

Modelowanie hydrodynamiczne dużego systemu kanalizacji deszczowej – na przykładzie Lotniska Chopina w Warszawie

Hydrodynamic modelling of a large stormwater sewer system – the case of Warsaw Chopin Airport

Mariusz Paweł Barszcz^{*}

Słowa kluczowe: model SWMM, kanalizacja deszczowa, zbiorniki retencyjne, modelowanie hydrodynamiczne

Streszczenie

Hydrodynamiczne metody obliczeniowe umożliwiają weryfikację przepustowości hydraulicznej i stanów przeciążenia (nadpiętrzenia i wylania wód opadowych) sieci kanalizacyjnych, które zwymiarowano metodami czasu przepływu. Niniejsza praca przedstawia wyniki takich obliczeń, sprawdzających przy zadanych opadach deszczu, które przeprowadzono dla dużego i złożonego systemu kanalizacji deszczowej na obszarze Lotniska Chopina w Warszawie, w oparciu o hydrodynamiczny model SWMM (Storm Water Management Model) w wersji 5.2. Opisano etapy adaptacji tego modelu dla badanej zlewni. W wyniku symulacji numerycznych stwierdzono przeciążenia dla określonych kanałów deszczowych oraz występowanie nadpiętrzenia wód opadowych w węzłach (wylewów). Najbardziej niekorzystny stan systemu uzyskano przy obciążeniu zlewni opadem modelowym Eulera typ II. Symulacje uwzględniały dławienie (regulację) przepływów w kolektorze za pomocą zasuw, których działanie jednocześnie powodowało wzrost poziomu wód w kanałach. Na przykładzie przyjętej zlewni wykazano, że weryfikacja sprawności hydraulicznej systemów kanalizacyjnych, przy zastosowaniu modelu hydrodynamicznego, jest uzasadniona. Program SWMM stanowi kompleksowe narzędzie, które umożliwia przeprowadzenie takich obliczeń.

Keywords: SWMM model, stormwater sewer, retention tanks, hydrodynamic modelling

Abstract

Hydrodynamic computational methods allow for the verification of hydraulic capacity and overload conditions (surcharge and overflow of rainwater) of sewer networks, which were dimensioned using flow duration methods. This paper presents the results of such calculations for given rainfall, which were conducted for a large and complex stormwater drainage system at Warsaw Chopin Airport, based on the hydrodynamic SWMM model (Storm Water Management Model) in version 5.2. The stages of adapting this model for the studied catchment are described. As a result of numerical simulations, overloads were identified in specific stormwater sewer pipes, along with the occurrence of surcharge of rainwater at nodes (overflows). The most adverse condition of the system was identified when the catchment was loaded with Eulerian Type II model rainfall. The simulations considered the throttling (regulation) of flows in the collector using gate valves, the operation of which simultaneously caused an increase of the water level in the sewer pipes. For the example of the adopted catchment, it was demonstrated that the verification of hydraulic efficiency in sewer systems using a hydrodynamic model is justified. The SWMM program serves as a comprehensive tool that enables conducting such calculations.

1. WSTĘP

Metody czasu przepływu (metoda granicznych natężeń, metoda współczynnika opóźnienia) są obecnie i pozostaną w przyszłości podstawowym narzędziem do wymiarowania systemów (sieci i obiektów) kanalizacji deszczowej czy ogólnospławnej [6]. Umożliwiają wyznaczenie miarodajnego, do wymiarowania sieci odwodnieniowej, strumienia odpływu wód deszczowych. Do prognozy przepływu wód mogą być również stosowane metody hydrologiczne (modele konceptualne – model Nasha, metoda SCS, modele geomorfologiczne itp.) [2,5,12] lub hydrodynamiczne (modele SWMM, Mike Urban, Hykas-SewerPac itp.) [1,4,9,17,21]. Metody hydrologiczne używają empirycznych zależności lub funkcji transformacji do obliczeń odpływu w kanałach, natomiast metody hydrodynamiczne bazują na rozwiązaniu równań Saint-Venanta [6,7,18]. Modele hydrodynamiczne, stosowane do opisu działania

systemów kanalizacyjnych, umożliwiają uwzględnienie zmiennych w czasie i przestrzeni rzeczywistych spływów wód opadowych, a także zmiennego i niustalonego przepływu wód w kanałach oraz obiektach kanalizacyjnych [8].

Dla większych systemów kanalizacyjnych (nowo projektowanych lub modernizowanych istniejących systemów w zlewni o powierzchni większej od 2 km²) zaleca się obecnie weryfikowanie zwymiarowanych kanałów (obiektów), na podstawie modeli symulacyjnych – hydrodynamicznych, w szczególności tam, gdzie mogą wystąpić znaczne szkody bądź też zagrożenia [6]. Weryfikacja za pomocą tego typu modeli może obejmować obliczenia sprawdzające maksymalną przepustowość hydrauliczną kanałów czy możliwość występowania stanów przeciążenia sieci kanalizacyjnej (działania kanałów pod ciśnieniem, nadpiętrzenia wód w sieci) [10]. Modele hydrodynamiczne umożliwiają również oszacowanie

^{*} Mariusz Paweł Barszcz, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytut Inżynierii Środowiska, ORCID: 0000-0002-7860-1995, e-mail: mariusz_barszcz@sggw.edu.pl

wanie częstości wystąpienia wylania wód na powierzchnię terenu, przy obciążeniu zlewni opadami o różnych parametrach i porównanie ich z dopuszczalnymi częstościami wylewów z kanalizacji zalecanymi wg norm PN-EN 752:2008 [13] lub PN-EN 752:2017 [14].

Pośród istniejących programów komputerowych do hydrodynamicznych symulacji działania systemów kanalizacyjnych, SWMM (Storm Water Management Model) jest jednym z często wykorzystywanych w kraju i na świecie. Program jest ogólnie dostępny i bezpłatny [19]. Dla przykładu, w pracach [20,21] został przedstawiony całościowo proces kalibracji modelu SWMM dla małej zlewni na terenie Łodzi oraz jego weryfikacji dla dwóch innych zlewni miejskich. Identyfikację modelu hydrodynamicznego w programie SWMM przedstawiono w pracy [11], na przykładzie skanalizowanej zlewni we Wrocławiu. Dokumentację zastosowania omawianego modelu do symulacji działania kanalizacji deszczowej w małej zlewni (10,1 ha) na terenie Wrocławia można znaleźć w artykule [8]. W wyniku tych symulacji ustalono, że przykładowa kanalizacja nie spełnia wymagań normy PN-EN 752:2008 odnośnie dopuszczalnej częstości wylewów z kanałów. Inny przykład zastosowania modelu SWMM można znaleźć w pracy [3], w której przedstawiono wyniki symulacji przepływów o określonych prawdopodobieństwach występowania w zlewni na obszarze Warszawy, jak i ocenę możliwości ich redukcji poprzez retencjonowanie wód opadowych w zbiornikach.

W niniejszej pracy opisano etapy adaptacji hydrodynamicznego modelu SWMM dla zlewni cząstkowej Potoku Służewieckiego w Warszawie, która obejmuje duży i złożony system kanalizacji deszczowej na obszarze Lotniska im. Chopina. Następnie przedstawiono wyniki weryfikacji działania tego systemu (przy uwzględnieniu transformacji przepływów przez zbiorniki retencyjne, zasuw, przelewy, pompy itd.) w zakresie przepustowości hydraulicznej kanałów i możliwości występowania przeciążeń (wylewów) w obiektach kanalizacyjnych w oparciu o model SWMM. Symulacje numeryczne przeprowadzono dla trzech opadów deszczu o zróżnicowanych parametrach.

