



Analiza wysokości opadów maksymalnych z modelu PMAOTP i ich zastosowanie do weryfikacji działania miejskiego systemu odwodnienia

Analysis of maximum rainfall amounts from the PMAOTP model, and their application in verifying the performance of an urban drainage system

Mariusz Paweł Barszcz  Ewa Kaznowska  Michał Wasilewicz 

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Instytut Inżynierii Środowiska

ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

mariusz_barszcz@sggw.edu.pl (autor korespondencyjny) • ewa_kaznowska@sggw.edu.pl •

michal_wasilewicz@sggw.edu.pl

Zarys treści. Prawidłowe wyznaczenie wielkości opadu deszczowego na obszarze zlewni, w kontekście czasu jego trwania i prawdopodobieństwa przewyższenia, stanowi podstawę projektowania, weryfikacji i eksploatacji systemów odwodnieniowych (kanalizacyjnych) w miastach. Opracowanie i wdrożenie przez IMGW-PIB w 2022 r. modeli opadowych PMAOTP, obejmujących swoim zasięgiem całą Polskę, umożliwi bezpłatny dostęp do aktualnych i wiarygodnych informacji o lokalnych wysokościach (natężeniach) opadów maksymalnych. W pracy przedstawiono wyniki analiz, które obejmowały porównanie wysokości opadów o określonych charakterystykach (czasach trwania w zakresie 5-4320 min oraz prawdopodobieństwach 2-50%), wyznaczonych z modelu PMAOTP dla stacji meteorologicznej Warszawa-Bielany, względem korespondujących wielkości z tradycyjnie dotychczas stosowanych modeli Błaszczyka i Bogdanowicz-Stachy. Przeprowadzone analizy obejmowały również weryfikację przestrzennej zmienności opadów z modeli PMAOTP oraz działania systemu kanalizacji deszczowej na obszarze Lotniska Chopina. Stwierdzono m.in., że aktualne wysokości (kwantyle) opadów z modelu PMAOTP charakteryzują się przeważnie niższymi wartościami w porównaniu do adekwatnych danych z historycznego modelu Bogdanowicz-Stachy. Wskazano na znaczące różnice w wielkościach opadów z modeli PMAOTP dla stacji pomiarowych Warszawa-Bielany i Świder oddalonych od siebie o ok. 27 km. W wyniku hydrodynamicznych symulacji w modelu SWMM ustalono, że przyjęte modele opadowe mają znaczący wpływ na wartości przepływu wód w badanej zlewni. Uzyskano informacje o występowaniu przeciążeń dla określonych kanałów deszczowych i wylewów na obszarze Lotniska Chopina.

Słowa kluczowe: model opadowy PMAOTP, model Bogdanowicz-Stachy, model Błaszczyka, opad maksymalny, model hydrodynamiczny SWMM, kanalizacja deszczowa.

Keywords: *PMAOTP rainfall model, Bogdanowicz-Stachy model, Błaszczyk model, maximum rainfall, SWMM hydrodynamic model, stormwater sewer system.*

Wstęp

Poprawne oszacowanie charakterystyk opadów maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia jest kluczowe w wielu dziedzinach inżynierii i gospodarki wodnej, w tym dla projektowania obiektów i urządzeń służących odwod-

nieniom terenów, do których należą przede wszystkim systemy kanalizacyjne na obszarach zurbanizowanych (deszczowe i ogólnospławne), obejmujące odwodnienia dachów, ulic, dróg i parkingów, pasów startowych lotnisk oraz przepompownie i inne urządzenia odprowadzające lub gromadzące nadmiar wód opadowych (Ozga-Zieliński, 2022). Do ich wyznaczenia niezbędne są wyniki pomiarów wysokości opadów z odpowiednio długiego okresu czasu – co najmniej 30 lat. W większości przypadków na określonym obszarze zlewni lub w jego sąsiedztwie (w promieniu np. 50 km) brak jest dostępu do wieloletnich rejestracji opadów. Nawet jeśli dostęp do takich danych istnieje, to opracowanie na ich podstawie modeli opadowych jest czasochłonne (Wawrzyniak i Wdowikowski, 2023).

Znajomość oszacowanych wysokości (natężenia jednostkowego) opadów o określonych charakterystykach jest również istotna przy weryfikacji nowo projektowanych lub modernizowanych istniejących systemów kanalizacyjnych na podstawie modeli hydrodynamicznych, która może obejmować obliczenia sprawdzające maksymalną przepustowość kanałów czy możliwość występowania stanów ich przeciążenia (w tym wylania wód na powierzchnię terenu). Przeprowadzanie takiej weryfikacji zaleca się dla złożonych i/lub dużych systemów kanalizacyjnych o powierzchni większej od 2 km², w szczególności tam, gdzie mogą wystąpić znaczne szkody bądź też zagrożenia (Kotowski, 2011). Wartości prawdopodobieństwa (częstości) opadów deszczowych, które zaleca się przyjmować dla projektowania i weryfikacji działania systemów kanalizacyjnych (częstości wylewów z kanałów i podtopień) na obszarze Polski, podane są w najnowszej normie europejskiej z 2017 r. – PN-EN 752:2017.

W analizach hydrodynamicznych do zarządzania wodami opadowymi i eksploatacji miejskich systemów odwodnienia szczególnie wymagane są dane opadowe o dużej rozdzielczości przestrzennej i czasowej. Berne et al. (2004) wykazali, że do prawidłowego zasilania modeli symulacyjnych w zlewniach miejskich niezbędne są dane opadowe o rozdzielczości przestrzennej 2-3 km.

Zgodnie z przedstawionymi powyżej informacjami znajomość dokładnych wielkości opadów i ich rozkładu na obszarze zlewni jest priorytetowe w modelowaniu systemów odwodnieniowych na terenach miejskich. Najczęściej do zasilania modeli hydrologicznych i hydrodynamicznych wykorzystuje się istniejące modele opadów. Opracowanie i wdrożenie przez IMGW-PIB w 2022 r. modeli opadowych PMAOTP, obejmujących swoim zasięgiem całą Polskę, umożliwia bezpłatny dostęp do aktualnych i wiarygodnych informacji o lokalnych wysokościach (natężeniach jednostkowych) opadów maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analiz wielkości opadów wyznaczonych na podstawie najnowszego modelu opadowego (PMAOTP) dostępnego na dedykowanej platformie internetowej IMGW-PIB. Analizy obejmowały porównanie wysokości opadów o określonych charakterystykach (czasach trwania w zakresie od 5 do 4320 min oraz prawdopodobieństwach od 2 do 50%), wyznaczonych z modelu PMAOTP dla stacji meteorologicznej Warszawa-Bielany, względem korespondujących wielkości z dotychczas stosowanych (historycznych już) modeli Błaszczyka i Bogdanowicz-Stachy. Przeprowadzone analizy obejmowały również weryfikację przestrzennej zmienności opadów z modeli PMAOTP na obszarze badanej zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie oraz między wybranymi stacjami meteorologicznymi (punktami pomiarowymi). Przedstawione wyniki analiz służą upowszechnieniu w środowisku naukowym i projektantów informacji o mo-

delu PMAOTP, który umoŹliwia oszacowanie wielkoŹci opadów miarodajnych do projektowania i modelowania działania systemów odwodnieniowych.

W pracy zaprezentowano takŹe wyniki weryfikacji niezawodnoŹci działania systemu kanalizacji deszczowej na obszarze Lotniska Chopina w Warszawie (w tym występowania stanów przecięŹenia kanałów i wylewów z kanalizacji), przeprowadzonej w oparciu o model hydrodynamiczny Storm Water Management Model (SWMM), przy obcięŹeniu zlewni opadami deszczowymi wyznaczonymi na podstawie rozpatrywanych modeli opadowych.

