

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2016), 25 (4), 410–424
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2016), 25 (4)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2016), 25 (4), 410–424
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2016), 25 (4)
<http://iks.pn.sggw.pl>

**Mariusz BARSZCZ¹, Zbigniew BARTOSIK², Sylwester RUKŚĆ²,
Jakub BATORY²**

¹ Katedra Inżynierii Wodnej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Department of Hydraulic Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW

² Specjalistyczna Pracownia Projektowa „Waga-Bart”
Specialized Design Studio „Waga-Bart”

Porównanie przepływów maksymalnych obliczonych w zlewni miejskiej za pomocą modeli HEC-RAS i SWMM Comparison of maximum flows calculated in urban catchment using HEC-RAS and SWMM models

Słowa kluczowe: zlewnia miejska, przepływy maksymalne, modele OTTHYMO, HEC-RAS i SWMM

Key words: urban catchment, maximum flows, OTTHYMO, HEC-RAS and SWMM models

Wprowadzenie

Przepływy maksymalne o zadanym prawdopodobieństwie przekroczenia są podstawą, zarówno do oceny częstości występowania podtopień w zlewni, jak i do projektowania obiektów hydrotechnicznych (zbiorników, wałów przeciwpowodziowych itd.). W pracy przedstawiono wyniki obliczeń przepływów maksymalnych o prawdopodobieństwach przekroczenia 1, 2 i 10% w czterech wybranych przekrojach Potoku Służewieckiego (I–IV), położonych na odcinku od km 0+000 do 6+576,

a uzyskanych z modeli OTTHYMO, HEC-RAS, SWMM. W artykule zamieszczono krótki opis tych modeli. Głównym celem pracy było porównanie wyników obliczeń uzyskanych za pomocą różnych rodzajów (klas) modeli, tj. HEC-RAS i SWMM, jak również ocena przydatności tych modeli do prognozy przepływów w zlewniach zurbanizowanych.

Model OTTHYMO jest modelem symptomatycznym (konceptualnym) o parametrach skupionych. Obliczone za pomocą tego modelu przepływy przyjęto jako dane wejściowe do modelu hydraulicznego HEC-RAS, który umożliwił obliczenie rzędnych zwierciadła wody i transformację przepływów w korycie Potoku Służewieckiego.

Niezależne obliczenia przepływów przeprowadzono za pomocą modelu SWMM, który jest modelem dynamicz-

nym o parametrach rozłożonych. Model umożliwił przeprowadzenie obliczeń transformacji przepływów nie tylko w korycie Potoku Służewieckiego, ale również transformacji przez sieć kanalizacyjną na obszarze zlewni, zbiorniki retencyjne, przepusty drogowe, zastawki.

Za pomocą modelu SWMM obliczono w poszczególnych przekrojach zarówno przepływy zredukowane (ang. outflow), tj. przepływy obliczone z uwzględnieniem ich transformacji w cieku i w sieci kanalizacyjnej, przez zbiorniki retencyjne, przepusty drogowe i inne obiekty hydrotechniczne, jak również przepływy potencjalne (ang. runoff) oznaczające wielkość spływu powierzchniowego wygenerowanego w zlewniach cząstkowych.

Obliczenia za pomocą modeli OTTHYMO i HEC-RAS zostały przeprowadzone przez firmę Waga-Bart, a obliczenia za pomocą modelu SWMM przez pierwszego autora niniejszego artykułu. Wyniki tych obliczeń zostały uwzględnione w koncepcji pt. „Przebudowa układu hydrologicznego obejmującego Potok Służewiecki i Rów Wolica w celu zabezpieczenia przeciwpowodziowego rejonu dolnego biegu Potoku Służewieckiego. Etap II” (Waga-Bart, 2014).

W pracy przedstawiono wyniki kilku analiz porównawczych przeprowadzonych dla różnych parametrów w odniesieniu do poszczególnych przekrojów obliczeniowych i zdarzeń o różnych prawdopodobieństwach przekroczenia, w których porównano:

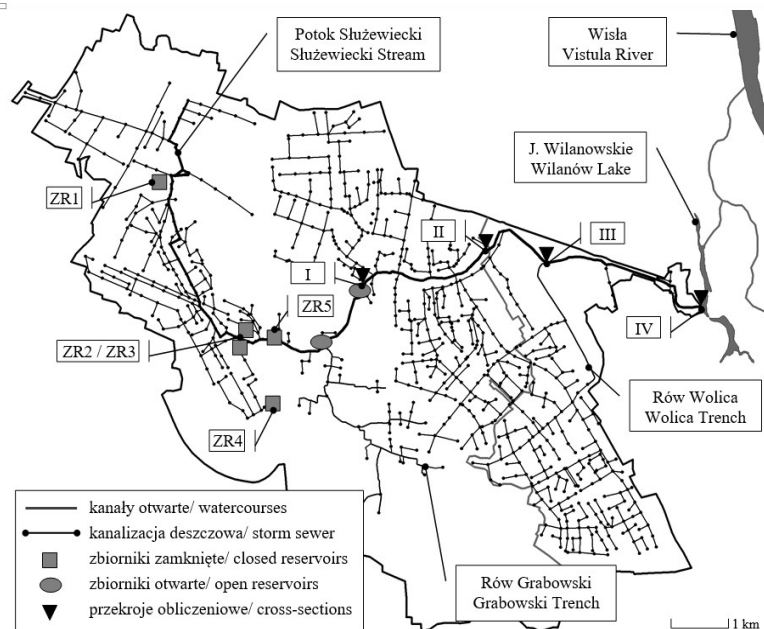
- czasy krytyczne trwania opadów i przepływy potencjalne ustalone przy zastosowaniu modeli OTTHYMO i SWMM,

- wyżej wymienione czasy z czasami koncentracji obliczonymi za pomocą wzoru Krepesa,
- przepływy zredukowane obliczone w modelach HEC-RAS i SWMM, jak również te przepływy z wartościami przepływów potencjalnych.