2. Opis metodyki i modelu symulacyjnego

2.1 System kanalizacyjny

Przedstawione w tej pracy obliczenia, sprawdzające system kanalizacyjny, dotyczą górnej części zlewni Potoku Służewieckiego, zlokalizowanej w południowo-zachodniej części Warszawy. Analizowana zlewnia cząstkowa Potoku Służewieckiego o powierzchni 17,8 km² (1 780 ha) obejmuje obszar Lotniska im. F. Chopina w Warszawie, który stanowi jej zasadniczą część, jak i wyżej położony obszar miejski (zurbanizowany). Zasięg przedmiotowej zlewni jest ograniczony przekrojem Potoku Służewieckiego, który zlokalizowany jest ok. 450 poniżej obszaru Lotniska – wylotu kolektora z Oczyszczalni Wód Deszczowych (rys. 1). Stanowi on miejsce instalacji posterunku wodowskazowego, w którym Katedra Inżynierii Wodnej i Geologii Stosowanej SGGW (Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie) prowadzi pomiary stanów i przepływów wody.

Odcinek Potoku Służewieckiego od źródeł do przekroju wodowskazowego jest prawie na całej długości betonowym kolektorem, do którego siecią kanalizacyjną odprowadzane są wody opadowe z obszaru zlewni. Jego długość wynosi ok. 7 km. Istniejąca na obszarze Lotniska sieć kanalizacji deszczowej ma łączną długość ok. 30 km. Średnica kolektora na terenie portu lotniczego, który stanowi Potok Służewiecki, zmienia się w zakresie od 1,8 do 2,5 m.

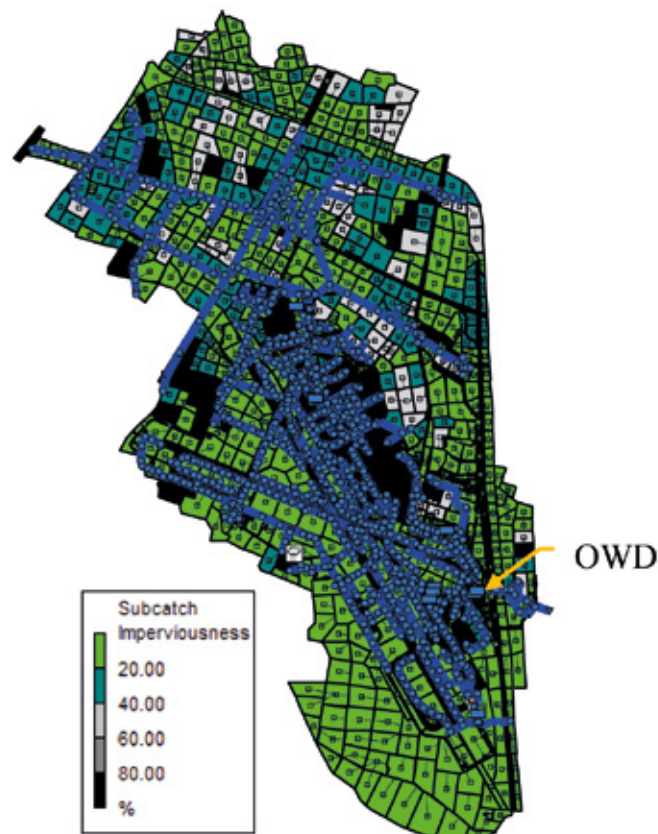
Na obszarze Lotniska Chopina znajdują się cztery zbiorniki oznaczone symbolami ZR1, ZR2, ZR3 i ZR4 (rys. 4), wykorzystywane do retencjonowania wód opadowych i roztopowych, których pojemności wynoszą odpowiednio 8 000, 11 130, 15 620 i 1 900 m³. Uzupełnieniem systemu retencyjnego analizowanej zlewni jest zbiornik ZR5 i osadnik deszczowy o pojemnościach odpowiednio 5 000 i 840 m³, zlokalizowane na terenie Oczyszczalni Wód Deszczowych – OWD. Całkowita pojemność retencyjna tych zbiorników wynosi 42 490 m³. Zadaniem zbiornika

ZR1, zlokalizowanego w górnej części Lotniska, jest retencjonowanie odpływu z wyżej położonego obszaru miejskiego (użytkowanego głównie jako tereny zabudowy mieszkaniowej i tereny przemysłowe). Natomiast pozostałe zbiorniki służą do retencji odpływu powstającego na obszarze Lotniska. Zbiornik ZR5 jest włączony do układu technologicznego Oczyszczalni.

Napełnianie i opróżnianie bocznych zbiorników retencyjnych ZR1, ZR2-3 i ZR5 odbywa się poprzez sterowanie wysokością opuszczania i podnoszenia zasuw w trzech komorach regulacyjnych, które zlokalizowane są w kolektorze (Potoku Służewieckim – mającym na obszarze Lotniska charakter kanału zamkniętego), tuż poniżej miejsca lokalizacji tych zbiorników. Sterowanie położeniem wysokościowym zasuw odbywa się w sposób automatyczny lub jest realizowane przez operatora systemu za pomocą oprogramowania komputerowego. Przyjęty schemat sterowania pracą zasuw w komorach regulacji przepływów zakłada, że przepływ w kolektorze poniżej każdej z nich (w szczególności na wylocie z OWD) nie powinien przekraczać wartości $Q = 1,53 \text{ m}^3/\text{s}$. Zbiornik ZR4 i w określonych sytuacjach również zbiornik ZR5 są opróżniane za pomocą zainstalowanych pomp.

2.2 Model SWMM dla analizowanej zlewni

Modelowanie działania systemu kanalizacyjnego w analizowanej zlewni przeprowadzono przy wykorzystaniu programu komputerowego SWMM (Storm Water Management Model) w wersji 5.2 [19], opracowanego przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (ang. U.S. Environmental Protection Agency). W pierwszym rozdziale niniejszego artykułu podano przykładowe pozycje krajowej literatury, które zawierają informacje o programie SWMM i przeprowadzanych przy jego zastosowaniu symulacjach. Szczegółowy opis tego programu można znaleźć w podręczniku [15], dostępnym na stronie internetowej [19].



Rys. 1. Analizowana zlewnia w modelu SWMM z podziałem na zlewnie cząstkowe. Objasnienia: przewody i węzły kanalizacyjne – linie i punkty w kolorze niebieskim; OWD – Oczyszczalnia Wód Deszczowych

Fig. 1. Analysed catchment in the SWMM model with a division into sub-catchments. Explanations: sewer pipes and nodes – blue lines and points; OWD – Rainwater Treatment Plant

W strukturze modelu matematycznego SWMM można wyodrębnić procedury obliczeniowe procesów zachodzących w hydrologicznym i hydraulicznym systemie zlewni, jak i umożliwiające modelowanie jakości ścieków. Procedura hydrologiczna bazuje na zbiorze zlewni cząstkowych, wydzielanych w zlewni dla uwzględnienia przestrzennej zmienności procesów hydrologicznych, które transformują spadający na ich powierzchnię opad w odpływ (spływ). Na podstawie zadanych w modelu wartości wysokości lub natężenia opadów (pomierzonych w zlewni lub oszacowanych na podstawie określonego modelu opadowego w przyjętych przedziałach czasowych) obliczany jest opad efektywny wg jednej z kilku dostępnych metod, który przekształcający jest w odpływ. Druga procedura modelu – hydrauliczna, na podstawie wyznaczonego spływu z poszczególnych zlewni cząstkowych realizuje obliczenia wielkości przepływu wód (ścieków) w kanałach otwartych lub zamkniętych (z uwzględnieniem przepływu swobodnego, ciśnieniowego i wymuszonego), jak również jego transformacji przez zbiorniki retencyjne, przepusty, pompy, urządzenia i budowle służące do regulowania i zmiany kierunku przepływu (zastawki, upusty, przelewy czołowe i boczne, zwężki, kłapy zwrotne itp.). Przebieg procesu transformacji opadu w odpływ w modelu SWMM jest opisany równaniami fizyki matematycznej i wykorzystuje metodę numeryczną do rozwiązania równań Saint Venanta. W wyniku tych obliczeń uzyskuje się wartości natężenia i prędkości przepływu, objętości odpływu, poziomu wód w określonych obiektach systemu hydraulicznego zlewni.