Metody

Historyczne modele opadowe BłaŹczyka i Bogdanowicz-Stachy

Model fizyczny BłaŹczyka, opracowany w 1954 r. (BłaŹczyk et al., 1983), oparty zoŹtał na analizie statystycznej zbioru kilkudziesięciu intensywnych deszczy o ograniczonym do kilku godzin czasie trwania, zarejestrowanych na obszarze Warszawy w latach 1837-1891 i 1914-1925. Opis tego modelu, w przeszłoŹci powszechnie stosowanego w Polsce do projektowania kanalizacji, moŹna znaleŹć np. w pracach Węglarczyka (2013) i Licznara et al. (2018).

Jak podaje Kotowski (2011), powołujuć się na wyniki licznych analiz róznych badaczy, model BłaŹczyka znacznie zaniŹa wyniki obliczeń natęŹeń jednostkowych deszczy, takŹe w porównaniu do stosowanego w Niemczech modelu Reinholda. Z załoŹenia dotyczy opadów o czasie trwania do ok. 3 godzin. Wyznaczone na tej podstawie parametry kanałów deszczowych sã obecnie częŹto niedoszacowane (kanały mają zbyt małą przepustowoŹć z uwagi na zaniŹone średnice projektowe), co prowadzi do zwiększenia częŹtoŹci wylewów z kanalizacji. Dalsze stosowanie modelu BłaŹczyka jako standardu wpływa na zmniejszenie bezpieczeŹstwa projektowanych i modernizowanych systemów odwodnienia w Polsce (Licznar i Zalewski, 2020).

Pomimo negatywnych opinii ze strony specjalistów formuła opracowana przez BłaŹczyka jest niekiedy nadal stosowana w praktyce inŹynierskiej. Mając to na względie w pracy przeprowadzono weryfikację parametrów opadów obliczanych z modelu BłaŹczyka przez ich odniesienie do wartoŹci współczesnych opadów wyznaczanych na podstawie modelu PMAOTP.

Model fizyczny BłaŹczyka jest częŹto zastępowany regionalnym modelem probabilistycznym, opracowanym przez Bogdanowicz i Stachy'ego (1998) na podstawie danych opadowych z okresu 1960-1990, z 20 stacji meteorologicznych IMGW zlokalizowanych na obszarze Polski. Wyszukiwanie opadów maksymalnych z tego okresu prowadzono z wykorzystaniem metody maksimów rocznych AMP (ang. *Annual Maximum Precipitation*) – niezalecanej obecnie dla tworzenia modeli opadów do wymiarowania czy modelowania odwodnień terenów. Model ten pozwala wyznaczać podstawowã charakterystykę projektowã opadów – maksymalnã wydajnoŹć (wysokoŹć) w zadanym czasie i o okreŹonym prawdopodobieŹństwie przewyŹszenia – na terenie Polski, jednak bez obszarów podgórskich i górskich, Sudetów i Karpat (Ozga-ZieliŹski, 2022). Szczegółowy opis modelu Bogdanowicz-Stachy moŹna znaleŹć m.in. w pracach Ciepiewskiego i Dąbkowskiego (2006) oraz Licznara i Zaleskiego (2020). Według Kotowskiego (2011) dla deszczy o częŹtoŹciach występowania $C=2,5$ roku (raz na 2,5 roku) i $C=10$ lat oraz czasie trwania do 3 godzin, z omawianego modelu probabilistycznego w regionie centralnym otrzymuje się średnio

o ok. 50% większe natężenia jednostkowe deszczy względem obliczanych z modelu Błaszczyka (oraz o ok. 15% większe względem modelu Reinholda). Z kolei dla $C=1$ rok model ten około dwukrotnie zaniża obliczane natężenia deszczów względem wzoru Błaszczyka (co jest m.in. następstwem zastosowania metody AMP do selekcji danych wyjściowych).

Aktualne modele opadowe PMAXTP

PMAXTP – ang. *Precipitation MAXimum Time (duration) Probability* – to modele probabilistyczne opadów maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia, opracowane przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB). Bezpłatna aplikacja PMAXTP w postaci interaktywnej mapy Polski, dostępna od 2022 r. na stronie internetowej IMiGW (PMAXTP, 2022), umożliwia uzyskanie informacji o aktualnych charakterystykach opadów w dowolnych punktach na obszarze Polski. Do opracowania modeli wykorzystano przygotowaną w IMGW-PIB cyfrową bazę danych opadowych o wysokiej rozdzielczości dla stu deszczomierzy z okresu 30 lat: 1986-2015.

Na podstawie tej samej bazy danych opracowano również Polski Atlas Natężeń Deszczów (PANDa), który stanowi internetową platformę zawierającą informacje o natężeniach deszczów miarodajnych dla wszystkich miast w Polsce. Atlas w formacie cyfrowym zawiera katalog blisko 13 tys. lokalnych modeli opadowych, opracowanych dla każdego oczka (o rozdzielczości 5 km) regularnej siatki podziału obszaru Polski (Licznar i Zalewski, 2020).

W oparciu o opracowaną cyfrową bazę danych opadowych estymowano lokalne modele probabilistyczne PMAXTP (będące dopasowanymi rozkładami teoretycznymi prawdopodobieństwa) dla każdego punktu pomiarowego – stu analizowanych deszczomierzy na obszarze Polski. Dla przyjętych rozkładów prawdopodobieństwa opadów maksymalnych określone zostały również przedziały błędów oszacowania kwantyla (wysokości) opadu, który wynika nie tylko z niepewności związanej z warsztatem statystycznego przetwarzania danych opadowych, ale w dużej mierze z naturalnej zmienności lokalnych warunków środowiskowych. Następnie, posługując się metodami geostatystycznymi (krigingu resztowego, dostępnego w oprogramowaniu GIS), na podstawie danych dla każdego punktu pomiarowego przeprowadzono interpolację modeli opadowych między punktami pomiarowymi (Ozga-Zieliński, 2022). Wynikami modelu PMAXTP są wartości kwantyli maksymalnych opadów $P_{\max}(t, p)$ o określonym czasie trwania t (pośród 16 czasów w zakresie od 5 do 4320 min) i określonym prawdopodobieństwie przewyższenia p (użytkownik ma do wyboru 27 prawdopodobieństw w zakresie od 99,9 do 0,01%) w dowolnych punktach na obszarze kraju, jak i wartości wysokości opadów dla górnego ograniczenia przedziału ufności.

W procesie opracowywania danych dla modeli PMAXTP wyszukiwanie maksymalnych wysokości opadów przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch metod: metody maksimum rocznych AMP (ang. *Annual Maximum Precipitation*) i metody przewyższeń POT (ang. *Peak Over Threshold*). Obie metody (AMP i POT) nie mogą być jednak uznane za równorzędne, dają bowiem znacznie różniące się wartości kwantyli (wysokości opadów) zwłaszcza dla prawdopodobieństw bliskich jedności ($p=99,9\%$, $C=1$ rok), niezależnie od czasu ich trwania (Kotowski et al., 2010). W efekcie stosowania metody POT uzyskuje się zbiór znacznie wyższych wartości (wysokości/natężeń jednostkowych) opadów maksymalnych w porównaniu do metody AMP (Licznar i Zalewski, 2020). Metoda POT prowadzi zatem do uzyski-

wania szeregów rozdzielczych najwyższych maksimów opadów i jest aktualnie zalecana w hydrologii miejskiej do budowy modeli opadowych, zwłaszcza w zastosowaniu do wymiarowania kanalizacji deszczowej (Kotowski et al., 2010, za: Licznar i Zalewski, 2020). Jak podano w publikacji pod redakcją Ozgi-Zielińskiego (2022), w przypadku praktycznego stosowania prawdopodobieństw występowania opadów $p \geq 50\%$ (tj. dla $C=1$ rok i $C=2$ lata), jak np. do projektowania czy modelowania hydrodynamicznego niezawodności działania sieci i obiektów odwodnienia terenów, zaleca się stosowanie modeli opadów maksymalnych opartych na ciągach POT. W innych przypadkach, tj. dla prawdopodobieństw $p < 50\%$ ($C > 2$ lata), metody AMP i POT mogą być uznawane w przybliżeniu za równorzędne – zastępowalne. Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe informacje, w niniejszej pracy przyjęto do analiz wysokości opadów z modeli PMAxTP, wyznaczone na podstawie metody POT.