Opis zlewni

Zlewnia Potoku Służewieckiego jest położona w południowej części Warszawy, na obszarze dzielnic: Ochota, Włochy, Mokotów, Ursynów i Wilanów (Barszcz, 2009). Jej powierzchnia wynosi około 54 km². Na rysunku 1 przedstawiono sieć kanałów w zlewni, położenie w zlewni głównych zbiorników otwartych i zamkniętych, jak również przekrojów obliczeniowych. Te przekroje są zlokalizowane poniżej większych zrzutów wód do koryta potoku (przekroje o numeracji: I – poniżej ul. Wyścigowej, II – poniżej ul. Nowoursynowskiej, III – poniżej ujścia Rowu Wolica, IV – ujście potoku do Jeziora Wilanowskiego).

Zbiorniki zamknięte na obszarze portu lotniczego Okęcie o łącznej pojemności 42 490 m³ mają zasadniczy wpływ na kształtowanie się odpływu w górnej części zlewni. Zbiornik oznaczony skrótem ZR1 znajduje się w górnej części obszaru lotniska i ma za zadanie przechwytywać wody opadowe dopływające z wyżej położonych obszarów zabudowanych. Zbiorniki ZR2 i ZR3 znajdują się w dolnej części lotniska, tuż przy kanale zamkniętym Potoku Służewieckiego. Zbiornik ZR4 jest zlokalizowany poniżej terenu CARGO (towarowej obsługi lotniskowej). Zbiornik ZR5 jest najniżej położony w systemie odprowadzania



RYSUNEK 1. System odprowadzania wód opadowych w zlewni Potoku Służewieckiego
 FIGURE 1. The storm drainage system in the Służewiecki Stream catchment

wód opadowych z obszaru lotniska i jest włączony w układ technologiczny oczyszczania ścieków (Barszcz, 2009).

W górnej części zlewni Potok Służewiecki jest kanałem zamkniętym z kolei poniżej lotniska jest kanałem otwartym, do którego siecią kanalizacyjną odprowadzane są wody opadowe z obszaru zlewni. Na tym odcinku zasadniczy wpływ na transformację przepływów ma Staw Wyścigi (zlokalizowany tuż powyżej przekroju I) oraz ograniczona przepustowość koryta Potoku Służewieckiego i przepustów drogowych.

Całkowita długość Potoku Służewieckiego wynosi 14,9 km. Jego głównymi dopływami są Rów Grabowski i Rów Wolica. Cała zlewnia charakteryzuje się około 33% udziałem powierzchni

nieprzepuszczalnych i skanalizowaniem wynoszącym w przybliżeniu 60%.

Material i metody

Model OTTHYMO

Do modelowania transformacji opadu w odpływ w badanej zlewni został wykorzystany model konceptualny OTTHYMO (P'ug i Wisner, 1982), opracowany specjalnie pod kątem obliczania hydrogramów przepływów w zlewniach zurbanizowanych. Opis modelu można znaleźć w pracy Ozgi-Zielińskiej i Brzezińskiego (1997) oraz w opracowaniu przygotowanym przez autorów niniejszego artykułu (Waga-Bart, 2014). Parametry modelu są identyfikowane na

podstawie wzorów empirycznych i pomiarów charakterystyk fizycznych obszaru zurbanizowanego (Ozga-Zielińska i Brzeziński, 1997).

W modelu tym przyjęto, że zlewnia zurbanizowana składa się z obszarów należących do następujących kategorii: A – obszary przepuszczalne, B – nieprzepuszczalne, z których woda odprowadzana jest bezpośrednio do cieku za pośrednictwem kanalizacji deszczowej, C – obszary nieprzepuszczalne, z których woda deszczowa spływa na obszary przepuszczalne. Struktura modelu transformacji opadu efektywnego w odpływ powierzchniowy została przyjęta w postaci dwóch zbiorników liniowych połączonych równolegle (Ozga-Zielińska i Brzeziński, 1997).

Podstawowe założenia modelu OTTHYMO, przyjętego do obliczeń w badanej zlewni, można znaleźć w opracowaniu Waga-Bart (2014). Zastosowanie modelu do analiz wymagało określenia parametru CN do metody SCS (1986) dla obszarów przepuszczalnych w zlewniach cząstkowych ograniczonych przekrojami obliczeniowymi. Odpływ z powierzchni nieprzepuszczalnych określano jako różnicę między opadem całkowitym a wielkością retencji powierzchniowej. Adaptacja modelu dla badanej zlewni wymagała również określenia charakterystyk fizycznych w zlewniach cząstkowych:

- wielkość powierzchni zlewni należących do kategorii A, B, C,
- długość cieku do określonych przekrojów,
- rzędne terenu na wododziale oraz w przekrojach obliczeniowych,

- spadki terenu dla zlewni ograniczonych przekrojami obliczeniowymi.

Model OTTHYMO, adaptowany dla zlewni Potoku Służewieckiego, umożliwił obliczenie hydrogramów przepływu (w tym przepływów maksymalnych) w analizowanych przekrojach obliczeniowych w reakcji na opady o prawdopodobieństwach przekroczenia 1, 2 i 10%. Obliczone tym modelem przepływy maksymalne nie uwzględniały hydraulicznej retencyjności doliny Potoku Służewieckiego oraz ograniczeń przepustowości koryta i budowli z nim związanych. Otrzymane hydrogramy stanowiły dane wejściowe do modelu HEC-RAS, na podstawie którego obliczono przepływy (zredukowane) uwzględniające transformację w cieku (na odcinku od km 0+000 do 6+576) przez zbiorniki retencyjne, przepusty drogowe i mosty.

