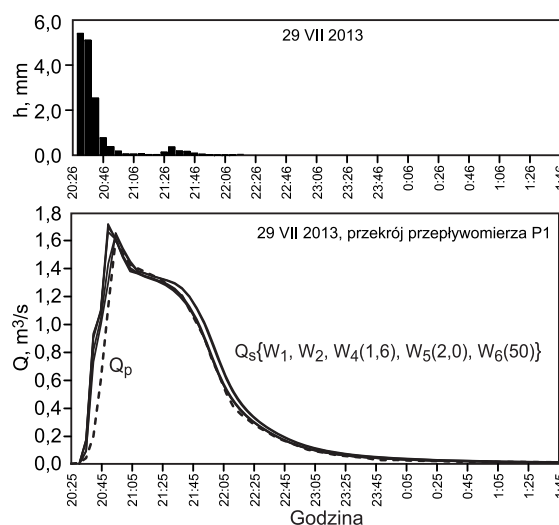
Walidacja skalibrowanego modelu badanego systemu kanalizacyjnego polegała na sprawdzeniu statystycznej dokładności odwzorowania zjawiska opad-odpływ w przypadku trzech krótkotrwałych, bardzo intensywnych deszczów (konwekcyjnych), przy kryteriach zgodności bilansu objętości wód deszczowych (V) i wartości strumieni maksymalnych – tzw. pików (Q_{maks}). Z tabeli 8 wynika, że w przypadku opadów walidacyjnych, odwzorowania dokładności wzorów W₁, W₂, W₄(1,6), W₅(2) i W₆(50) nie dały istotnych zmian wartości statystyk modelu – RS, WBR i ΔQ_{maks} .

Tabela 8. Wyniki obliczeń walidacyjnych modelu z użyciem wzorów W₁, W₂, W₄(1,6), W₅(2) i W₆(50)

Table 8. Validation calculation results for the model using the formulas: W₁, W₂, W₄(1,6), W₅(2) and W₆(50)

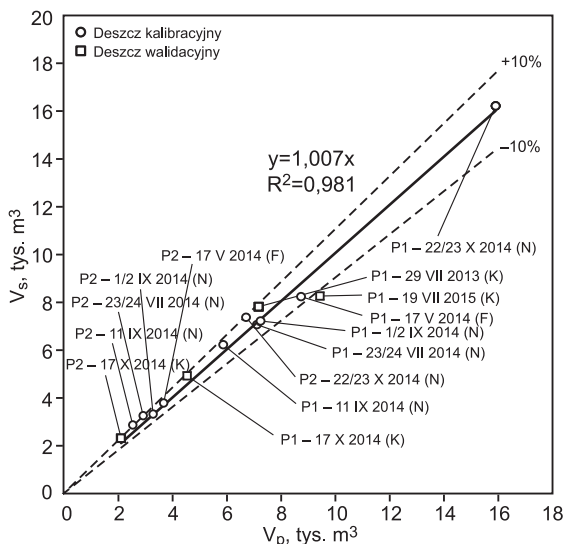
Wzór	Wskaźnik	Data wystąpienia opadu atmosferycznego (typ deszczu), przekrój przepływomierza			
		29 VII 2013 (K)	17 X 2014 (K)		19 VII 2015 (K)
		P1	P1	P2	P1
W ₁ = (2-S _k) L _k	RS	0,985	0,996	0,995	0,969
	WBR, %	2,5	1,0	1,3	3,0
	ΔQ_{maks} , %	-2,2	2,3	3,5	-4,7
W ₂ = F ^{1/2}	RS	0,988	0,994	0,992	0,970
	WBR, %	2,2	1,1	1,6	3,0
	ΔQ_{maks} , %	-3,0	3,3	5,4	-7,2
W ₄ (1,6) = 1,6F ^{1/2}	RS	0,978	0,996	0,995	0,961
	WBR, %	3,0	1,0	1,3	3,4
	ΔQ_{maks} , %	-5,5	-1,0	-1,7	-2,8
W ₅ (2,0) = 2F _u ^{1/2}	RS	0,977	0,995	0,995	0,960
	WBR, %	3,0	1,1	1,2	3,4
	ΔQ_{maks} , %	-7,0	0,0	-1,6	-2,6
W ₆ (50) = F _u /50	RS	0,978	0,993	0,996	0,959
	WBR, %	3,0	1,3	1,2	3,4
	ΔQ_{maks} , %	-3,5	1,8	-1,1	-3,4

Na rysunku 7 przedstawiono histogram intensywnego deszczu konwekcyjnego z 29-07-2013 oraz hydrogramy strumieni objętości ścieków deszczowych – zmierzony (Q_p) i symulowane (Q_s) w skalibrowanym modelu z użyciem wzorów W₁, W₂, W₄(1,6), W₅(2,0) i W₆(50) – w przekroju P1 kolektora KD1.