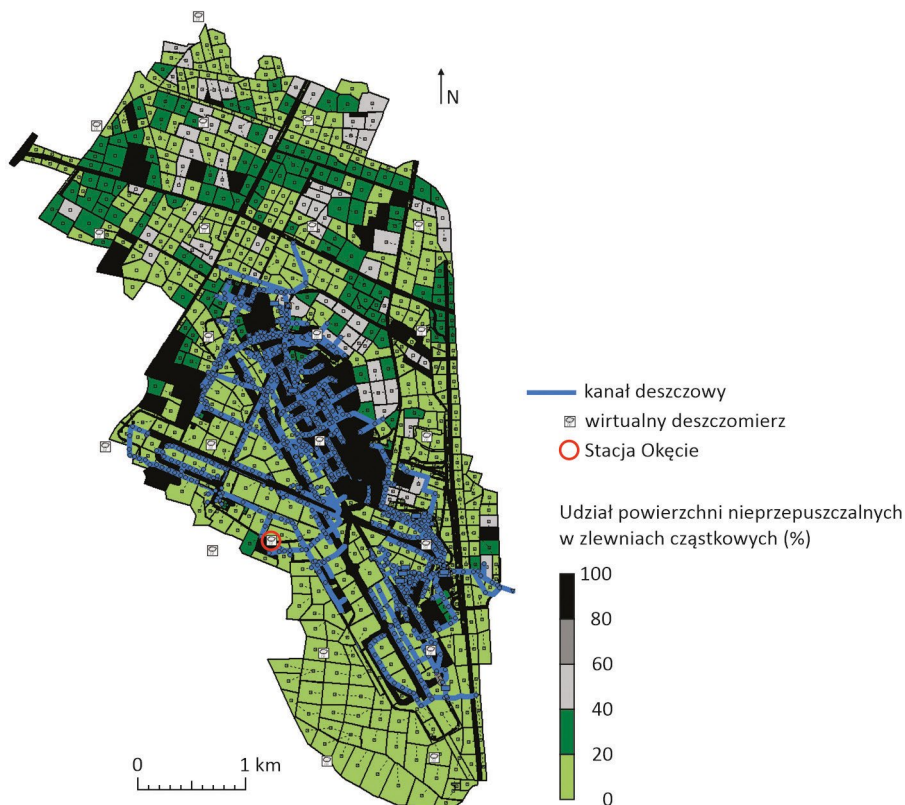
Hydrodynamiczny model badanej zlewni miejskiej

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń sprawdzających wydajność systemu kanalizacji deszczowej na Lotnisku Chopina w Warszawie, przeprowadzonych w programie komputerowym SWMM (*Storm Water Management Model*) w wersji 5.2, w reakcji na przyjęte opady deszczu. Metody obliczeniowe tego programu, opracowanego przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (ang. U.S. Environmental Protection Agency), bazują na numerycznym rozwiązywaniu układów równań różniczkowych ruchu cieczy de Saint-Venanta. Umożliwiają uwzględnienie zmiennych w czasie i przestrzeni rzeczywistych spływów wód opadowych, a także zmiennego i nieustalonego przepływu wód w kanałach oraz obiektach kanalizacyjnych (Kotowski et al., 2013). W gronie istniejących programów komputerowych do hydrodynamicznych symulacji działania systemów kanalizacyjnych, model SWMM jest jednym z często wykorzystywanych w kraju i na świecie (Zawilski i Sakson, 2011; Kotowski et al., 2013; Bisht et al., 2016; Barszcz, 2024). Program można bezpłatnie pobrać ze strony internetowej (U.S. Environmental Protection Agency), a jego szczegółowy opis zamieszczony jest w podręczniku (Rossman i Simon, 2022).

Obszar Lotniska Chopina stanowi przeważającą część badanej zlewni cząstkowej Potoku Służewieckiego o powierzchni 17,8 km². W profilu zamykającym tę zlewnię cząstkową, w Potoku Służewieckim poniżej wylotu z obszaru Lotniska, znajduje się posterunek wodowskazowy, w którym Katedra Inżynierii Wodnej i Geologii Stosowanej SGGW (Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie) prowadzi pomiary stanów i przepływów wody. Potok Służewiecki od źródeł do rozpatrywanego przekroju wodowskazowego aktualnie jest prawie na całej długości betonowym kolektorem, do którego siecią kanalizacyjną odprowadzane są wody opadowe z obszaru zlewni. Na Lotnisku Chopina znajduje się pięć zbiorników (ryc. 7A), wykorzystywanych do retencjonowania wód opadowych i roztopowych, których całkowita pojemność retencyjna wynosi 42 490 m³. Napełnianie (opróżnianie) wodami opadowymi czterech z tych zbiorników (ZR1, ZR2-3 i ZR5) i jednocześnie regulacja przepływów w Potoku Służewieckim (kanale zamkniętym) odbywa się poprzez automatyczne sterowanie wysokością opuszczania/podnoszenia zasuw zlokalizowanych w trzech komorach. Przyjęty schemat sterowania pracą zasuw zakłada, że przepływ w kolektorze poniżej każdej z nich nie powinien przekraczać wartości 1,53 m³·s⁻¹. Szerszy opis badanej zlewni i systemu kanalizacyjnego można znaleźć w innych pracach (Barszcz, 2017, 2024).

Adaptacja hydrodynamicznego modelu SWMM dla analizowanej zlewni cząstkowej Potoku Służewieckiego polegała na utworzeniu w modelu obiektów „imitujących” rzeczywisty system hydrologiczny i hydrauliczny zlewni, a następnie określeniu zależności pomiędzy tymi obiektami i wartości ich parametrów. Uwzględniono następujące obiekty: deszczomierze (ryc. 1) – istniejący (zlokalizowany na stacji synoptycznej Warszawa-Okęcie) i 22 wirtualne (wykorzystane w symulacjach przy obciążeniu zlewni opadami z modeli PMAxTP); 1 516 zlewni cząstkowych, które wydzielono w zlewni na podstawie analizy przestrzennej zmienności użytkowania terenu i związanego z tym udziału powierzchni nieprzepuszczalnych; system kanalizacyjny – 1029 kanałów i punkty węzłowe (studzienki); zbiorniki retencyjne; przepompownie wód deszczowych; obiekty do regulacji przepływu w kolektorze i działania zbiorników (zasowy czołowe i boczne, przelewy); kłapy zwrotne; przepusty drogowe. Schemat podziału zlewni na homogeniczne zlewnie cząstkowe oraz utworzona w modelu SWMM trasa kanałów deszczowych, zostały przedstawione na rycinie 1.