Do wyznaczenia hydrogramów przepływu w analizowanych przekrojach obliczeniowych przyjmowano w modelu OTTHYMO całkowite wielkości powierzchni do tych przekrojów. W obliczeniach za pomocą modelu HEC-RAS w przekroju I, zlokalizowanym na początku badanego odcinka Potoku Służewieckiego w tym modelu, przyjęto hydrogram przepływu obliczony za pomocą OTTHYMO przy uwzględnieniu opisanego wcześniej warunku. Dany mi wejściowymi do modelu HEC-RAS w niżej położonych przekrojach obliczeniowych (II–IV) były hydrogramy przepływu obliczone modelem OTTHYMO dla powierzchni zlewni stanowiącej przyrost między kolejnymi przekrojami, które wyznaczono jako różnica między wartościami przepływów dla hydrogramów w sąsiednich przekrojach.

Model HEC-RAS

Jak już wspomniano, hydrogramy przepływów obliczone za pomocą modelu OTTHYMO stanowiły dane wejściowe do modelu HEC-RAS (ang. Hydrologic Engineering Center's – River Analysis System). Poza tym danymi wejściowymi były dane geometryczne opracowane na podstawie pomiarów geodezyjnych i numerycznego modelu terenu, jak również współczynniki szorstkości określone na podstawie kalibracji modelu.

W modelu uwzględniono 126 przekrojów poprzecznych koryta i doliny Potoku Służewieckiego na badanym odcinku od km 0+000 do 6+576 oraz 40 przekrojów na Rowie Wolica, które zostały pomierzone przez firmę Waga-Bart. Uwzględniono również 35 budowli komunikacyjnych i 2 stopnie na Potoku Służewieckim oraz 6 mostów na Rowie Wolica. Pełny opis modelu można znaleźć w podręczniku Brunnera (2010). Szczegółowe informacje na temat adaptacji modelu dla Potoku Służewieckiego zostały przedstawione w opracowaniu Waga-Bart (2014).

Wykonane przez firmę Waga-Bart pomiary niwelacji zwierciadła wody i pomiary przepływu w czasie przejścia wód wielkich posłużyły do kalibracji modelu HEC-RAS. Na ich podstawie dokonano doboru współczynników szorstkości koryta, które zawierają się w przedziale od 0,03 do 0,04 $m^{-1/3} \cdot s$. Do rozwiązania zagadnienia propagacji fali w HEC-RAS zastosowano moduł programu, który wykorzystuje do obliczeń układ równań nieustalonego przepływu wody.

Model SWMM

Trzecim modelem zastosowanym do modelowania transformacji opadu w odpływ w badanej zlewni był model SWMM (ang. Storm Water Management Model) w wersji 5.0.022, opracowany przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (U.S. Environmental Protection Agency – EPA). Jest to model dynamiczny, przeznaczony do symulacji odpływu wód w reakcji na pojedyncze lub długoterminowe zdarzenia opadowe w zlewniach zurbanizowanych. Ponadto jest to model o znanej strukturze wewnętrznej (model „białej skrzynki”), o parametrach przestrzennej rozłożonych. Parametry modelu są fizycznie mierzalnymi charakterystykami zlewni i aktualnych warunków hydrometeorologicznych.

W strukturze omawianego modelu można wyróżnić dwie procedury obliczeniowe procesów zachodzących w hydrologicznym i hydraulicznym systemie zlewni. Procedura odpływu wód opadowych bazuje na zbiorze zlewni cząstkowych z określonymi parametrami (stanowiących obszary wydzielone w zlewni dla uwzględnienia przestrzennej zmienności modelowanych procesów hydrologicznych), które transformują spadający na ich powierzchnię opad w odpływ. Każda ze zlewni cząstkowych charakteryzuje się określonym udziałem obszarów przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych, zależnym od charakteru jej użytkowania. Obliczony spływ powierzchniowy (runoff) jest transportowany pomiędzy dwoma wymienionymi

obszarami, pomiędzy sąsiednimi zlewniami cząstkowymi lub jest odprowadzany do określonego punktu (węzła) usytuowanego w sieci kanalizacyjnej lub cieku odwadniającego zlewnię. Następnie w kanałach pojawia się fala wezbraniowa, która jest odprowadzana w stronę ujścia. W wyniku działania sił bezwładności, parcia, grawitacji i tarcia fala przemieszczająca się w kanałach ulega deformacji. Model SWMM umożliwia obliczenie transformacji fali wezbraniowej nie tylko w wyniku sił działających w kanałach lub korycie rzeki, ale również wskutek przepływu przez zbiorniki otwarte i zamknięte, przepusty, pompy, regulatory przepływu (zastawki, upusty, przelewy czołowe i boczne, zwężki, zawory, kłapy zwrotne) oraz dopływu bocznego wód opadowych. Szerszy opis modelu można znaleźć w pracach Barszcza (2009, 2015) oraz Zawilskiego i Sakson (2008).

Do rozwiązania zagadnienia propagacji fali w SWMM użytkownik może zastosować „model fali dynamicznej” (układ równań nieustalonego przepływu wody opracowanych przez de Saint-Venanta) lub może zastosować uproszczony model przepływu – „model fali kinematycznej”. Użytkownik ma do wyboru również procedurę „przepływu ustalonego”. Do obliczeń w niniejszej pracy zastosowano „model fali dynamicznej”, co było uzasadnione między innymi tym, że w badanym systemie hydraulicznym zlewni zachodzi zjawisko cofki, zmienia się kierunek przepływu w kanałach, występuje przepływ pod ciśnieniem w kanalizacji deszczowej oraz efekt podpiętrzenia wywołany budowlami piętrzącymi i dopływem skupionym (z kolektorów deszczowych).