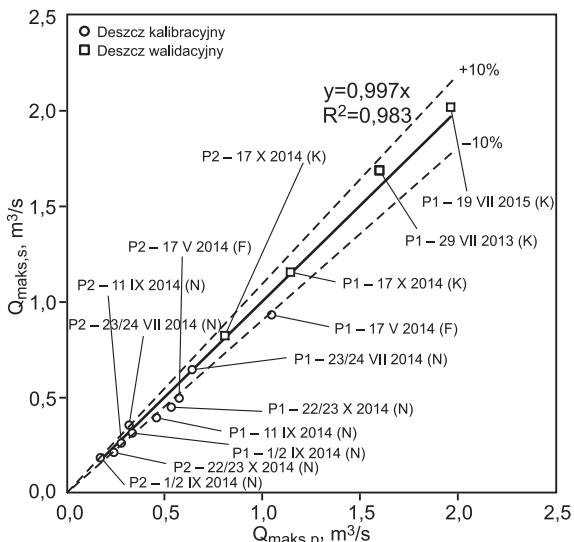


Rys. 7. Histogram oraz symulowane hydrogramy odpływu w kolektorze KD1 podczas deszczu konwekcyjnego z 29-07-2013
Fig. 7. Histogram of the convective rainfall and simulated hydrographs for the KD1 collector on the day of 29 July 2013

Ostateczną ocenę dokładności modelu skanalizowanej zlewni deszczowej osiedli Gaj-Tarnogaj zobrazowano łącznie w przypadku ośmiu deszczów – pięciu z kalibracji i trzech z walidacji modelu. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono zgodność bilansu objętości wód deszczowych (V) oraz maksymalnych wartości strumieni objętości ścieków deszczowych (Q_{maks}). W przypadku ośmiu deszczów (z kalibracji i walidacji), zarówno objętość V, jak i szczytowy strumień Q_{maks}, przy skalibrowanych i zwalidowanych parametrach modelu opisują równania prostych, odpowiednio przy R² równym 0,981 oraz 0,983. Oznacza to wysoką zgodność symulowanych i zmierzonych wielkości – 14 wyników (przekroje P1 i P2) zawierało się praktycznie w przedziale dokładności $\pm 10\%$.

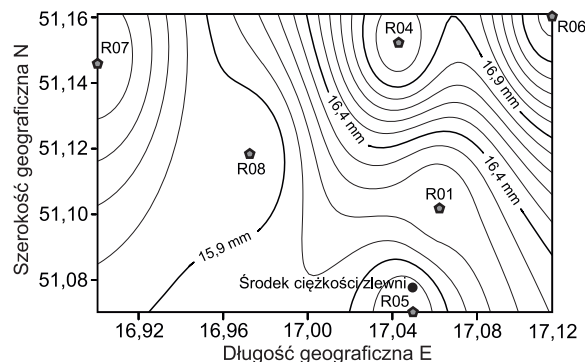


Rys. 8. Objętość spływu wód deszczowych (V) podczas 8 deszczów (z kalibracji i walidacji) oraz wg wzoru $W_4(1,6)$
 Fig. 8. Stormwater runoff volume (V) for 8 rainfalls (from calibration and validation) and $W_4(1,6)$ formula



Rys. 9. Szczytowy strumień objętości (Q_{maks}) 8 deszczów (z kalibracji i walidacji) oraz wg wzoru $W_4(1,6)$
 Fig. 9. The peak flow rate (Q_{maks}) for 8 rainfalls (from calibration and validation) and $W_4(1,6)$ formula

W pracy przeprowadzono także analizę dokładności odwzorowań deszczów w zlewni modelowej przy trzech opadach konwekcyjnych (wykorzystanych do walidacji modelu), w przypadku których dokonano korekty histogramów na podstawie pomiarów z 6 deszczomierzy sieci MPWiK w programie Surfer[®]13, z zastosowaniem metody odwrotnych odległości. Przeprowadzone symulacje w przedziałach 5-minutowych umożliwiły stworzenie nowych histogramów deszczów w środku ciężkości badanej zlewni. Jednak różnice wysokości opadów, zmierzonych na deszczomierzu R05 (na granicy badanej zlewni) i obliczone w środku ciężkości zlewni, okazały się zanedbywalnie małe (do kilku procent [5]). Wynikało to między innymi z małej odległości (620m) położenia deszczomierza R05 względem środka ciężkości zlewni (rys. 10). Jednakże przy większych odległościach deszczomierzy względem środka ciężkości danej zlewni istnieje konieczność wyznaczenia zastępczych histogramów deszczów, zarówno do kalibracji, jak i walidacji modeli [26].