Do kalibracji i późniejszej weryfikacji modelu wykorzystano dane pomiarowe opad-odpływ, które zmierzono w badanej zlewni Potoku Służewieckiego. Uzyskanie pozytywnego wyniku weryfikacji modelu stanowiło podstawę dla jego wykorzystania do symulacji



Ryc. 1. Schemat analizowanej zlewni w modelu SWMM
Diagram of the analysed catchment in the SWMM model

przepływu wód i weryfikacji działania systemu kanalizacyjnego Lotniska Chopina, opisanych w dalszej części pracy. Szczegółowe informacje w zakresie adaptacji modelu SWMM dla analizowanej zlewni – identyfikacji parametrów dla utworzonych obiektów oraz przeprowadzonych procesów kalibracji i weryfikacji (walidacji) – przedstawiono w innej pracy (Barszcz, 2024).

Wyniki i dyskusja

Analiza porównawcza wysokości opadów maksymalnych

Wyznaczenie ilości opadu deszczowego (natężenia jednostkowego q lub wysokości P , odpowiednio wyrażonych w $\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ i mm) na obszarze zlewni, w zależności od czasu jego trwania t i prawdopodobieństwa przewyższenia p , w % (lub częstości występowania C , w latach), stanowi podstawę projektowania (wymiarowania) i weryfikacji działania systemów kanalizacyjnych.

W tym rozdziale pracy przedstawiono wyniki analiz wielkości opadów maksymalnych o określonych charakterystykach, wyznaczonych na podstawie modeli probabilistycznych PMAOTP (dostępnych na platformie internetowej IMGW-PIB; opartych na ciągach POT), posługując się danymi dla wybranych punktów (lokalizacji) na obszarze kraju. Analizowano wartości kwantyli opadu maksymalnego $P_{\max}(t, p)$ i górnej granicy przedziału ufności, które wyznaczono dla dziesięciu czasów trwania – w zakresie od 5 do 4320 min – oraz pięciu prawdopodobieństw przewyższenia – w zakresie od 2 do 50%. W ramach tej analizy przeprowadzono porównanie wysokości opadów maksymalnych, estymowanych z modelu PMAOTP dla stacji meteorologicznej Warszawa-Bielany, względem adekwatnych danych wyznaczonych z dotychczas stosowanych w Polsce modeli opadowych – modelu fizycznego Błaszczyka i modelu probabilistycznego Bogdanowicz-Stachy (tab. 1). Dla celów porównawczych zamieszczono także wyniki obliczeń z modelu Błaszczyka spoza zakresu jego stosowalności (tj. dla $t > 180$ min). Stacja Warszawa-Bielany stanowi jeden ze stu punktów pomiarowych wykorzystanych do opracowania w IMGW-PIB cyfrowej bazy danych opadowych w projekcie PMAOTP, najbliżej położony względem badanej zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie.

Do ilościowego określenia różnic w wartościach opadów wyznaczonych z rozpatrywanych modeli wykorzystano jedną z najczęściej stosowanych miar statystycznych – procentowy błąd względny δ . Podane w tej pracy wielkości błędów obliczano w odniesieniu do wysokości opadów z modelu PMAOTP (kwantyli opadu maksymalnego). Wartości dodatnie przyjętej miary wskazują błąd niedoszacowania, natomiast wartości ujemne – błąd przeszacowania wielkości opadów z określonego modelu względem PMAOTP.

W pierwszym etapie analiz porównywano wysokości opadów wyznaczone z modelu PMAOTP dla stacji meteorologicznej Warszawa-Bielany i obliczone z modelu Błaszczyka dla obszaru Warszawy. Z podanych w tabeli 1 danych wynika, że rozpatrywane wartości wysokości opadów z modelu PMAOTP (kwantyle) są wyższe od adekwatnych wartości z modelu Błaszczyka jedynie w zakresie czasów trwania opadów od 5 do 720 min (zróżnicowanych w zależności od prawdopodobieństwa p), a tym samym czasów najczęściej stosowanych w praktyce. Przy czym, wraz ze zmniejszaniem się prawdopodobieństwa, wskazane przewyższenie występuje w odniesieniu do coraz krótszych czasów trwania – dla opadów o prawdopodobieństwie przewyższenia: 50, 20, 10, 5 i 2%, wartości sumy

opadu z modelu PMAOTP są wyższe od obliczonych z modelu Błaszczyka odpowiednio dla czasów trwania nie dłuższych niż 720, 360, 60, 30 i 5 min (tab. 1). Wartości przyjętej miary statystycznej – błędu względnego – obrazujące różnicę między wszystkimi analizowanymi wysokościami opadów z modelu PMAOTP i Błaszczyka, zawierają się w zakresie od -82,4 do 35,2% dla różnych czasów trwania i prawdopodobieństw (częstości) opadów. Wielkość przeciętnego błędu, obliczona na podstawie wartości błędów z pominięciem znaku minus, wynosi 19,3%.

W przypadku porównywania wartości wysokości opadów z modelu PMAOTP dla górnego ograniczenia przedziału ufności, względem adekwatnych wartości (przeliczonych z q) z modelu Błaszczyka, występuje na ogół podobna relacja do wyżej opisanej – wielkości opadów z modelu PMAOTP są wyższe dla początkowych czasów trwania, tj. w przedziale od 5 do 720 min (ściślej, dla czasów nie dłuższych niż: 720, 360, 60 i 30 min – w odniesieniu do poszczególnych prawdopodobieństw występowania opadów: 50, 20, 10, 5 i 2%).

W podobnych analizach (jednakże bez uwzględnienia danych z modelu PMAOTP), [Kotowski et al. \(2010\)](#) na podstawie analizy porównawczej znanych z literatury 10 modeli opadów wykazali, że zdecydowana większość tych modeli, w postaci wzorów fizykalnych bądź probabilistycznych, zarówno o zasięgu ogólnopolskim, jak i lokalnym, opracowanych dla Wrocławia, wskazuje na znacznie wyższe wartości natężenia deszczy miarodajnych do wymiarowania kanalizacji, w porównaniu z obliczanymi tradycyjnie z modelu Błaszczyka. Przewyższenia te są ogólnie różne w różnych zakresach czasu trwania i częstości występowania opadów. W skrajnych przypadkach różnice sięgają nawet 90%, przeciętnie są one na poziomie 40%, co wykazano na przykładzie pomiarów wysokości opadów deszczowych w stacji meteorologicznej IMGW we Wrocławiu ([Kaźmierczak et al., 2012](#)) i Warszawie ([Kotowski et al., 2018](#)). Z kolei zastosowanie formuły Błaszczyka w badaniach porównawczych na terenie Szczecina wykazało najmniejsze dopasowanie do danych pomiarowych z okresu 30 lat ([Wawrzyniak i Wdowikowski, 2023](#)). Krytyczną analizę użyteczności wzoru Błaszczyka przedstawił również [Węglarczyk \(2013\)](#), wskazując, że wzór ten jest oparty na niepewnych podstawach i nieaktualnych danych opadowych (zarejestrowanych w Warszawie w latach 1837-1891 i 1914-1925), a przedstawione podejście rodzi poważne wątpliwości dotyczące poprawności metody. Z kolei w pracy [Licznara et al. \(2018\)](#) podano, że stosowanie formuły Błaszczyka, nawet w warunkach warszawskich, prowadzi współcześnie do wyraźnego zaniżenia estymowanych wartości natężenia deszczy miarodajnego względem rzeczywistych wartości opadów atmosferycznych. Przedstawione w krajowej literaturze wyniki analiz świadczą o słuszności podnoszonego od wielu lat stanowiska środowiska naukowego i technicznego, które nie zaleca stosowania modelu opadowego Błaszczyka do projektowania systemów odwodnienia terenów zurbanizowanych ([Wdowikowski et al., 2023](#)).