Ze względu na to, że obliczane przepływy charakteryzowały się małym prawdopodobieństwem przekroczenia, to w czasie propagacji fali wezbraniowej w kanalizacji deszczowej występowało przeciążenie hydrauliczne niektórych kanałów i wypływ ścieków na powierzchnię terenu przez studzienki kanalizacyjne. Aby odwzorować te warunki, zaznaczono w modelu odpowiednią opcję obliczeniową (ang. allow ponding), znajdującą się w zakładce: opcje symulacji. Wybór tej opcji oznacza, że na odcinku przeciążonego kanału następuje wypływ wód opadowych na powierzchnię terenu przez węzły (reprezentujące w rzeczywistości studzienki kanalizacyjne), które przebywają tam do momentu odciążenia hydraulicznego kanałów, następnie wody opadowe wracają z powrotem do kanału przez węzły sieci kanalizacyjnej.

Model SWMM adaptowano w zlewni Potoku Służewieckiego dla dwóch scenariuszy obliczeniowych, które uwzględniają obliczenie przepływów o prawdopodobieństwach 1 i 2% (scen. 1) oraz 10% (scen. 2), poprzez dostosowanie parametrów modelu. Do oszacowania i identyfikacji parametrów obiektów modelu (reprezentujących fizyczne składniki rzeczywistego systemu hydrologicznego i hydraulicznego) wykorzystano pomierzone w terenie i zidentyfikowane na podstawie dostępnych materiałów charakterystyki rzeczywistych obiektów oraz wartości parametrów zalecane w tabelach modelowych podręcznika Rossmana (2005). Przekroje poprzeczne Potoku Służewieckiego i przepusty drogowe na odcinku od km 0+000 do 6+576 oraz Rowu Wolica uwzględniono w modelu na podstawie danych opracowa-

nych przez Waga-Bart – takie same dane geometryczne zastosowano w modelu HEC-RAS. Obszarową zmienność spływu powierzchniowego uwzględniono w modelu badanej zlewni przez jej podział na 3386 zlewni (obszary) cząstkowe. W modelu wydzielono 2265 odcinków kanałów (otwartych i zamkniętych) i niemal tyle samo węzłów, umieszczonych w miejscu zmiany charakterystyki kanałów lub połączenia kanałów.

Jednym z etapów adaptacji modelu SWMM dla zlewni Potoku Służewieckiego była kalibracja i weryfikacja modelu, którą opisano w innych pracach (Waga-Bart, 2014; Barszcz, 2015). W procesach kalibracji i weryfikacji modelu wykorzystano hydrogramy pomierzone przez Katedrę Inżynierii Wodnej SGGW w sześciu profilach wodowskazowych oraz przez służbę techniczną lotniska Okęcie, jak również dane opadowe zarejestrowane w dwóch posterunkach opadowych. Do ustalenia opadu efektywnego wybrano metodę CN-SCS (SCS, 1986).

Wyniki i dyskusja

W analizach prowadzonych za pomocą modeli OTTHYMO i SWMM przyjmowano opady o różnych czasach trwania w odniesieniu do zdarzeń o prawdopodobieństwach przekroczenia 1, 2 i 10% celem ustalenia czasów krytycznych trwania opadu (t_{kr}), tj. takich czasów, dla których obliczono w poszczególnych przekrojach największe wartości przepływów. Przepływom, które wyznaczono dla opadów charakteryzujących się określonym prawdopodobieństwem przekroczenia i czasem

krytycznym ich trwania, przyporządkowano adekwatne prawdopodobieństwo przekroczenia. Do obliczenia wielkości opadów wykorzystano formułę zaproponowaną przez Bogdanowicz i Stachy'ego (1997). Przyjęto założenie o równomiernym rozkładzie przestrzennym opadu. W obliczeniach za pomocą modelu OTTHYMO przyjęto zmienność czasową natężenia opadu według rozkładu zalecanego przez DVWK (1984). Do obliczeń w modelu SWMM przyjęto opady o stałym natężeniu w czasie ich trwania.

W metodach obliczeń przepływu na podstawie znanego lub założonego opadu występuje parametr o wymiarze czasu, określający warunki (fizycznogeograficzne i hydrologiczne) odpływu wody z powierzchni zlewni (Ciepielowski i Dąbkowski, 2006). Najczęściej przyjmuje się go różnym czasowi koncentracji. Z kolei czas koncentracji przyjmuje się często jako równy czasowi krytycznemu trwania opadu. W tabeli 1 zestawiono czasy krytyczne trwania opadów, które ustalono za pomocą modeli OTTHYMO i SWMM w odniesieniu do poszczególnych zlewni cząstkowych ograniczonych przekrojami obliczeniowymi. Te czasy, ustalone w analizach modelem konceptualnym OTTHYMO, zawierały się w zakresie od 140 do 160 min, a obliczone za pomocą modelu dynamicznego SWMM w zakresie od 120 do 260 min. Obliczone za pomocą dwóch rodzajów modeli czasy krytyczne trwania opadu są zbliżone do siebie dla przekrojów I oraz II, znacznie natomiast odbiegają od siebie dla przekrojów zlokalizowanych w dolnej części zlewni Potoku Służewieckiego. W tabeli 1 zamieszczono również wartości czasów koncentracji, obliczone za pomocą wzoru Krepsa, zalecanego

TABELA 1. Charakterystyki opadów obliczeniowych
TABLE 1. Characteristics of design rainfalls

Numer przekroju Profile number	Kilometr Kilometer	V	p	Czas krytyczny trwania opadu Critical time of rainfall			Suma opadu dla t_{kr1} Rainfall for t_{kr1}	Suma opadu dla t_{kr2} Rainfall for t_{kr2}
				t_{kr1}	t_{kr2}	t_{kr3}		
				min				
I	6+576	32,06	10	140	180	205	42,47	44,0
			2	140	170		55,25	56,7
			1	160	170		61,09	61,6
II	4+267	44,33	10	140	140	234	42,47	42,5
			2	140	150		55,25	55,8
			1	160	150		61,09	60,6
III	2+591	51,79	10	140	240	250	42,47	45,8
			2	140	170		55,25	56,7
			1	160	120		61,09	58,8
IV	0+000	53,64	10	140	260	254	42,47	46,3
			2	140	240		55,25	59,3
			1	160	240		61,09	64,4