Adaptacja modelu SWMM dla analizowanej zlewni polegała na utworzeniu w oknie programu graficznych obiektów, które „imitują” istniejący (oryginalny) system hydrologiczno-hydrauliczny, a następnie na określeniu wartości ich parametrów, będących w większości fizycznie mierzalnymi charakterystykami. W modelu uwzględniono następujące obiekty:

1. Posterunek opadowy.

Utworzono jeden posterunek opadowy, który powiązано ze wszystkimi zlewniami cząstkowymi na analizowanym obszarze. We właściwościach tego obiektu określano wysokości opadów (pomierzonych na rzeczywistym posterunku opadowym w zlewni i obliczonych na podstawie przyjętych formuł empirycznych) dla zdarzeń o określonych czasach trwania i częstościach występowania, w przyjętych 5 minutowych przedziałach czasowych.

2. Zlewnie cząstkowe (1516 obiektów).

Obszarową zmienność warunków hydrologicznych w analizowanej zlewni, a tym samym zmienność wielkości spływu wód opadowych, uwzględniono przez jej podział na homogeniczne zlewnie cząstkowe (rys. 1). Kryterium tego podziału był charakter użytkowania i związany z nim udział powierzchni przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych. Rodzaj użytkowania terenu identyfikowano na podstawie ortofotomapy – mapy rastrowej badanego obszaru w formacie bitmapy, którą zaimportowano do modelu. Przyjęto 26 rodzajów użytkowania terenu (tereny handlowe i przemysłowe, jezdnie, tereny mieszkalne, pasy startowe, płyty postojowe dla samolotów itd.), którym przyporządkowano w modelu zróżnicowane wartości procentowego udziału powierzchni nieprzepuszczalnych i innych parametrów wymagających identyfikacji. Wielkość poszczególnych zlewni cząstkowych wynikała również z analizy kierunków spadku terenu i graficznych informacji na mapie zasadniczej o przestrzennym usytuowaniu kanałów odwadniających powierzchnie nieprzepuszczalne (szczelne) do określonego węzła kanalizacyjnego. Mając to na względzie, podział na zlewnie cząstkowe przeprowadzono bardziej szczegółowo w odniesieniu do obszarów zurbanizowanych i odwodnianych za pomocą kanalizacji (w szczególności tych położonych na terenie Lotniska), niż dla obszarów charakteryzujących się odmiennymi warunkami spływu (gruntów ornych, terenów zielonych itp.).

3. Kanały zamknięte i otwarte (1029 odcinków kanałów), punkty węzłowe (studzienki).

Utworzona w modelu trasa kanałów odzwierciedla położenie rzeczywistych kanałów w zlewni, a lokalizacja węzłów określa miejsce

występowania studzienek kanalizacyjnych w systemie lub zmiany charakterystyki kanałów (rys. 1).

4. Zbiorniki (5 zbiorników retencyjnych i osadnik deszczowy).

Utworzono cztery zbiorniki na obszarze Lotnisk Chopina (ZR1-ZR4) oraz zbiornik (ZR5) i osadnik deszczowy na terenie OWD (rys. 4). Pojemności retencyjne tych zbiorników podano w poprzednim podrozdziale.

5. Przepompownie wód deszczowych (7 pomp).

W modelu uwzględniono pompy, które umożliwiają transport wód opadowych poprzez studnię rozprężną ze zbiornika retencyjnego ZR4 do kanału grawitacyjnego na terenie Lotniska oraz ze zbiornika ZR5 do miejskiego systemu kanalizacyjnego. Ponadto uwzględniono pompy umożliwiające przepompowanie wód (ścieków) z kanału podstawowego na Oczyszczalni do zbiornika ZR5, w sytuacji występowania nadmiernego spiętrzenia wód w tym kanale (wielkość przepływu przez kanał jest regulowana zasuwą).

6. Obiekty (urządzenia) do regulacji (sterowania) przepływu wód opadowych i działania zbiorników retencyjnych (19 obiektów):

- zasuwy czołowe – zlokalizowane na kolektorze (Potoku Służewieckim, który na obszarze Lotniska ma charakter kanału zamkniętego), odbierającym spływy z obszaru Lotniska, w trzech komorach regulacji przepływów – KRP1, KRP2, KRP3 (rys. 4). Sterując wysokością podnoszenia/opuszczania tych zasuw realizowane są procesy napełniania/oprózniczenia zbiorników bocznych na obszarze Lotniska odpowiednio ZR1, ZR2-3, ZR5 (również osadnika deszczowego na terenie OWD),
- zasuwy boczne, przelewy boczne i czołowe – umożliwiające sterowane lub samoczynne napełnianie/oprózniczenie zbiorników.

7. Kłapy zwrotne; przepusty drogowe; węzeł wylotowy w przekroju zamykającym zlewnię.

2.3 Identyfikacja parametrów modelu

Program SWMM odznacza się dokładnym opisem hydrologicznego i hydraulicznego systemu zlewni zurbanizowanej i zachodzących w nim procesów. Posiada dużą liczbę parametrów, które mają interpretację fizyczną lub stanowią współczynniki liczbowe równań modelu. W odniesieniu do obiektów utworzonych w modelu dla analizowanej zlewni Potoku Służewieckiego, w pierwszej kolejności określano wartości parametrów mierzalnych – charakterystyki fizyczne i geometryczne obiektów, na podstawie danych pozyskanych z mapy zasadniczej, dokumentacji powykonawczych, istniejących opracowań oraz w wyniku pomiarów własnych w terenie. W drugiej kolejności identyfikowano parametry stanowiące współczynniki liczbowe równań, których wartości przyjmowano jako standardowe na podstawie informacji podanych w tablicach podręcznika do modelu [15]. Wprowadzone do modelu wartości niektórych parametrów były następnie optymalizowane (kalibrowane).