W kolejnym etapie analiz porównywano wysokości opadów, wyznaczone z modelu PMAOTP (dla stacji Warszawa-Bielany) i regionalnego modelu Bogdanowicz-Stachy (parametr skali obliczono ze wzoru adekwatnego dla regionu centralnego). Jak już wspomniano, do wyprowadzenia tych probabilistycznych modeli zastosowano dane opadowe o różnej jakości, w tym z różnych okresów, a także przyjęto różne założenia wyjściowe (POT i AMP). Jak wynika z tabeli 1, wysokości (kwantyle) opadów maksymalnych z modelu PMAOTP charakteryzują się zarówno wyższymi, jak i niższymi wartościami w porównaniu do adekwatnych danych z modelu Bogdanowicz-Stachy. Wyższe wartości tej charakterystyki z modelu PMAOTP odnotowano w analizowanym zakresie prawdopodobieństw opadów

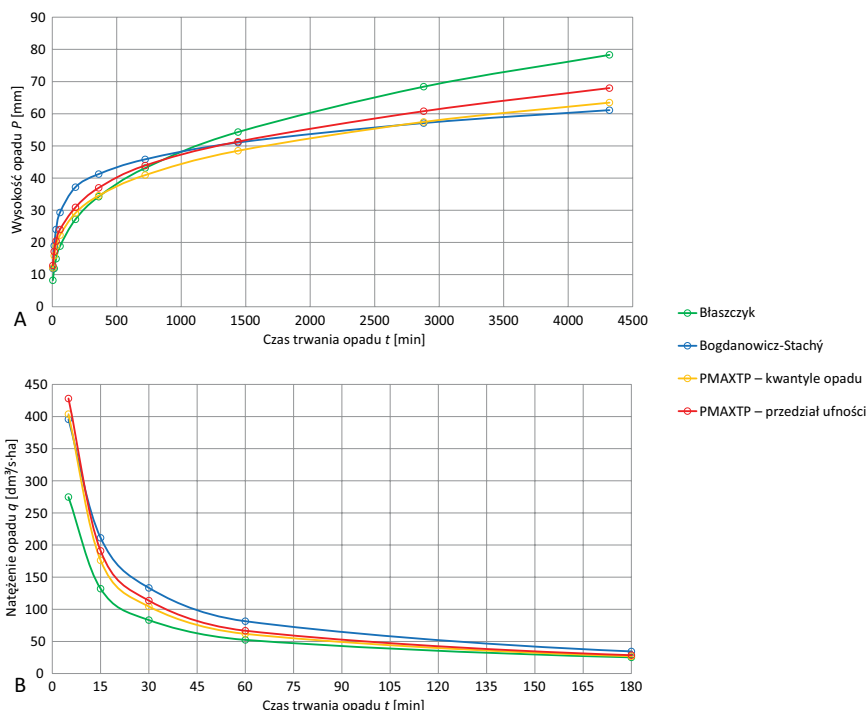
Tabela 1. Wysokości opadów maksymalnych wyznaczone z różnych modeli
Maximum amounts of rainfall determined using various models

Charakterystyki opadu		Wysokość opadu (mm)					
		obszar Warszawy		Warszawa-Bielany		Warszawa-Okęcie	
p (%); C (lata)	Czas trwania t (min)	Błaszczyk	Bogdanowicz i Stachy	kwantyl PMAxTP	górną granicą ufności PMAxTP	kwantyl PMAxTP	górną granicą ufności PMAxTP
$p=50$ $C=2$	5	6,07	8,20	9,37	9,66	10,09	10,44
	15	8,75	12,97	12,32	12,93	13,43	14,01
	30	11,03	16,36	14,66	15,40	15,44	16,11
	60	13,89	20,05	17,43	18,21	18,21	18,98
	180	20,02	25,80	22,93	23,88	23,8	24,76
	360	25,22	29,06	27,27	28,43	28,21	29,41
	720	31,77	32,85	32,43	34,03	33,45	35,00
	1440	40,02	37,29	38,56	39,94	39,59	41,08
	2880	50,41	42,56	45,85	47,77	46,84	48,77
4320	57,69	46,10	50,74	52,86	51,67	53,85	
$p=20$ $C=5$	5	8,24	11,87	12,11	12,84	12,4	13,17
	15	11,88	19,00	15,85	17,18	16,32	17,46
	30	14,96	23,99	18,78	20,43	19,43	20,98
	60	18,85	29,31	22,26	24,01	23,01	24,72
	180	27,17	37,19	29,13	30,89	30,29	32,33
	360	34,23	41,24	34,53	36,96	36,01	38,71
	720	43,12	45,82	40,92	43,9	42,77	45,72
	1440	54,31	51,05	48,49	51,33	50,75	54,35
	2880	68,41	57,10	57,46	60,79	60,18	63,95
4320	78,30	61,11	63,46	67,98	66,48	71,16	
$p=10$ $C=10$	5	10,38	14,07	14,27	15,52	14,50	15,75
	15	14,97	22,62	18,59	20,58	19,00	20,70
	30	18,85	28,56	21,96	24,45	22,52	24,72
	60	23,75	34,85	25,94	28,6	26,85	29,50
	180	34,24	44,01	33,79	36,38	35,18	38,40
	360	43,13	48,53	39,92	43,52	42,07	46,32
	720	54,32	53,58	47,16	51,52	50,08	54,93
	1440	68,43	59,28	55,72	59,93	59,52	64,82
	2880	86,19	65,81	65,83	70,58	70,66	77,05
4320	98,65	70,10	72,57	79,25	78,09	85,23	
$p=5$ $C=20$	5	13,08	16,00	16,50	18,46	16,51	18,39
	15	18,86	25,80	21,39	24,09	21,72	24,09
	30	23,75	32,58	25,19	28,57	25,80	28,91
	60	29,92	39,73	29,66	33,30	30,63	34,44
	180	43,14	50,01	38,44	42,02	40,38	44,95
	360	54,34	54,94	45,26	50,13	48,26	54,48
	720	68,44	60,41	53,31	59,28	57,58	63,84
	1440	86,21	66,53	62,78	68,48	68,53	76,47
	2880	108,60	73,48	73,93	80,35	81,40	91,00
4320	124,30	78,00	81,35	90,32	89,97	100,01	
$p=2$ $C=50$	5	17,75	18,30	19,57	22,76	19,44	22,37
	15	25,59	29,56	25,18	28,89	25,39	28,75
	30	32,24	37,34	29,53	34,15	30,12	35,21
	60	40,61	45,50	34,63	39,63	35,80	41,21
	180	58,55	57,11	44,57	49,66	47,37	54,23
	360	73,75	62,54	52,27	58,89	56,49	66,33
	720	92,89	68,50	61,29	69,66	67,64	77,82
	1440	117,01	75,11	71,87	79,65	80,57	92,57
	2880	147,39	82,55	84,28	93,17	95,69	109,70
4320	168,69	87,37	92,51	104,56	105,49	119,93	

(2-50%) jedynie dla najkrótszego czasu trwania opadu – 5 min, oraz dla dwóch najdłuższych czasów – $t=2880$ i $t=4320$ min (w odniesieniu do opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia 50% również dla $t=1440$ min). Przeważnie wysokości opadów z modelu PMAOTP były niższe od korespondujących wartości z modelu Bogdanowicz-Stachy (w zakresie czasów trwania 15-1440 min). Wartości błędu względnego, obrazujące wzajemne różnice wyników obu modeli, zawierają się w zakresie od -34,3 do 12,5%. Natomiast mediana wartości błędu (obliczona na podstawie przyjętej statystyki dla wszystkich opadów z pominięciem znaku minus) wynosi 12,2%.