Objaśnienia/Explanations: V – powierzchnia zlewni/catchment volume, p – prawdopodobieństwo/probability, t_{kr1} – obliczony za pomocą modelu OTTHYMO/calculated using the OTTHYMO model, t_{kr2} – obliczony za pomocą modelu SWMM/calculated using the SWMM model, t_{kr3} – obliczony za pomocą wzoru opracowanego przez Krepsa/calculated using the formula developed by Kreps.

w obliczeniach dla zlewni o małej retencji i silnych deszczach, przy dużych współczynnikach odpływu (Ciepielowski i Dąbkowski, 2006). Wartości tego parametru są w tym przypadku większe niż czasy krytyczne trwania opadu obliczone dwoma modelami, ale zbliżone w czterech przypadkach do czasów obliczonych za pomocą modelu SWMM dla przekrojów III i IV. W tabeli 1 podano sumy opadów, obliczone dla czasów krytycznych ich trwania.

W tabeli 2 zestawiono między innymi wartości potencjalnych przepływów maksymalnych o prawdopodobieństwach 1, 2 i 10%, obliczonych w czterech przekrojach Potoku Służewieckiego za pomocą modelu OTTHYMO i SWMM. Te przepływy (runoff) zostały obliczone bez uwzględnienia hydraulicznej retencyjności doliny Potoku Służewieckiego oraz ograniczeń przepustowości koryta cieku i budowli z nim związanych. Z danych obliczeniowych wynika, że uzyskano w badanych przekrojach dużo większe wartości przepływów potencjalnych przy zastosowaniu modelu SWMM niż przy zastosowaniu modelu OTTHYMO. Wpływ na te różnice w przepływach ma z pewnością to, że są to modele różnej klasy pod względem własności funkcji przekształcającej (operatora). Model OTTHYMO ma parametry skupione (określane w pracy

wieckiego za pomocą modelu OTTHYMO i SWMM. Te przepływy (runoff) zostały obliczone bez uwzględnienia hydraulicznej retencyjności doliny Potoku Służewieckiego oraz ograniczeń przepustowości koryta cieku i budowli z nim związanych. Z danych obliczeniowych wynika, że uzyskano w badanych przekrojach dużo większe wartości przepływów potencjalnych przy zastosowaniu modelu SWMM niż przy zastosowaniu modelu OTTHYMO. Wpływ na te różnice w przepływach ma z pewnością to, że są to modele różnej klasy pod względem własności funkcji przekształcającej (operatora). Model OTTHYMO ma parametry skupione (określane w pracy

TABELA 2. Przepływy maksymalne potencjalne (runoff) i zredukowane (outflow)
 TABLE 2. Maximum flows potential (runoff) and reduced (outflow)

Numer przekroju Cross-section number	p	Przepływ Runoff – OTTHY- MO	Przepływ Outflow – HEC- -RAS	Przepływ Runoff – SWMM	Przepływ Outflow – SWMM	Objętość splywu Volume rund OT- THYMO	Objętość odplywu Volume outflow SWMM
I	10	9,26	9,26	46,04	4,98	343	183
	2	18,28	18,28	72,82	5,70	636	235
	1	22,78	22,78	81,87	5,80	791	247
II	10	14,78	13,76	94,03	23,02	516	450
	2	28,58	26,58	135,97	28,83	914	631
	1	35,38	32,66	152,48	30,50	1139	691
III	10	19,76	12,89	82,03	16,08	651	604
	2	37,67	24,92	147,23	20,90	1121	783
	1	46,84	26,76	196,52	20,91	1386	795
IV	10	18,51	11,54	79,63	13,08	667	571
	2	35,72	14,26	125,24	17,83	1013	794
	1	44,23	15,75	140,64	18,44	1112	854

dla zlewni cząstkowych ograniczonych przekrojami obliczeniowymi), zatem nie uwzględnia przestrzennej zmienności charakterystyk zlewni i wielkości spływu wód opadowych. Model SWMM jest modelem o parametrach rozłożonych, a więc uwzględnia te elementy.

W tabeli 2 podano również wartości zredukowanych przepływów (outflow), obliczonych modelem HEC-RAS z uwzględnieniem ich transformacji w cieku (dane wejściowe do modelu stanowiły przepływy obliczone modelem OTTHYMO) oraz modelem SWMM z uwzględnieniem ich transformacji zarówno w cieku, jak i w sieci kanalizacyjnej na obszarze zlewni. Obliczone w ten sposób przepływy są dużo mniejsze od przepływów potencjalnych, w szczególności od przepływów obliczonych mo-

delem SWMM. W obliczeniach projektowych (np. zbiornika retencyjnego) lub przy ocenie zagrożenia powodziowego w różnych zlewniach zurbanizowanych należy uwzględniać przepływy zredukowane, bowiem są to przepływy, które mogą rzeczywiście wystąpić z określonym prawdopodobieństwem. W przeciwnym razie, projektując obiekty hydrotechniczne na podstawie przepływów potencjalnych, uzyskamy nieuzasadnione zwiększenie kosztów ich budowy.

Wartości przepływów zredukowanych obliczonych za pomocą modelu HEC-RAS są mniejsze nie tylko od przepływów potencjalnych obliczonych modelem SWMM, ale również obliczonych modelem OTTHYMO (jedynie w przekroju I wartości obydwu przepływów są sobie równe). Ta różnica w przepływach

jest zdecydowanie większa w relacji do potencjalnych przepływów uzyskanych w modelu SWMM. Hydrogramy spływu powierzchniowego obliczone w przekroju I za pomocą modelu OTTHYMO stanowiły dane wejściowe do modelu HEC-RAS w tym przekroju (zlokalizowanym na początku badanego odcinka Potoku Służewieckiego w modelu HEC-RAS), dlatego przepływy są w tym przypadku identyczne.