Dla każdej zlewni cząstkowej (1560 obiektów), którą wydzielono w modelu na obszarze analizowanej zlewni, określono wartości kilkunastu parametrów, wykorzystywanych do obliczania spływu wód deszczowych. Wielkość powierzchni tych obiektów (średnio wynosząca ok. 1,1 ha) została wyznaczona w SWMM w sposób automatyczny na podstawie danych georeferencyjnych dla mapy rastrowej badanej zlewni, którą zaimportowano do programu. Z kolei przybliżone wartości parametru *width* – szerokość warstwy spływu powierzchniowego, określono stosując się do zalecenia podanego w podręczniku [15], a mianowicie dzieląc powierzchnię zlewni cząstkowej przez średnią maksymalną długość drogi spływu w tej samej zlewni. Takie obliczenia przeprowadzono oddzielnie dla przyjętych 26. rodzajów użytkowania terenu (charakteryzujących się specyficzną wielkością udziału powierzchni nieprzepuszczalnych), wyznaczając wartości przedmiotowego parametru dla wybranych zlewni cząstkowych, reprezentujących określony rodzaj użytkowania (mających zbliżony kształt i rozmiar), a następnie uśredniając je. Ustalone w ten sposób, a następnie kalibrowane wartości parametru *width*, zmieniały się w szerokim zakresie od kilkunastu metrów dla jezdni do 200 m dla zlewni cząstkowych, użytkowanych jako grunty orne i lasy. Natomiast adekwat-

na wartość mediany wynosiła 100 m. Spadki terenu zlewni wyznaczono na podstawie numerycznego modelu terenu, jak i danych wysokościowych z mapy zasadniczej. Przeważnie średnie wartości nachylenia terenu wynosiły 0,5%. Inny parametr modelu – procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych % *Imperv*, oszacowano oddzielnie dla 26. rodzajów użytkowania terenu, wykorzystując w tym celu narzędzia programu ArcGIS (aplikacja firmy ESRI, wykorzystywana m.in. do analizowania danych geograficznych) aby ustalić strukturę użytkowania dla reprezentatywnych zlewni cząstkowych. W wyniku optymalizacji wartości tego parametru zostały później nieznacznie skorygowane. Kalibracja modelu obejmowała również kilka innych niżej wymienionych parametrów, których wartości nie zostały określone w wyniku ich pomiaru. Przyjęta w modelu wartość procentowego udziału powierzchni nieprzepuszczalnych bez retencji powierzchniowej % *Zero-Imperv* wynosiła 25%. Parametr CN dla wybranej w modelu metody SCS [16], obliczania infiltracji opadów z przepuszczalnych obszarów zlewni do gruntu, przeważnie miał wartość 74. Współczynnik szorstkości terenu do wzoru Manninga dla powierzchni nieprzepuszczalnych *N-Imperv* wynosił 0,013 s/m^{1/3}, a w odniesieniu do powierzchni przepuszczalnych najczęściej 0,13 s/m^{1/3}. Z kolei ustalona wysokość retencji terenowej wynosiła 1,3 mm (*Dstore-Imperv*) oraz 2,5÷5,0 mm (*Dstore-Perv*).

Odpływ wód opadowych ze zlewni cząstkowych obliczano poprzez uwzględnienie w modelu sieci kanałów i punktów węzłowych na kanałach, których lokalizacja odpowiada położeniu rzeczywistych obiektów na obszarze analizowanej zlewni. Dla przykładu, na rys. 2 przedstawiono system obiektów, które utworzono w modelu dla uwzględnienia procesów hydraulicznych i regulacji przepływów w Oczyszczalni Wód Deszczowych. Kolejnym krokiem było ustalenie zależności pomiędzy obiektami, które polegało na wskazaniu węzła kanalizacyjnego, do którego następuje spływ z określonej podzlewni. Dla utworzonych w modelu kanałów określono ich charakterystyki fizyczne (kształt, wymiary, jak i wysokość wyniesienia kanału nad dnem studzienki *Inlet/Outlet Offset*) oraz wartości parametrów wpływających na warunki przepływu wód (m.in. współczynniki szorstkości Manninga i strat energii na długości przewodu) na podstawie danych literaturowych [7,15,20]. Długości kanałów zostały wyznaczone w sposób automatyczny. W przypadku charakteryzowania węzłów określono m.in. rzędne dna studzienek *Invert EL* i ich głębokość względem terenu (zagłębienie) *Max Depth*. W modelu uwzględniono również występowanie klap zwrotnych na określonych kanałach i przepustów drogowych, poprzez zatwierdzenie odpowiednio parametrów *Flap Gate* i *Culvert Code*.



Rys. 2. System obiektów Oczyszczalni Wód Deszczowych w modelu SWMM. Objasnienia: przewody i węzły kanalizacyjne – linie i węzły w kolorze niebieskim; zasuw, przelewy, pompy – linie w kolorze szarym

Fig. 2. System of Rainwater Treatment Plant facilities in the SWMM model. Explanations: sewer pipes and nodes – blue lines and points; gate valves, weirs, pumps – grey lines

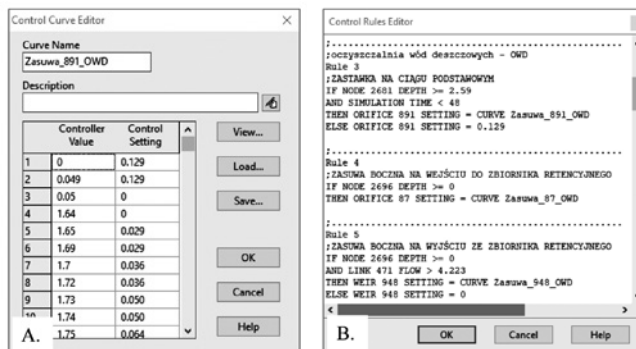
W celu określenia zakresu pracy pomp, które uwzględniono w modelu systemu hydraulicznego Lotniska, w oknie edytora obiektów podano poziomy wody, przy których następuje włączenie i wyłączenie pomp. Oprócz tego dla każdej pompy zdefiniowano ich charakterystyki, które

wyznaczają zależność pomiędzy poziomem wody w miejscu instalacji pompy a objętością przepompowywanej wody na sekundę (m³/s).

Na podstawie informacji zawartych w dokumentacjach powykonawczych, określono charakterystyki fizyczne i geometryczne dla utworzonych w modelu zbiorników retencyjnych, zasuw i przelewów. W odniesieniu do zbiorników ustalono rzędne ich dna, maksymalne wysokości i kształt zbiorników. Ostatni z wymienionych parametrów *Storage Shape* zidentyfikowano, poprzez podanie zależności między skrajnymi rzędnymi (dna i stropu) i wielkością powierzchni zbiornika. Natomiast dla zasuw i przelewów (modelowanych przy zastosowaniu obiektów *Orifice* i *Weir*) ustalono ich kształt i wymiary, położenie tych obiektów względem kierunku przepływu wody w kanałach (czołowe, boczne), w niektórych przypadkach również wysokość ich wyniesienia względem dna kanału lub zbiornika. Następnie przyjęto w modelu wartości współczynnika wydatku *Discharge Coeff.* dla tych urządzeń, przez które przeprowadzana jest woda, przyjmując je w oparciu o zalecenia w instrukcji do modelu [15].

W kolejnym etapie adaptacji modelu ustalono zasady działania zasuw, które w analizowanym systemie są wykorzystywane do regulacji przepływu wód opadowych w kolektorze i/lub sterowania procesami napełniania/oprózniania zbiorników ZR1, ZR2-3, ZR5 i osadnika deszczowego na terenie OWD. W odniesieniu do trzech zasuw, zlokalizowanych w kolektorze (komorach KRP1, KRP2, KRP3), podano w edytorze *Control Curve Editor* dla każdej z nich wysokości otwarcia zasuwę względem potencjalnego zakresu zmienności wartości strumienia przepływów, symulowanych w określonych kanałach. Natomiast dla kilku zasuw bocznych, które umożliwiają sterowanie napełnianiem/opróznianiem zbiornika ZR5 oraz przepływem wody (ścieków) przez ciąg technologiczny Oczyszczalni, ustalono we wspomnianym edytorze przebieg wysokości otwarcia zasuw w zależności od poziomów wody w określonych węzłach kanalizacyjnych lub zbiorniku. W przypadku każdej zasuwę wysokości jej otwarcia podano w postaci ułamkowej, której wartość określa w jakiej części następuje otwarcie (podniesienie) zasuwę, w stosunku do jej całkowitej wysokości. Przykład takiej „krzywej sterowania”, którą ustalono dla jednej z zasuw na terenie Oczyszczalni, zamieszczono na rys. 3A.