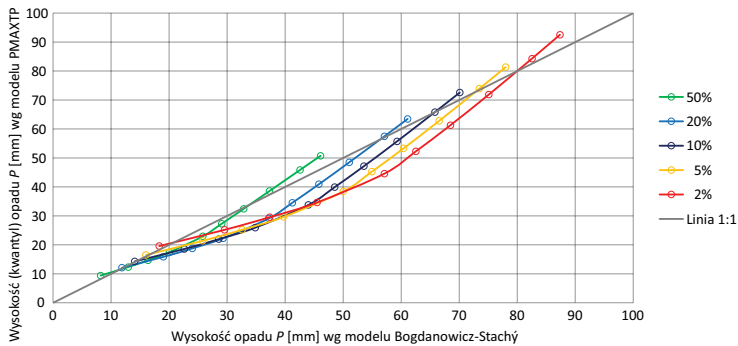
Następnie analizowano różnice wysokości opadów ustalone dla górnego ograniczenia przedziału ufności modelu PMAOTP względem adekwatnych wartości z modelu Bogdanowicz-Stachy. Podobnie jak w przypadku poprzedniej analizy stwierdzono, że dla czasu trwania opadu 5 min oraz przeważnie w przedziałach 1440-4320 min (w całym analizowanym zakresie prawdopodobieństw) wysokości opadów dla górnego ograniczenia przedziału ufności modelu PMAOTP są wyższe. Względne różnice są jednak mniejsze niż w przypadku poprzedniej analizy. Jak już wspomniano, bardziej aktualne i zarazem wiarygodne są jednak dane opadowe z modelu PMAOTP.

Podane w tabeli 1 wysokości opadów maksymalnych $P_{\max}(t, p)$ o prawdopodobieństwie 20% w całym zakresie czasu ich trwania, wyznaczone z trzech modeli opadowych, przedstawiono dla przykładu na rycinie 2A. Wielkości opadów z modelu PMAOTP dla sta-



Ryc. 2. Parametry opadu deszczowego z różnych modeli – wartości wysokości (A) i natężenia jednostkowego opadu (B) o prawdopodobieństwie 20%; dane PMAOTP dla stacji Warszawa-Bielany
Rainfall parameters from various models – values for rainfall amounts (A) and unit intensities (B) at the 20% probability level; PMAOTP data for the Warsaw-Bielany Station

cji Warszawa-Bielany pokazano zarówno w postaci kwantyla opadu maksymalnego, jak i górnej granicy przedziału ufności. Rysunek ten ilustruje wzajemne różnice między wysokościami opadów, estymowanymi z rozpatrywanych w pracy modeli. Na rycinie 2B przedstawiono wartości natężenia jednostkowego opadu q , które obliczono dla pierwotnie wyznaczonych wysokości opadów o prawdopodobieństwie 20%. Dla przejrzystości na tym rysunku pokazano dane jedynie w praktycznym zakresie czasu trwania 5-180 min. Natomiast opisane w pracy różnice w wysokościach opadów, wyznaczonych z modelu PMAXTP dla stacji Warszawa-Bielany i modelu Bogdanowicz-Stachy w odniesieniu do przyjętego zakresu poziomu prawdopodobieństwa i czasu trwania opadów, zilustrowano na rycinie 3.



Ryc. 3. Porównanie wysokości opadów z dwóch modeli w całym zakresie prawdopodobieństwa i czasu trwania opadów; dane PMAXTP dla stacji Warszawa-Bielany
Comparison of amounts of rainfall from two models across the entire range of probability and duration. PMAXTP data for the Warsaw-Bielany Station

Przestrzenny rozkład wysokości opadów badanej zlewni miejskiej

Dane opadowe o dużej rozdzielczości przestrzennej i czasowej są szczególnie wymagane w analizach hydrodynamicznych do weryfikacji działania systemów odwodnieniowych na obszarach zurbanizowanych. Mając to na względzie, w tym rozdziale przedstawiono wyniki analizy przestrzennego rozkładu wysokości (kwantyle) opadów na obszarze zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie (ryc. 1), które wyznaczono na podstawie modelu probabilistycznego PMAXTP (wg POT). Do analizy przyjęto opad deszczu o prawdopodobieństwie przewyższenia $p=20\%$ ($C=5$ lat) i czasie trwania $t=15$ min. Podane charakterystyki opadu przystają do miarodajnego opadu, który został uwzględniony w aktualnym pozwoleniu wodnoprawnym (Pozwolenie..., 2017) na odprowadzanie wód opadowych z terenu Lotniska Chopina (stanowiącego zasadniczą część zlewni) do Potoku Służewieckiego.

Następnie przedstawiono wyniki porównania wysokości opadów z modeli PMAXTP dla stacji meteorologicznej Warszawa-Bielany i punktu odpowiadającego lokalizacji stacji synoptycznej Warszawa-Okęcie, położonej ok. 13 km na południe od wymienionej stacji i jednocześnie w obszarze badanej zlewni. W miejscu tym warto nadmienić, że lokalny model opadowy dla stacji Warszawa-Okęcie jest wynikiem interpolacji danych między punktami pomiarowymi w projekcie PMAXTP – analizowanymi deszczomierzami na obszarze Polski (w tym danych z deszczomierza na stacji Warszawa-Bielany). Wartości kwantyla opadu maksymalnego i górnej granicy przedziału ufności dla opadów o różnych prawdopo-

bieństwach i czasach trwania podano w tabeli 1, w odniesieniu do obydwu rozpatrywanych stacji (punktów).

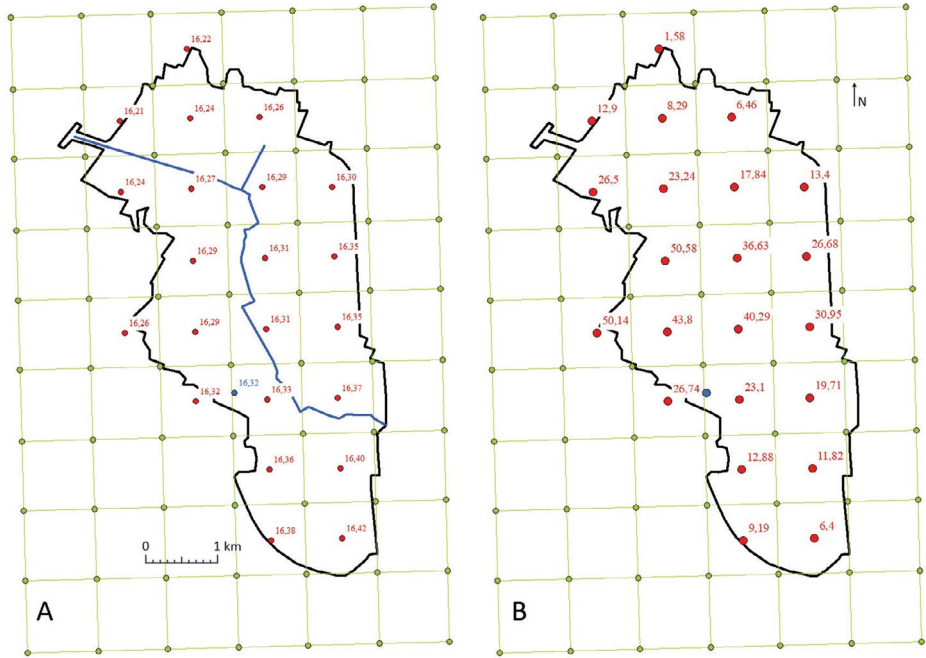
W celu określenia przestrzennego rozkładu wysokości opadów podzielono analizowaną zlewnię Potoku Służewieckiego na homogeniczne komórki o rozdzielczości 1 km (o powierzchni 1 km²), których lokalizacja odpowiada komórkom (pikselom) dla obrazowania radarowego – hydrologicznego produktu PAC (ang. *Precipitation Accumulation*) opracowanego przez IMGW-PIB na podstawie danych radarowych z sieci POLRAD (wykorzystanych do weryfikacji wysokości opadów w projektach PANDa i PMAxTP). Na obszarze zlewni o powierzchni 17,8 km² utworzono 22 komórki. Dla każdej z tych 22 komórek wyznaczono wysokości (kwantyle) opadów (PMAxTP) o przyjętych charakterystykach ($p=20\%$, $t=15$ min), co przedstawiono na rycinie 4A. Odpowiadają one danym z modelu PMAxTP dla punktów (na rysunku 4A oznaczonych kolorem czerwonym) zlokalizowanych w środku geometrycznym każdej komórki o znanych współrzędnych geodezyjnych w systemie odniesienia WGS 84.