Rys. 10. Izolinie wysokości deszczu z 29-07-2013 w siatce 6 deszczomierzy MPWiK SA we Wrocławiu
 Fig. 10. Isolines of rainfall intensity of 29 July 2013 in a grid of 6 rain gauges of Municipal Water and Sewage Company in Wrocław

Podsumowanie

Modelowanie działania (istniejących, modernizowanych czy nowoprojektowanych) systemów kanalizacyjnych jest w Polsce rzadko stosowane, głównie z powodu braku niezbędnych baz danych wyjściowych, jak też wciąż rozwijanych podstaw metodycznych. Celowe było więc podjęcie badań nad doskonaleniem zasad modelowania matematycznego systemów odwodnień terenów na podstawie lokalnych baz danych z monitoringu opadów atmosferycznych i przepływów ścieków deszczowych w kanalizacji (na przykładzie Wrocławia). Bazy te powinny obejmować pomiary minimum z dwóch lat.

Na podstawie przyjętych kryteriów wyboru pilotowej zlewni deszczowej do badań symulacyjnych wybrano skanalizowaną zlewnię osiedli Gaj i Tarnogaj, jako reprezentatywną w zabudowie mieszkaniowej Wrocławia i położoną w pobliżu deszczomierza. Opracowane kryteria wyboru mogą być zastosowane w innych zlewniach miejskich. W procesach identyfikacji, kalibracji i walidacji ustalono wartości parametrów hydrologicznych i hydraulicznych modelu, a także zweryfikowano praktyczną przydatność 12 postaci wzorów do określenia szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowych. W szczególności zaprezentowano wzór właściwy w warunkach hydrologicznych Wrocławia, który oceniono na granicy dobrego i bardzo dobrego.

Zaprezentowane wyniki badań mają w części metodycznej uniwersalny charakter i znajdują zastosowanie do identyfikacji, kalibracji i walidacji hydrodynamicznych modeli typu opad-odpływ (nie tylko we Wrocławiu). Zaproponowano, aby identyfikacja parametrów hydrologicznych i hydraulicznych modeli skanalizowanych zlewni deszczowych w oprogramowaniu SWMM odbywała się z uwzględnieniem czasoprzestrzennych zmian wysokości deszczów (np. w programie Surfer) w toku:

- kalibracji modeli wraz z weryfikacją metod określania szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowych, z wykorzystaniem deszczów długotrwałych (frontalnych i niżowych), przy kryteriach – bilans objętości wód deszczowych (V) i wartość współczynnika spływu (ψ),

- walidacji modeli z wykorzystaniem deszczów intensywnych (konwekcyjnych), przy kryteriach – bilans objętości wód deszczowych (V) i maksymalne wartości strumienia objętości ścieków deszczowych (Q_{maks}).

Do oceny jakości modeli zaproponowano trzy wskaźniki statystyczne – RS, WBR i ΔQ_{maks} , z których dwa pierwsze mają standaryzowane wartości, opisujące jakość dopasowania symulowanych i zmierzonych wartości Q oraz V .

Niniejszą pracę zrealizowano w ramach działalności statutowej Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, finansowanej ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2016 i 2017.