Aby aktywować w modelu SWMM utworzone przy zastosowaniu *Control Curve Editor* zasady działania zasuw (pomp), ale również podać dodatkowe warunki związane z ich działaniem, konieczne było wykorzystanie w tym celu edytora *Control Rules Editor*. Utworzono przy jego zastosowaniu 17. instrukcji (zasad), w oparciu o format ich tworenia opisany w podręczniku [15]. W tych instrukcjach podano m.in. wartości poziomu wody i/lub natężenia przepływu w węzłach/kanałach o wskazanym numerze, przy których następuje aktywacja określonej „krzywej sterowania” zasuwę lub pompy, ponadto jaki czas musi upłynąć od początku zdarzenia aby aktywować dane urządzenie. Dla przykładu, trzy instrukcje dla zasuw w analizowanym systemie kanalizacyjnym przedstawiono na rys. 3B.



Rys. 3. Przyjęte w modelu współczynniki otwarcia określonej zasuwę Control Setting względem różnych poziomów wody Controller Value (A) i przykładowe zasady sterowania zasuwami Control Rules (B).

Fig. 3. Adopted in the model coefficients of the opening of a specific gate valve relative to different water levels (A) and exemplary control rules for gate valves (B).

Do kalibracji i późniejszej weryfikacji modelu wykorzystano dane pomiarowe opad-odpływ, które pomierzono w badanej zlewni cząstkowej Potoku Służewieckiego. Wartości wysokości opadów deszczowych zostały zarejestrowane na posterunku opadowym, zlokalizowanym na obszarze Lotniska, natomiast przebieg w czasie stanów wody (przepływów) został pomierzony przez Katedrę Inżynierii Wodnej i Geologii Stosowanej SGGW w Warszawie, w przekroju wodowskazowym zamkającym badaną zlewnię (rys. 1). Sprawdzając poprawność modelu, porównywano przede wszystkim pomierzone i symulowane za pomocą modelu wartości przepływów maksymalnych i objętości wezbrań w przekroju wodowskazowym, w reakcji na pomierzone opady. Ocena stopnia zgodności wyników uzyskanych z oryginału i modelu dokonano za pomocą przyjętej miary – błędu względnego. Weryfikacja modelu, przeprowadzona na podstawie danych pomiarowych dla kilku zdarzeń opad-odpływ (nie wykorzystanych przy kalibracji modelu) wykazała, że średnie wartości błędu względnego, w odniesieniu do analizowanych parametrów wezbrań, wyniosły 11,0 i 14,7%, odpowiednio dla przepływów maksymalnych i objętości odpływu wód. Pozytywny wynik tej weryfikacji stanowił podstawę dla wykorzystania modelu do symulacji hydrodynamicznych przedstawionych w dalszej części tej pracy.

3. Wyniki i dyskusja

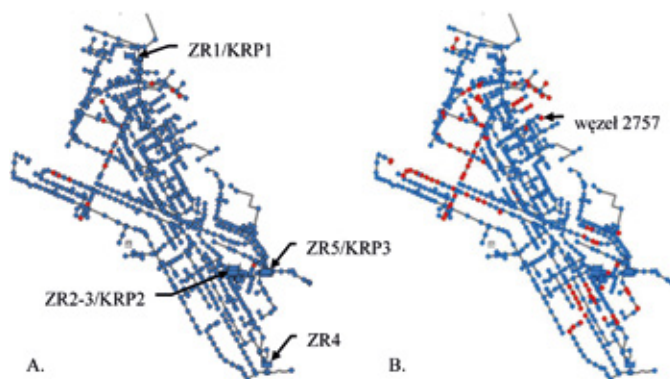
Model hydrodynamiczny SWMM, adaptowany dla analizowanej zlewni, wykorzystano do weryfikacji przepustowości hydraulicznej istniejącego systemu kanalizacji deszczowej na obszarze Lotniska Chopina i możliwości występowania wylań ze studzienek. W oddzielnych symulacjach zlewnię obciążono trzema opadami deszczu o następujących parametrach:

- jednostkowe natężenie opadu $q = 132 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$, czas trwania $t = 15$ min, wysokość opadu $P = 11,88$ mm; wartość natężenia odpowiada obliczonej wg formuły Błaszczyka [22] dla deszczu o częstotliwości występowania $C = 5$ (1 raz na 5 lat); opad o stałej w czasie intensywności,
- $q = 208 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$, $t = 15$ min, $C = 5$ lat, $P = 18,70$ mm; wartość natężenia odpowiada w przybliżeniu obliczonej wg formuły Bogdanowicz i Stachy [23]; opad o stałej w czasie intensywności.
- opad modelowy Eulera typ II, $q = 133 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$, $t = 30$ min, $C = 5$ lat, $P = 23,99$ mm; wyznaczony ze wzoru Bogdanowicz i Stachy; opad o zmiennej w czasie intensywności.

Podane powyżej opady deszczu przyjęto do przedmiotowych symulacji ze względu na to, że parametry pierwszego z nich przystają do miarodajnego opadu zastosowanego do wymiarowania kanalizacji deszczowej na obszarze Lotniska Chopina i obiektów na Oczyszczalni Wód Deszczowych (zgodnie z projektem wykonanym w latach 90.), natomiast drugi z wymienionych opadów został uwzględniony w aktualnym pozwoleniu wodnoprawnym (udzielonym w 2017 r. i obowiązującym do 2027 roku) na wprowadzanie wód opadowych z terenu Lotniska do Potoku Służewieckiego. Stosownie do tego pozwolenia wodnoprawnego, maksymalne natężenie przepływu wody w Potoku Służewieckim poniżej OWD, przy opadach deszczu o parametrach $C = 5$ i natężeniu jednostkowym $q = 208 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$, nie może przekroczyć $1,53 \text{ m}^3/\text{s}$. Trzecie zdarzenie z przyjętych do obliczeń jest opadem modelowym (syntetycznym) Eulera typ II, opracowanym w ramach tej pracy na podstawie wzoru Bogdanowicz i Stachy dla częstotliwości $C = 5$ lat i $t = 30$ min (czas trwania przyjęto dwukrotnie większy niż dla pozostałych opadów), którego zmienna w czasie intensywność z założenia odpowiada rzeczywistemu przebiegowi typowego deszczu – maksymalna intensywność wynosi $142,42 \text{ mm/h}$ w 10. minucie czasu trwania opadu. Metodę opracowywania takiego opadu modelowego podano w pracy [6].

W wyniku przeprowadzonych symulacji, na podstawie modelu SWMM dla przyjętych opadów deszczowych uzyskano dane o zmienności wysokości piętrzenia (poziomów) wody w węzłach obliczeniowych i wypełnienia wodami opadowymi kanałów w czasie trwania zdarzeń opad-odpływ. Należy nadmienić, że symulacje uwzględniały również spływ wód opadowych z powierzchni przepuszczalnych (nieuszczelnio-