Stwierdzono, że na obszarze analizowanej zlewni występuje bardzo mała zmienność wysokości (sum) opadów w odniesieniu do rozpatrywanego opadu deszczowego, których wartości dla poszczególnych komórek wynoszą od 16,21 do 16,42 mm. Wyznaczona z modelu PMAxTP suma opadu, w odniesieniu do piksela adekwatnego dla lokalizacji stacji Warszawa-Okęcie (punkt oznaczony na rysunku 4A kolorem niebieskim), wynosi 16,32 mm. Adekwatna wysokość opadu, wyznaczona na podstawie modelu Bogdanowicz-Stachy, wynosi 19,00 mm.

Jak wspomniano powyżej, źródłem informacji o opadach są również obserwacje radarowe. Dla przykładu, przestrzenny rozkład wysokości opadów na obszarze zlewni dla wybranego historycznego zdarzenia opadowego (zarejestrowanego w dniu 9.06.2007 r.), wyznaczonych na podstawie radarowego produktu PAC (Tuszyńska, 2015; Barszcz, 2022), przedstawiono na rycinie 4B. Jak wynika z rysunku, w tym przypadku na obszarze zlewni występuje duża zmienność sum opadu, których wartości wynoszą od 1,58 do 50,58 mm.

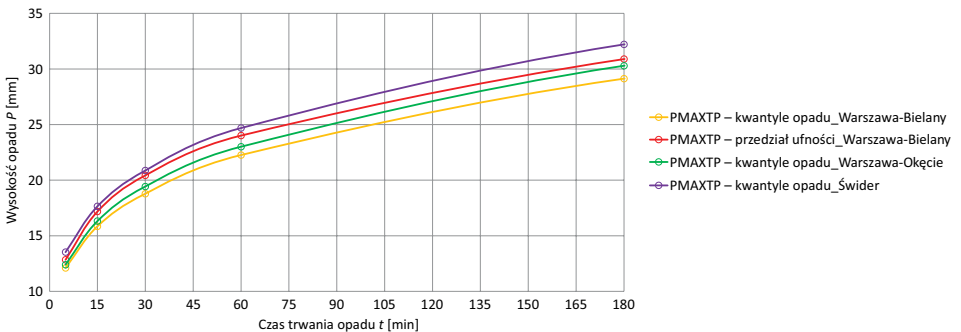
Przeprowadzone porównanie danych opadowych, wyznaczonych z modeli PMAxTP dla dwóch rozpatrywanych stacji (punktów): Warszawa-Bielany i Warszawa-Okęcie, wykazało, że korespondujące wartości kwantyli opadu maksymalnego dla obydwu stacji są zbliżone do siebie. Wysokości opadów na stacji Warszawa-Okęcie są niemal we wszystkich przypadkach (z wyjątkiem opadu o prawdopodobieństwie $p=2\%$, czasie trwania $t=5$ min) wyższe niż odpowiadające im dane dla stacji Warszawa-Bielany. Wartości różnic między wysokościami opadów o przyjętych charakterystykach z modeli PMAxTP dla dwóch przedmiotowych stacji zawierają się w zakresie od -14,0 do 0,7% dla wszystkich t i p (tylko w jednym wskazanym powyżej przypadku odnotowano dodatnią wartość błędu względnego), przy medianie wartości błędu $\delta=4,4\%$ (obliczonej na podstawie wartości modułu błędów). Ponadto stwierdzono, że wartości kwantyli opadów maksymalnych z modelu PMAxTP dla stacji Warszawa-Okęcie przeważnie są mniejsze od korespondujących wartości górnych granic przedziału ufności opadów dla stacji Warszawa-Bielany (w 41 przypadkach na 50). W odniesieniu do tych danych opadowych, wartości błędu względnego mieszczą się w przedziale od -4,5 do 14,6% dla całego zakresu czasu trwania i prawdopodobieństwa (częstości) opadów, przy wartości mediany wynoszącej 2,9%. Biorąc pod uwagę fakt, że rozpatrywane stacje opadowe są oddalone od siebie o ok. 13 km, to wykazane różnice w wysokościach opadów (wyznaczonych z lokalnych modeli PMAxTP) na obydwu stacjach ogólnie są małe.

Dla zilustrowania podanych informacji na rycinie 5 przedstawiono przebieg zmienności wysokości opadów o prawdopodobieństwie 20% i czasach trwania w wybranym zakresie 5-180 min, wyznaczonych z modeli PMAXTP dla rozpatrywanych stacji Warszawa-Bielany i Warszawa-Okęcie oraz dodatkowo dla stacji Świder (stanowiącej punkt pomiarowy



Ryc. 4. Przestrzenny rozkład wysokości opadów (mm) z modelu PMAXTP ($p=20\%$, $t=15$ min) (A) i radarowego produktu PAC (B) dla przykładowego zdarzenia opadowego na siatce komórek o rozdzielczości 1 km; stacja Warszawa-Okęcie – punkt niebieski

Spatial distribution of amounts of rainfall (mm) from the PMAXTP models ($p=20\%$, $t=15$ min) (A) and radar-derived PAC product (B) for a sample rainfall event on a grid of cells of 1 km resolution; Warsaw-Okęcie Station – blue point



Ryc. 5. Wysokości opadów o prawdopodobieństwie 20% z modelu PMAXTP dla trzech stacji (punktów pomiarowych)

Amounts of rainfall with a 20% probability from the PMAXTP model for three Stations (measuring points)

w projekcie PMAOTP, zlokalizowanej ok. 27 km na południowy wschód od adekwatnego punktu pomiarowego Warszawa-Bielany). Wysokości kwantyła opadów dla stacji Świder przewyższają korespondujące wielkości dla pozostałych stacji, również wartości górnej granicy przedziału ufności opadów dla stacji Warszawa-Bielany (ryc. 5).

Weryfikacja działania systemu kanalizacyjnego Lotniska Chopina

Do prognoz przepływów wód w celu weryfikacji działania systemów kanalizacji deszczowej mogą być stosowane różne metody obliczeniowe. Jedną z nich jest modelowanie hydrodynamiczne, które umożliwia uwzględnienie w symulacjach zmiennych w czasie i przestrzeni opadów, a tym samym spływów wód opadowych i przepływów w kanałach. W tej pracy do symulacji przepływów zastosowano model hydrodynamiczny SWMM, który adaptowano dla badanej zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie (ryc. 1).