Obliczone za pomocą modelu HEC-RAS i SWMM przepływy zredukowane (outflow) o prawdopodobieństwach 1, 2 i 10% są do siebie podobne w przekrojach obliczeniowych II, III i IV – w siedmiu na dziewięć przypadków różnice nie przekraczają 25%. Duża różnica w wartościach przepływów występuje w przekroju I. Jako dane wejściowe w modelu HEC-RAS dla przekroju I przyjęto wartości przepływów obliczone modelem konceptualnym OTTHYMO bez uwzględnienia transformacji fali, a przepływy ustalone w tym przekroju za pomocą modelu SWMM zostały obliczone z uwzględnieniem transformacji na odcinku od źródeł Potoku Służewieckiego do tego przekroju. Zasadniczy wpływ na transformację przepływów na tym odcinku potoku miały zamknięte zbiorniki retencyjne na obszarze lotniska Okęcie (o łącznej pojemności 42 490 m³), z których odpływ regulowany jest za pomocą zastawek i pomp, jak również przepustów drogowych i retencji w zbiorniku otwartym Staw Wyścigi. Wymienione obiekty i urządzenia zostały uwzględnione w modelu SWMM adaptowanym dla badanej zlewni.

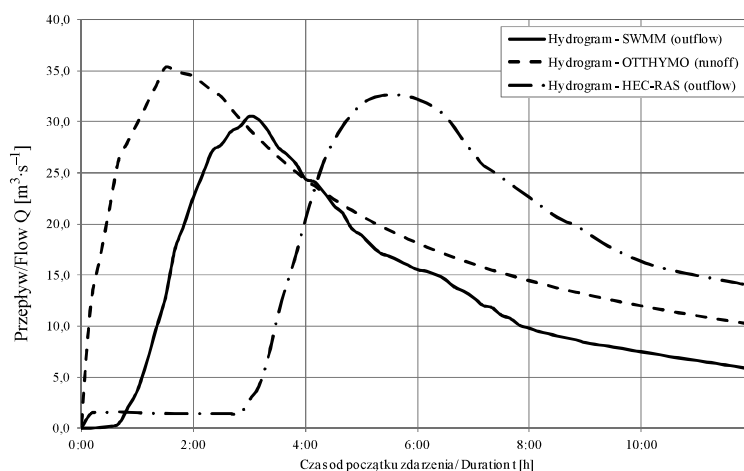
Największe wartości przepływów zredukowanych o prawdopodobieństwach 1, 2 i 10% obliczono w prze-

kreju obliczeniowym II zarówno za pomocą modelu HEC-RAS, jak i modelu SWMM. Wzrost przepływów w przekroju II w stosunku do przepływów obliczonych w przekroju I jest wynikiem zwiększonego dopływu wód opadowych za pośrednictwem kanalizacji deszczowej z części zlewni znajdującej się pomiędzy tymi przekrojami. Ta wskazana część zlewni charakteryzuje się relatywnie dużym udziałem obszarów nieprzepuszczalnych w stosunku do pozostałego obszaru zlewni oraz dużym udziałem powierzchni skanalizowanych. Redukcja przepływów w niżej położonych przekrojach potoku (III i IV) wynika z kilku przyczyn: zbyt małej przepustowości koryta potoku na tym odcinku, co skutkuje wylewaniem wód z koryta; przemieszczania się fali wezbraniowej w korycie ciek (transformacji fali), powodując jej systematyczne spłaszczenie i wydłużanie; występowania w kanale Potoku Służewieckiego przepustów drogowych, które transformują przepływy; mniejszego udziału powierzchni skanalizowanych na odcinku potoku pomiędzy przekrojem II i ujściem (mniejszych dopływów zasilających ciek punktowo), za wyjątkiem zlewni cząstkowej odprowadzającej wody opadowe do Rowu Wolica – jednakże przepływ kulminacyjny fali przemieszczającej się Rowem Wolica nie pokrywa się z kulminacją fali w Potoku Służewieckim.

Największe przepływy potencjalne obliczono przy zastosowaniu modeli OTTHYMO i SWMM w przekroju III. Obliczone przepływy w niżej położonym przekroju obliczeniowym IV są mniejsze niż w przekroju III, ponieważ przyrost zlewni nie jest proporcjonalny do przyrostu długości ciek.

Hydrogramy przepływów o prawdopodobieństwie przekroczenia 1%, obliczone w przekroju II za pomocą trzech rozpatrywanych modeli, przedstawiono na rysunku 2. Wybrano te hydrogramy jako przykładowe, ponieważ reprezentują zdarzenia o małym prawdopodobieństwie przekroczenia, ich przepływy (zredukowane) maksymalne miały największe wartości z pośród obliczonych w zlewni, a jednocześnie uzyskano dużą

Są to odpowiednio objętości spływu powierzchniowego (runoff) ze zlewni cząstkowych ograniczonych przekrojami obliczeniowymi oraz objętości odpływu w przekrojach (outflow), które ustalono dla czasu symulacji wynoszącego 24 h. Stosunek wartości objętości spływu obliczonych za pomocą modelu OTTHYMO do wartości objętości odpływu ustalonych w modelu SWMM wynosi w zakresie od 1,1 do 3,2.