LITERATURA

1. PN-EN 752:2008: Zewnętrzne systemy kanalizacyjne (Drain and sewer systems outside buildings). PKN, Warszawa 2008.
2. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. *Dziennik Ustaw RP* 2014, poz. 1800.
3. A. KOTOWSKI: Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Wyd. II. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2015.
4. M. NOWAKOWSKA, A. KOTOWSKI, B. KAŹMIERCZAK: Problemy badawcze w modelowaniu hydrodynamicznym odwodnień terenów. *Forum Eksploatatora* 2012, nr 4, ss. 88–95.
5. B. KAŹMIERCZAK, A. KOTOWSKI: Weryfikacja przepustowości kanalizacji deszczowej w modelowaniu hydrodynamicznym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
6. M. NOWAKOWSKA: Identyfikacja parametrów hydrologicznych i hydraulicznych zlewni miejskiej w modelowaniu hydrodynamicznym SWMM. Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Wrocław 2016.
7. M. LEŚNIEWSKI: Modelowanie sieci kanalizacyjnych za pomocą programu SWMM. W: M. KWIETNIEWSKI [red.]: GIS, modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociągowymi i kanalizacyjnymi. PZITS, Warszawa 2005, ss. 185–197.
8. L.A. ROSSMAN: Storm Water Management Model. User's Manual, Version 5.0. United States Environmental Protection Agency, Washington D.C. 2010.
9. ASCE: Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems. New York 1992.
10. W. JAMES: Rules for Responsible Modeling. CHI Publications, Guelph (Ontario) 2003.
11. U.K. MAHEEPALA, A.K. TAKYI, B.J.C. PERERA: Hydrological data monitoring for urban stormwater drainage systems. *Journal of Hydrology* 2001, Vol. 245, pp. 32–47.
12. R. MCCUEN, P. JOHNSON, R. RAGAN: Hydrology. Federal Highway Administration, Washington D.C. 1996.
13. R. PIT: Infiltration through Disturbed Urban Soils and Compost-Amended Soil Effects on Runoff Quality and Quantity. United States Environmental Protection Agency, Washington D.C. 1999.
14. L.A. ROSSMAN: Storm Water Management Model. Quality Assurance Report: Dynamic Wave Flow Routing. United States Environmental Protection Agency, Washington D.C. 2006.
15. M. LEŚNIEWSKI: Doświadczenia z budowy modelu matematycznego kanalizacji deszczowej w Abu Zabi. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2013, nr 10, ss. 404–407.
16. M. ZAWILSKI, G. SAKSON: Modelowanie spływu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. Cz. I. Kalibracja modelu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2010, nr 11, ss. 32–36.
17. M. ZAWILSKI, G. SAKSON: Modelowanie spływu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. Cz. II. Weryfikacja modelu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2011, nr 9, ss. 321–323.
18. B. SZELĄG, Ł. BAŃ, J. GÓRSKI: Wpływ charakterystyk opadowych na parametry hydrogramu odpływu ze zlewni zurbanizowanej. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 2014, t. 14, z. 2, ss. 103–114.
19. M. MROWIEC: Efektywne wymiarowanie i dynamiczna regulacja kanalizacyjnych zbiorników retencyjnych. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Monografia nr 171, Częstochowa 2009.
20. M. SKOTNICKI, M. SOWIŃSKI: Weryfikacja metody wyznaczania szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowej na przykładzie wybranej zlewni miejskiej. W: M. KWIETNIEWSKI, J. SAWICKI, M. ZAWILSKI [red.]: Współczesne problemy Inżynierii i Ochrony Środowiska. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Inżynieria Środowiska, z. 57, Warszawa 2009.
21. I.R.A. GREEN, D. STEPHENSON: Criteria of comparison of single event models. *Hydrologie Sciences Journal* 1986, Vol. 31, No. 3, pp. 395–411.
22. M. OZGA-ZIELIŃSKA, J. BRZEZIŃSKI: Hydrologia stosowana. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1997.
23. N.A. ZAGHLOUL: SWMM model and level of discretization. *ASCE Journal of the Hydraulics Division* 1981, Vol. 107, No. 11, pp. 1535–1545.
24. M. ZAWILSKI: Integracja zlewni zurbanizowanej w symulacji spływu ścieków opadowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2010, nr 6, ss. 28–32.
25. M. SKOTNICKI, M. SOWIŃSKI: Wpływ wielkości zlewni wielkości zlewni cząstkowych na charakterystyki odpływu w modelu opad-odpływ. W: J. DZIOPAK, D. SŁYŚ, A. STEC [red.]: Nowoczesne miasta, infrastruktura i środowisko. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2016, ss. 295–304.
26. M. NOWAKOWSKA, A. KOTOWSKI: Analiza przemieszczania się opadów deszczowych nad Wrocławiem. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2015, t. 89, nr 5, ss. 179–184.

Nowakowska, M., Kaźmierczak, B., Kotowski, A., Wartalska, K. Identification, Calibration and Validation of Hydrodynamic Model of Urban Drainage System in the example of the City of Wrocław. *Ochrona Środowiska* 2017, Vol. 39, No. 2, pp. 51–60.

Abstract: Sewerage system operation modeling is rarely applied in Poland, mainly due to lack of necessary input databases as well as methodological basis still under development. In the paper, land drainage mathematical modeling using SWMM (Storm Water Management Model) software was revised, based on the example of stormwater catchment and its drainage system for the city of Wrocław. Research pilot catchment selection criteria were developed as well as principles of local database creation for rainfall events and wastewater stream measurements from sewage collectors over a minimum 2-year period. New rules of hydrological and hydraulic parameter identification

were proposed for hydrodynamic models during their calibration and validation, taking into account rainfalls for sewage system sizing and overload verification. Statistical criteria were proposed for model quality evaluation, usually employed to compare simulation results of the stormwater runoff flow rate (Q) and runoff volume (V) for the effective precipitation with the measurement data. The methodical aspect of the results presented is of a universal nature. Thus the results can be applied for identification, calibration and validation of hydrodynamic precipitation-runoff models (also outside Wrocław). It was proposed that parameter identification of hydrological and hydraulic models of stormwater catchments with drainage systems performed using the SWMM software took into account spatiotemporal changes in rainfall intensity (e.g. using Surfer software).

Keywords: Urban hydrology, stormwater drainage, stormwater catchment, database, modeling, Surfer, SWMM.