nych). Ma to istotne znaczenie dla prawidłowej oceny przepustowości systemu kanalizacyjnego, szczególnie przy obciążeniu zlewni opadami o dużym natężeniu. Analizy wykazały, że niektóre kanały deszczowe na obszarze Lotniska nie mają wystarczającej przepustowości hydraulicznej, co powoduje miejscowe nadciężenia wód opadowych do poziomu terenu i wylania w węzłach. Lokalizację węzłów (studzienek kanalizacyjnych), w których symulowano wylewy wód na powierzchnię terenu, pokazano na rys. 4 (węzły – punkty oznaczone kolorem czerwonym). W przypadku obciążenia zlewni opadem o natężeniu $132 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ (wyznaczonym wg formuły Błaszczyka) – zdarzenie o parametrach $C = 5$ lat i $t = 15$ min, odnotowano wylewy wód w kilkunastu węzłach, zlokalizowanych głównie w górnej części Lotniska. Natomiast symulując działanie sieci kanalizacyjnej dla opadu modelowego Eulera typ II (wyznaczonego wg formuły Bogdanowicz i Stachy) – zdarzenie o parametrach $C = 5$ lat i $t = 30$ min, wylania występują w większej liczbie węzłów obliczeniowych usytuowanych zarówno w górnej, jak i dolnej części obszaru Lotniska. Należy nadmienić, że czas trwania tych wylań jest relatywnie krótki. Po zmniejszeniu się wypełnienia kanałów, zgromadzone tymczasowo na poziomie terenu wody opadowe ponownie wpływają do sieci kanalizacyjnej. Opracowany model umożliwia oszacowanie objętości wód, które podczas trwania opadu wypłynęły na powierzchnię terenu poprzez określony węzeł kanalizacyjny. Dla przykładu, objętość wylania w węźle nr 2757 (jego lokalizację ilustruje rys. 4.B.) wynosi ok. 28 m^3 , a czas jego trwania 6 minut.



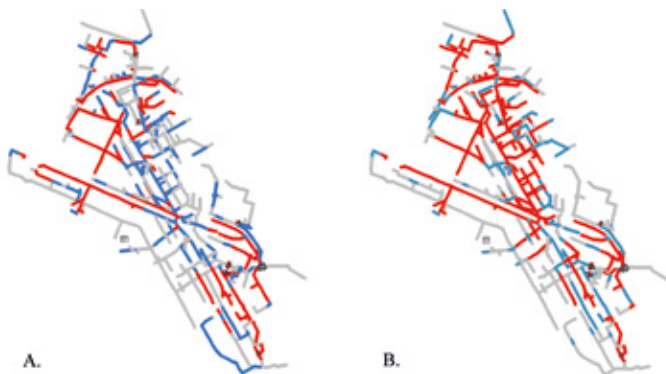
Rys. 4. Lokalizacja węzłów (studzienek) na obszarze Lotniska w których symulowano wylania wód – punkty w kolorze czerwonym (brak wylania – punkty niebieskie), przy opadzie o natężeniu $132 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ (A.) i opadzie modelowym Eulera (B.). Objaśnienia: ZR – zbiorniki retencyjne, KRP – komory regulacji przepływów (zasuwki)

Fig. 4. Location of nodes (manholes) at the Airport area where water overflows were simulated – red points (no overflows – blue points) under the rainfall with an intensity of $132 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ (A.) and Eulerian model rainfall (B.). Explanations: ZR – retention tanks; KRP – flow regulation chambers (gate valves)

Sieć kanałów w modelu wraz ze względnymi wypełnieniami H/D (określającymi stosunek maksymalnego napęlenia kanałów H do średnicy D) w krytycznym czasie trwania opadu o natężeniu $208 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ i opadu modelowego Eulera typ II (odpowiednio zdarzenia opadowe o stałej i zmiennej w czasie intensywności) przedstawiono adekwatnie na rys. 5.A. i 5.B. Jak widać z rysunków, na obszarze Lotniska Chopina występują odcinki kanałów, które pracują pod ciśnieniem – oznaczone liniami w kolorze czerwonym ($H/D \geq 1,00$). Natomiast przy obciążeniu zlewni opadem o natężeniu $132 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ dla większości kanałów wypełnienia nie przekraczają 75% ich wysokości całkowitej (wynik tych symulacji nie został pokazany w postaci rysunku). Najbardziej niekorzystny stan systemu kanalizacyjnego na obszarze Lotniska uzyskano przy obciążeniu zlewni opadem modelowym Eulera.

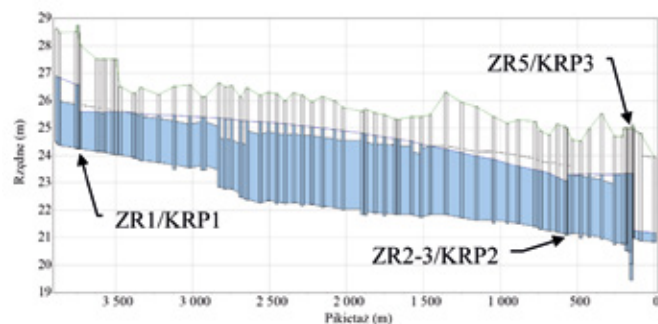
Model SWMM posłużył również do utworzenia profili podłużnych kanałów wraz z przebiegiem poziomów wody (wypełnieniami) w czasie trwania zdarzeń, w reakcji na zadane opady deszczowe. Taki przykładowy profil kanału zlokalizowanego na całej długości Lotniska (Potoku Służewieckiego, który na tym odcinku ma charakter kanału zamkniętego),

uzyskany w symulacjach dla opadu modelowego Eulera w krytycznym czasie trwania zdarzenia (33. minuta), przedstawiono na rys. 6. Jak widać z tego rysunku, przeważająca część kolektora pracuje pod ciśnieniem, ale nadpiętrzenia są wynikiem regulacji (dławienia) przepływów za pomocą zasuw w komorach KRP1, KRP2 i KRP3, aby przepływ poniżej Lotniska nie przekroczył wartości 1,53 m³/s. Natomiast kanał na odcinku poniżej Oczyszczalni Wód Deszczowych (komory regulacji przepływów KRP3 i zbiornika ZR5) pracuje ze swobodnym zwierciadłem wody.



Rys. 5. Przepustowość kanałów deszczowych na obszarze Lotniska symulowana przy opadzie o natężeniu 208 dm³/s·ha (A.) i opadzie modelowym Eulera (B.) – kanały w kolorach niebieskim i czerwonym oznaczają odpowiednie względne wypełnienia 0,75 < H/D < 1,00 i H/D ≥ 1,00.

Fig. 5. The capacity of stormwater sewer pipes at the Airport area simulated under the rainfall with an intensity of 208 dm³/s·ha (A.) and Eulerian model rainfall (B.) – sewer pipes in blue and red colours indicate relative fill levels of 0.75 < H/D < 1.00 and H/D ≥ 1.00.



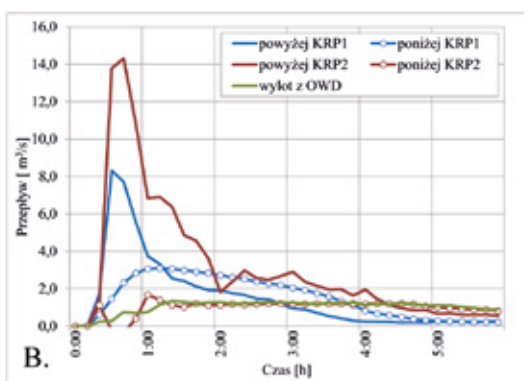
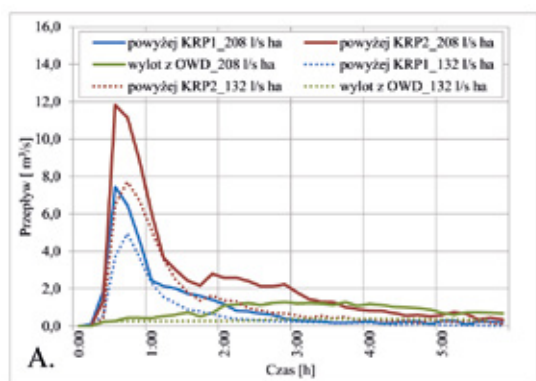
Rys. 6. Profil kolektora deszczowego wraz z symulowanym poziomem wody w krytycznym czasie trwania zdarzenia przy opadzie modelowym Eulera. Objasnienia symboli jak na rys. 4.