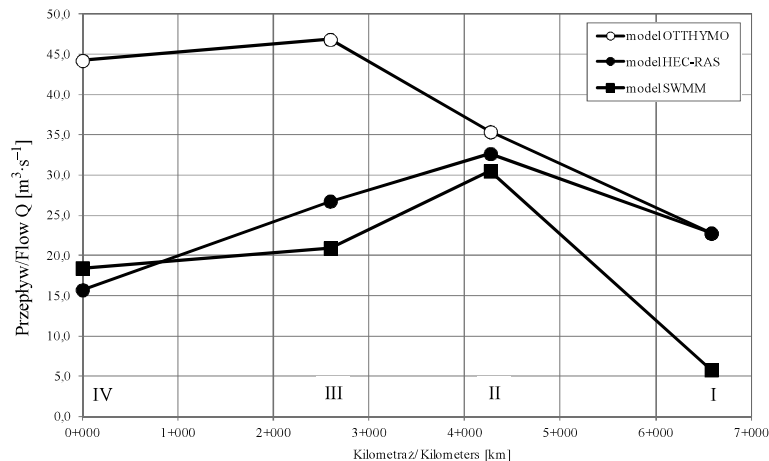
RYSUNEK 2. Hydrogramy przepływu o prawdopodobieństwie przekroczenia 1% obliczone w przekroju II za pomocą trzech rozpatrywanych modeli
 FIGURE 2. Hydrographs of flow with probability of exceedance of 1% calculated in the cross-section II using three considered models

zgodność między przepływami kulminacyjnymi obliczonymi za pomocą różnych modeli. Przebieg zmienności przepływów maksymalnych o tym samym prawdopodobieństwie wystąpienia, obliczonych w czterech analizowanych przekrojach Potoku Służewieckiego, zilustrowano na rysunku 3.

W tabeli 2 zamieszczono również objętości, które obliczono przy wykorzystaniu modeli OTTHYMO i SWMM.

Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń przepływów o prawdopodobieństwach przekroczenia 1, 2 i 10% w czterech przekrojach Potoku Służewieckiego (wywołanych opadami deszczu o tym samym prawdopodobieństwie), które przeprowadzono za pomocą trzech rodzajów (klas) modeli: OTTHYMO, HEC-RAS i SWMM.



RYSUNEK 3. Przepływy maksymalne o prawdopodobieństwie przekroczenia 1% obliczone przy zastosowaniu różnych modeli w czterech przekrojach obliczeniowych

FIGURE 3. Maximum flows with probability of exceedance of 1% calculated using different models in four cross-sections

Pierwszym elementem analiz były czasy krytyczne trwania opadów (t_{kr}), które ustalono za pomocą modeli OTTHYMO i SWMM dla poszczególnych zlewni cząstkowych ograniczonych przekrojami obliczeniowymi. Uzyskane za pomocą tych modeli wartości t_{kr} są zbliżone do siebie dla zlewni cząstkowych do przekrojów I oraz II, natomiast znacznie odbiegają od siebie w odniesieniu do przekrojów zlokalizowanych w dolnej części zlewni Potoku Służewieckiego. Wartości tego parametru porównano z czasami koncentracji, obliczonymi za pomocą wzoru Krepasa. Czasy krytyczne trwania opadów są w większości przypadków dużo mniejsze niż czasy koncentracji. Jedynie wartości t_{kr} , obliczone za pomocą modelu SWMM w przekroju III dla opadu o prawdopodobieństwie 10% oraz dla wszystkich przypadków w przekroju IV, są zbliżone do czasów koncentracji.

Drugim elementem analiz były wartości potencjalnych przepływów

maksymalnych (spływów powierzchniowych ze zlewni), które obliczono za pomocą modeli OTTHYMO i SWMM bez uwzględnienia hydraulicznej retencyjności doliny Potoku Służewieckiego oraz ograniczeń przepustowości koryta cieku i budowli z nim związanych. Uzyskano dużo większe wartości tych przepływów przy zastosowaniu modelu SWMM niż OTTHYMO. Taka różnica w przepływach wynika z zastosowania modeli należących do różnych rodzajów (klas). OTTHYMO jest modelem konceptualnym o parametrach skupionych, a więc nie uwzględnia przestrzennej zmienności charakterystyk zlewni, z kolei SWMM jest modelem dynamicznym o parametrach rozłożonych.

Wartości potencjalnych przepływów maksymalnych porównano z wartościami przepływów zredukowanych (ang. outflow) obliczonych za pomocą modelu HEC-RAS z uwzględnieniem ich transformacji w korycie Potoku Służewieckiego oraz modelu SWMM z uwzględ-

nieniem ich transformacji zarówno w cieku, jak i w sieci kanalizacyjnej na obszarze zlewni. Przepływy zredukowane są w obu przypadkach mniejsze od przepływów potencjalnych, ale dużo większa różnica między tymi przepływami występuje w odniesieniu do wartości obliczonych w modelu SWMM. W obliczeniach projektowych lub przy ocenie zagrożenia powodziowego w różnych zlewniach zurbanizowanych należy uwzględniać przepływy zredukowane.

Obliczone za pomocą modeli HEC-RAS i SWMM przepływy zredukowane o prawdopodobieństwach przekroczenia 1, 2 i 10% są do siebie podobne w przekrojach obliczeniowych II, III i IV – w siedem na dziewięć przypadków różnice w przepływach nie przekraczają 25%. Duża różnica w wartościach przepływów występuje w przekroju I. Największe wartości przepływów zredukowanych o określonym prawdopodobieństwie przekroczenia obliczono w przekroju II, przy zastosowaniu obydwu modeli.

Przedstawione w pracy wyniki obliczeń przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przekroczenia wskazują na możliwość stosowania w zlewniach zurbanizowanych (miejskich) zarówno modelu HEC-RAS, jak i modelu SWMM. Przy wyborze modelu do obliczeń należy mieć na uwadze, że model HEC-RAS ma większe możliwości obliczeniowe w odniesieniu do transformacji przepływów w kanałach otwartych. Model SWMM uwzględnia zmienność parametrów modelu na obszarze zlewni (poprzez jej podział na dowolną liczbę obszarów cząstkowych lub utworzenie kanałów odwadniających), a zatem możliwe jest obliczenie odpływu wody w wybranych punktach zlewni.