W wyniku modelowania hydrodynamicznego systemu kanalizacyjnego na obszarze Lotniska uzyskano informacje o zmienności strumienia przepływów w kanałach i poziomów wody w węzłach (studzienkach, zbiornikach). Przykładowe wykresy, obrazujące przepływy wó w wybranych charakterystycznych punktach systemu (powyżej/poniżej komór regulacji przepływów i Oczyszczalni), w czasie trwania zdarzeń wywo-

lanych opadami o natężeniu 132 i 208 dm³/s·ha oraz opadem modelowym Eulera, przedstawiono odpowiednio na rys. 7.A. i 7.B. (zawierają one dane jedynie dla czasu 6. godzin od początku zdarzeń, aby uzyskać różne między wykresów). Jak widać z obydwu rysunków, istnieją duże różnice pomiędzy parametrami wezbrań (wartościami przepływów maksymalnych i objętości), które symulowano przy zadanych trzech opadach o różnych parametrach. Z kolei jak pokazano na rys. 7.B., uzyskane w modelu maksymalne strumienie przepływów są znacznie większe powyżej komór regulacji przepływów KRP1 i KRP2, niż poniżej tych obiektów, w których znajdują się zasowy. W analizowanym systemie te zasowy są wykorzystywane do sterowania napełnianiem wodami opadowymi i opróżnianiem zbiorników ZR1 oraz ZR2-3. Szczególnie duży wpływ na redukcję przepływów w kolektorze mają zbiorniki ZR2 i ZR3, o łącznej pojemności 26 750 m³, zlokalizowane przy komorze KRP2. Obliczenia w modelu SWMM przy uwzględnieniu opadu modelowego Eulera wykazały, że wartości maksymalnego natężenia przepływu wód powyżej i poniżej komory KRP2 wyniosły odpowiednio 11,821 i 1,965 m³/s, co oznacza redukcję przepływów o 83,4%. Natomiast maksymalny przepływ na wylocie z Oczyszczalni Wód Deszczowych (poniżej zbiornika ZR5 i osadnika, zlokalizowanych przy komorze KRP3) wyniósł 1,277 m³/s. Zatem był on mniejszy niż wartość przepływu granicznego w Potoku Służewieckim poniżej OWD równa 1,53 m³/s, która wynika z warunków podanych w aktualnym pozwoleniu wodnoprawnym.

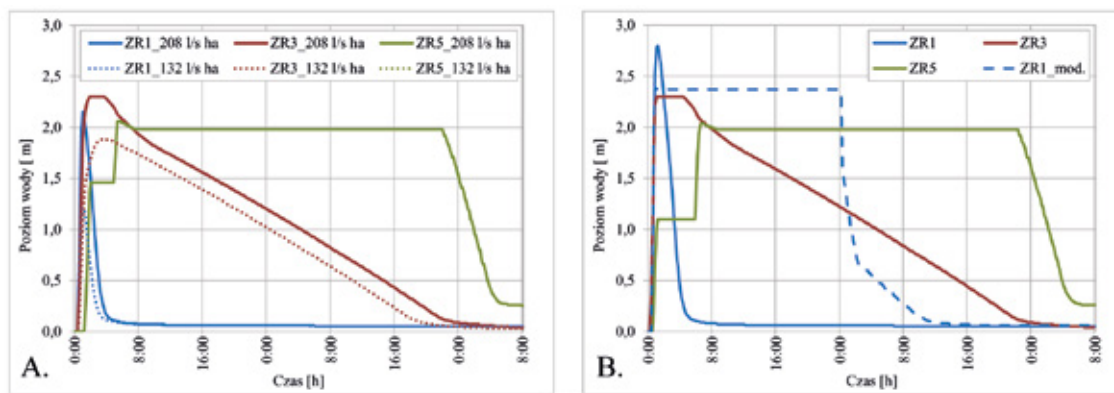
Uzyskane, w wyniku modelowania, przykładowe dane o zmienności poziomów wody w czasie trwania zdarzeń dla kilku wybranych zbiorników, w reakcji na trzy zadane opady o różnych parametrach, zilustrowano na rys. 8.A. i 8.B. Jak wynika z rysunków, przebieg w czasie poziomów wód w zbiornikach (napełniania i opróżniania zbiorników) jest różny, w zależności od przyjętego do symulacji opadu. Dla przykładu, w symulacjach dla opadu o natężeniu 132 dm³/s·ha zbiornik ZR5 (najniższej położony w analizowanym systemie kanalizacyjnym) nie został napełniony wodami opadowymi, ze względu na relatywnie niski poziom wody w komorze KRP3 (zasowy boczne w zbiorniku nie zostały otwarte), natomiast przy opadzie o natężeniu 208 dm³/s·ha i opadzie modelowym Eulera, zbiornik napełnił się do ustalonej w modelu wysokości równej 2,0 m. W przypadku wymienionych dwóch ostatnich opadów, czas retencji wód w zbiorniku ZR5 wyniósł ok. 53 godziny. Wypływ ze zbiornika do kanału przed Oczyszczalnią rozpoczął się w czasie, gdy poziom wody w komorze KRP3 (jednocześnie w Potoku Służewieckim poniżej Oczyszczalni) zmniejszył się do wartości poniżej 0,15 m, co zostało ustalone w modelu poprzez odpowiednią instrukcję w edytorze Control Rules Editor.

Na rys. 8 widać również, że czas retencji wód w zbiorniku ZR1 (najwyższej położony w systemie; gromadzi częściowo wody dopływające z miasta do obszaru Lotniska) jest krótki i wynosi ok. 6 godzin (ze względów technologicznych w zbiorniku pozostaje warstwa wody o wysokości 0,05 m). Odbijający się samoczynnie szybki odpływ wód z tego zbiornika, który wynika ze stałego utrzymywania przepływu w komorze KRP1, powoduje podnoszenie się poziomu wód retencionowanych w dolnej części systemu kanalizacyjnego Lotniska. Mając to na względzie, dla przykładu przeprowadzono symulacje przy uwzględnieniu modyfikacji komory regulacji przepływów KRP1, która polegała na utworzeniu w mo-



Rys. 7. Hydrogramy przepływów symulowane przy opadach o natężeniu 132 i 208 dm³/s·ha (A.) oraz opadzie modelowym Eulera (B.). Objasnienia symboli jak na rys. 1 i 4

Fig. 7. Hydrographs of flows simulated under the rainfall with an intensities of 132 and 208 dm³/s·ha (A.) and Eulerian model rainfall (B.). Explanations of symbols as in fig. 1 and 4



Rys. 8. Poziom wody w zbiornikach symulowany przy opadach o natężeniu 132 i 208 $\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ (A) oraz opadzie modelowym Eulera (B); czas trwania symulacji 56 godz. Oznaczenia symboli jak na rys. 4.

Fig. 8. Water level in the tanks simulated under the rainfall with an intensities of 132 and 208 $\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ (A) and Eulerian model rainfall (B); simulation duration 56 hours. Explanations of symbols as in fig. 4.

delu drugiej zasuwy w tej komorze nad przelewem bocznym kierującym wody do kanału łączącego kolektor ze zbiornikiem ZR1. Zasady działania dodatkowej zasuwy zostały zdefiniowane w modelu poprzez edytor *Control Rules Editor*. Przyjęto, że przedmiotowa zasuwa jest otwarta na początku opadu, a zamyka się w czasie trwania zdarzenia gdy zbiornik ZR1 napelni się wodami opadowymi do poziomu maksymalnego – 2,35 m powyżej dna zbiornika. Ponowne otwarcie zasuwy nastąpi, gdy poziom wody w kolektorze na odcinku za komorą KRPI zmniejszy się do wartości poniżej 0,1 m i jednocześnie nie wcześniej niż przed upływem 24. godzin. Modelowany przebieg napełniania i opróżniania zbiornika ZR1 przy uwzględnieniu opisanej modyfikacji komory KRPI, w reakcji na opad modelowy Eulera, przedstawiono na rys. 8.B (linia przerywana oznaczona symbolem ZR1_mod.).

4. Wnioski

Przeprowadzone modelowanie hydrodynamiczne systemu kanalizacyjnego, na obszarze Lotniska Chopina w Warszawie, pozwala na sformułowanie następujących wniosków.

- Program SWMM stanowi kompleksowe narzędzie, które umożliwia symulowanie zmiennych w czasie i przestrzeni rzeczywistych wielkości spływu wód opadowych na obszarze odwadnianej zlewni, strumieni przepływów i poziomów wody w kanałach/studzienkach, a przede wszystkim weryfikację przepustowości hydraulicznej i stanów przeciążenia (częstości występowania nadpiętrzeń i wylewów w węzłach) sieci kanalizacyjnej, przy zadanych opadach deszczu. SWMM, umożliwia modelowanie dużych systemów kanalizacyjnych o złożonej strukturze, w których występują obiekty (urządzenia) przeznaczone do retencji i regulacji przepływu wód (ścieków), takie jak zbiorniki, zasuwy, przelewy, pompy itd.
- Na przykładzie analizowanej w tej pracy zlewni wykazano, że weryfikacja sprawności hydraulicznej kanalizacji deszczowej, zwymiarowanej tzw. metodami czasu przepływu, na podstawie modelu hydrodynamicznego jest uzasadniona. W wyniku symulacji modelem SWMM stwierdzono, że niektóre kanały deszczowe na obszarze Lotniska nie mają wystarczającej przepustowości hydraulicznej, co powoduje miejscowe nadpiętrzenia wód opadowych do poziomu terenu i wylania w węzłach przy obciążeniu zlewni przyjętymi opadami deszczu – opadami o natężeniach 132 i 208 $\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ (wyznaczonymi odpowiednio wg formuły Błaszczyka oraz Bogdanowicz i Stachy; zdarzenia o parametrach $t = 15$ min, $C = 5$ lat) oraz opadem modelowym Eulera typ II ($t = 30$ min, $C = 5$ lat). Najbardziej niekorzystny stan systemu uzyskano w reakcji na opad modelowy Eulera, co uzasadnia potrzebę uwzględniania przy weryfikacji systemów kanalizacyjnych tego typu opadów o zmiennej w czasie intensywności.
- Regulacja przepływu wód za pomocą zasuw i retencionowanie wód opadowych w zbiornikach umożliwiając uzyskanie dużej redukcji przepływów w kolektorze deszczowym na obszarze Lotniska i Potoku Służewieckim w przekroju na odpływie z Oczyszczalni Wód Deszczowych.

LITERATURA

- [1] Barszcz Mariusz. 2015. „Zastosowanie modelu SWMM do prognozy przepływów prawdopodobnych w zlewni miejskiej”. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 24 (3), 69: 209-223.
- [2] Barszcz Mariusz. 2016. „Wpływ wybranych parametrów obliczeniowych na błąd symulacji przepływów i parametry modelu Nasha w zlewni miejskiej”. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 72: 142-155.
- [3] Barszcz Mariusz. 2017. „Zastosowanie modelu SWMM do obliczenia przepływów i ich redukcji przez zbiorniki na obszarze lotniska Chopina”. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura* 16 (1): 79-91.
- [4] Bisht Deepak Singh, Chatterjee Chandranath, Kalakoti Shivani, Upadhyay Pawan, Sahoo Manaswinee, Panda Ambarnil. 2016. “Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study”. *Natural Hazards* 84: 749-776.
- [5] Ciepeliowski Andrzej, Dąbkowski Szczepan Ludwik. 2006. „Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami)”. *Oficyna Wyd. Projprzem-EKO*: 311.
- [6] Kotowski Andrzej. 2011. „Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów”. *Wydawnictwo Seidel-Przywecki*: 528.
- [7] Kotowski Andrzej. 2015. „Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Sieci kanalizacyjne” (Tom I). *Wydawnictwo Seidel-Przywecki*: 399.
- [8] Kotowski Andrzej, Kaźmierczak Bartosz, Wartalski Andrzej, Cieślak Witold. 2013. „Modelowanie hydrodynamiczne kanalizacji deszczowej na osiedlu Rakowiec we Wrocławiu”. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 03: 113-119.
- [9] Kowalska Beata, Kowalski Dariusz, Lagód Grzegorz, Widomski Marcin. 2013. „Modelling of Hydraulics and Pollutants Transport in Sewer Systems. With Exemplary Calculations in SWMM”. *Monografie – Politechnika Lubelska*: 131.
- [10] Licznar Paweł. 2008. „Obliczenie częstotliwości nadpiętrzenia sieci kanalizacji deszczowej”. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 07-08: 16-21.
- [11] Nowakowska Monika, Kaźmierczak Bartosz, Wartalska Katarzyna, Kotowski Andrzej. 2017. „Budowa modelu hydrodynamicznego skanalizowanej zlewni deszczowej we Wrocławiu”. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 04: 189-195.
- [12] Ozga-Zielińska Maria, Brzeziński Jerzy. 1997. „Hydrologia stosowana”. *Wydawnictwo Naukowe PWN*: 323.
- [13] PN-EN 752:2008. “Drain and sewer systems outside buildings (Zewnętrzne systemy kanalizacyjne)”. PKN, 2008.
- [14] PN-EN 752:2017. „Drain and sewer systems outside buildings – Sewer systems management (Zewnętrzne systemy odwadniające i kanalizacyjne – Zarządzanie systemem kanalizacyjnym)”. PKN, 2017.
- [15] Rossman Lewis, Simon Michelle. 2022. Storm Water Management Model. User’s Manual Version 5.2. Center for Environmental Solutions and Emergency Response, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati (OH).
- [16] SCS (Soil Conservation Service). 1986. “Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55”. *The U. S. Department of Agriculture (USDA)*: 164.
- [17] Skotnicki Marcin, Sowiński Marek. 2015. „Dokładność odwzorowania struktury systemu kanalizacji deszczowej na potrzeby modelowania odpływu ze zlewni miejskiej”. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 11: 393-397.
- [18] Szymkiewicz Romuald. 2000. „Modelowanie matematyczne przepływów w rzece i kanałach”. *Wydawnictwo Naukowe PWN*: 321.
- [19] U.S. Environmental Protection Agency, Storm Water Management Model (SWMM), <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.
- [20] Zawilski Marek, Sakson Grażyna. 2010. „Modelowanie spływu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. Część I. Kalibracja modelu”. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 11: 32-36.
- [21] Zawilski Marek, Sakson Grażyna. 2011. „Modelowanie spływu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. Część II. Weryfikacja modelu”. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 09: 321-32.
- [22] Błaszczyk Wacław, Stamatello Henryk, Błaszczyk Paweł. 1983. „Kanalizacja”. *Wydawnictwo Arkady*.
- [23] Bogdanowicz Ewa, Stachy Juliusz. 1998. „Maksymalne opady deszczu w Polsce – charakterystyki projektowe”. *Materiały badawcze IMGW. Seria Hydrologia i Oceanologia* 23: 85.