Poza tym model SWMM umożliwia obliczenie przepływów z uwzględnieniem ich transformacji w sieci kanalizacyjnej.

Literatura

- Barszcz, M. (2009). Prognoza maksymalnych przepływów prawdopodobnych wywołanych ulewami w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 4 (46), 3-23.
- Barszcz, M. (2015). Zastosowanie modelu SWMM do prognozy przepływów prawdopodobnych w zlewni miejskiej. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 69, 209-223.
- Bogdanowicz, E. i Stachy, J. (1997). Maksymalne opady deszczu w Polsce, charakterystyki projektowe. *Materiały badawcze IMGW*, 23, *Hydrologia i Oceanologia*, 85.
- Brunner, G.W. (2010). *HEC-RAS River Analysis System, User's Manual, Version 4.1*. Davis: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Ciepielowski, A. i Dąbkowski, Sz. L. (2006). *Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami)*. Wyd. 1. Bydgoszcz: Wydawnictwo Projprzem-EKO.
- DVWK (1984). *Arbeitsanleitung zur Anwendung Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Regeln 113*. T. II. Hamburg: Verlag Paul Parey.
- Rossman, L.A. (2005). *Storm water management model user's manual version 4*. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory.
- Ozga-Zielińska, M. i Brzeziński, J. (1997). *Hydrologia stosowana*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- P'ug, C. i Wisner, P. (1982). *OTTHYMO a model for master drainage plans*. M.A.Sc Thesis. Ottawa: University of Ottawa, Department of Civil Engineering.
- SCS (Soil Conservation Service) (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55*. Washington, D.C.: SCS (Soil Conservation Service).

Waga-Bart (2014). *Przebudowa układu hydrologicznego obejmującego Potok Służewiecki i Rów Wolica w celu zabezpieczenia przeciwpowodziowego rejonu dolnego biegu Potoku Służewieckiego. Etap II*. Warszawa: Waga-Bart.

Zawilski, M. i Sakson, G. (2008). Wykorzystanie programu SWMM w modelowaniu systemów kanalizacyjnych. W J. Łomotowski (red.), *Problemy zagospodarowania wód opadowych* (strony 155-169). Warszawa: Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o.

Streszczenie

Porównanie przepływów maksymalnych obliczonych w zlewni miejskiej za pomocą modeli HEC-RAS i SWMM. W pracy przedstawiono wyniki zastosowania trzech modeli, adaptowanych dla zlewni Potoku Służewieckiego, do prognozy przepływów o prawdopodobieństwach przekroczenia 1, 2 i 10% wywołanych ulewami. Przepływy prognozowano w czterech przekrojach obliczeniowych Potoku Służewieckiego, zlokalizowanych na odcinku od km 0+000 do 6+576. Obliczone za pomocą modelu conceptualnego OTTHYMO potencjalne przepływy (spływy powierzchniowe) przyjęto jako dane wejściowe do modelu hydraulicznego HEC-RAS, który umożliwił transformację przepływów w cieku i wyznaczenie przepływów w poszczególnych przekrojach obliczeniowych (przepływów zredukowanych). Niezależne obliczenia przepływów potencjalnych i zredukowanych przeprowadzono za pomocą modelu SWMM, który jest modelem dynamicznym o parametrach rozłożonych. Obliczone za pomocą modeli HEC-RAS i SWMM przepływy zredukowane o prawdopodobieństwach przekroczenia 1, 2 i 10% są do siebie podobne w przekrojach obliczeniowych II, III i IV – w siedmiu na dziewięć przypadków różnice w przepływach nie przekraczają 25%. Największe wartości przepływów zredukowanych o określo-

nym prawdopodobieństwie przekroczenia obliczono w przekroju II, przy zastosowaniu obydwu modeli. Przepływy zredukowane są mniejsze od przepływów potencjalnych obliczonych za pomocą modeli OTTHYMO i SWMM. Wyniki obliczeń wskazują na możliwość stosowania w zlewniach miejskich zarówno modelu HEC-RAS, jak i modelu SWMM.

Summary

Comparison of maximum flows calculated in urban catchment using HEC-RAS and SWMM models. The paper presents the results of an application of three models, adapted for the Służewiecki Stream catchment, to forecast flows with probability of exceedance 1, 2 and 10% caused by heavy rains. Flows were forecasted in four cross-sections of the Służewiecki Stream, located on the section from km 0+000 to 6+576. Potential flows (surface runoff) calculated using the conceptual OTTHYMO model were taken as an input data to the hydraulic HEC-RAS model, which enabled transformation of the flows in the watercourse and determining flows in the individual cross-sections (reduced flows). Independent calculations of potential and reduced flows was performed using the SWMM model, which is a dynamic model with distributed parameters. Calculated using HEC-RAS and SWMM models reduced flows with probability of exceedance of 1, 2 and 10% are similar in the computational cross-sections II, III and IV – in seven out of nine cases the differences in the flows do not exceed 25%. The highest values of reduced flows with a certain probability of exceedance were calculated in the cross-section II, using both models. The results of calculations indicate the possibility of use in an urban catchments of both the HEC-RAS model and the SWMM model.

Authors' address:

Mariusz Barszcz
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie,
Katedra Inżynierii Wodnej
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159
Poland
e-mail: mariusz_barszcz@sggw.pl

Zbigniew Bartosik, Sylwester Rukść,
Jakub Batory
Specjalistyczna Pracownia Projektowa
„Waga-Bart”
02-787 Warszawa, ul. Wojciechowskiego 37 m. 4,
Poland
e-mail: wagabart@poczta.onet.pl