W celu weryfikacji działania istniejącego systemu kanalizacji deszczowej (sprawności hydraulicznej kanałów i możliwości występowania wylewów wód) na obszarze Lotniska Chopina, stanowiącym zasadniczą część badanej zlewni, obciążono zlewnię opadami o prawdopodobieństwie przewyższenia $p=20\%$ (tj. $C=5$ lat) i czasie trwania $t=15$ min, ze stałą w czasie intensywnością, pozyskanymi z opisanych w pracy modeli: Błaszczyka, Bogdanowicz-Stachy i PMAOTP (dla stacji Warszawa-Bielany; stacji Warszawa-Okęcie, zlokalizowanej na obszarze zlewni; 22 komórek o rozdzielczości 1 km, które utworzono w zlewni – patrz ryc. 4). Wybrane charakterystyki opadu (p , C , t) przyjęto na podstawie normy PN-EN 752:2017 i wytycznej w aktualnym pozwoleniu wodnoprawnym na odprowadzanie wód opadowych z terenu Lotniska Chopina do Potoku Służewieckiego. Wartości wysokości opadów, wykorzystanych do weryfikacji systemu kanalizacyjnego, podano w tabeli 2.

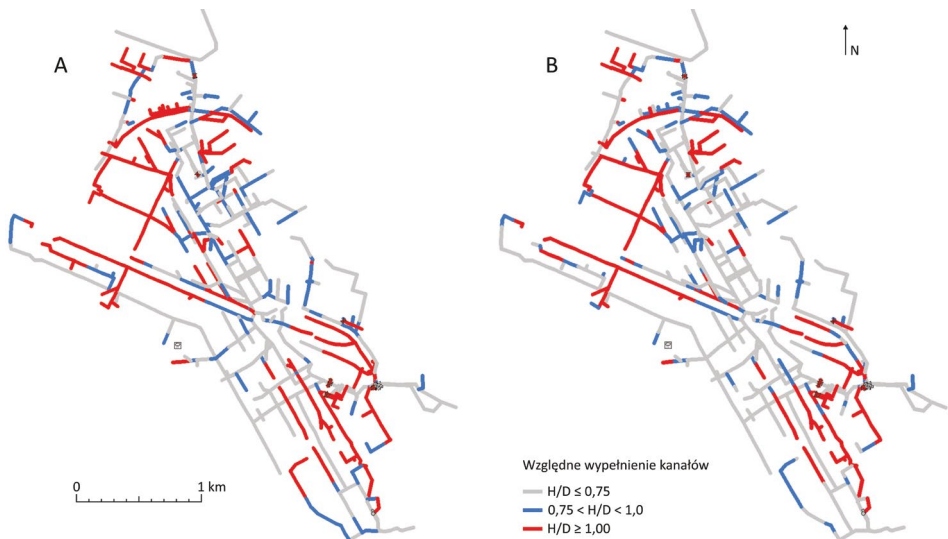
W wyniku symulacji w modelu SWMM uzyskano informacje o wielkościach przepływu i wypełnieniach w poszczególnych odcinkach kanalizacji, w reakcji na przyjęte opady deszczowe. Obliczenia numeryczne przeprowadzono, mając na względzie warunek wynikający z pozwolenia wodnoprawnego, że maksymalny przepływ w Potoku Służewieckim poniżej obszaru Lotniska Chopina (oczyszczalni wód deszczowych) nie powinien przekroczyć wartości $1,53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. W tym celu symulacje w modelu SWMM prowadzone były przy uwzględnieniu regulacji przepływów za pomocą zasuw zlokalizowanych w Potoku Służewieckim (komór), które sterowały procesami napełniania wodami deszczowymi i opróżniania zbiorników retencyjnych na terenie Lotniska Chopina, a jednocześnie przepływami wód w kanałach.

Przedmiotowe analizy wykazały, że niektóre kanały deszczowe na obszarze Lotniska Chopina nie mają wystarczającej przepustowości hydraulicznej, co powoduje miejscowe (krótkotrwałe) wylania wód opadowych z kanalizacji na powierzchnię terenu. Sieć kanałów w modelu SWMM wraz ze względnymi wypełnieniami H/D (określającymi stosunek maksymalnego napełnienia kanałów H do średnicy D), w krytycznym czasie trwania opadów wyznaczonych z modeli Bogdanowicz-Stachy i PMAOTP (w postaci kwantyła opadu maksymalnego dla stacji Warszawa-Okęcie), przedstawiono dla przykładu odpowiednio na rycinach 6A i 6B. Jak wynika z rysunków, na obszarze Lotniska Chopina występują odcinki kanałów, które pracują pod ciśnieniem – oznaczone liniami w kolorze czerwonym ($H/D \geq 1,00$). Należy również zauważyć, że łączna długość i lokalizacja przeciążonych odcinków kanałów deszczowych, wyznaczonych dla opadów z modeli Bogdanowicz-Stachy oraz

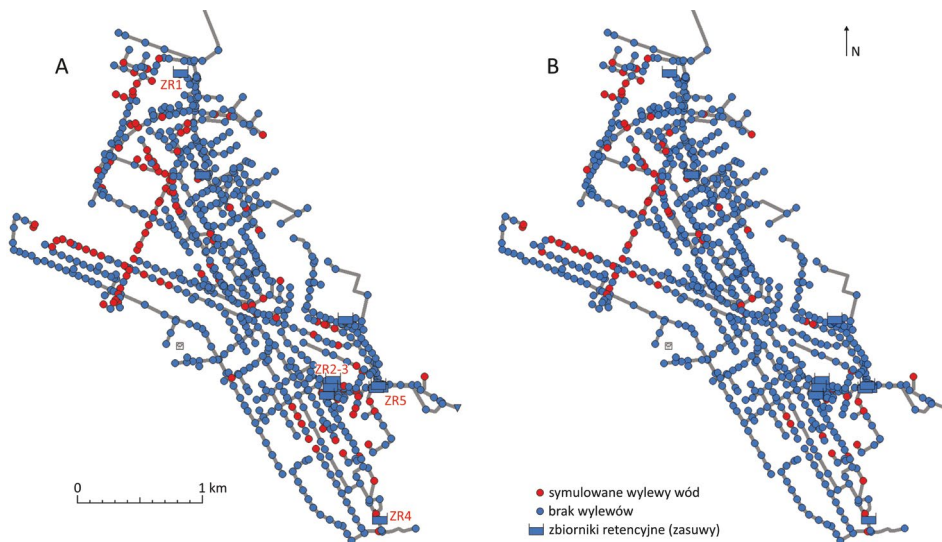
PMAOTP, są wysoce zgodne względem siebie. Podobny stan systemu kanalizacyjnego (niepokazany w postaci rysunków) uzyskano w trzech innych symulacjach, przyjmując wartości wysokości opadu z modeli PMAOTP w postaci górnej granicy przedziału ufności dla stacji Warszawa-Okęcie, kwantyla opadu dla 22 komórek na obszarze badanej zlewni oraz kwantyla opadu dla stacji Warszawa-Bielany. Natomiast w przypadku obciążenia zlewni opadem z modelu Błaszczyka ustalono, że dla większości kanałów wypełnienia nie przekraczają 75% ich maksymalnej przepustowości, a tylko nieliczne kanały działają pod ciśnieniem.

W wyniku przeprowadzonej weryfikacji działania systemu kanalizacyjnego na obszarze Lotniska Chopina, ustalono, że przyjęty opad deszczu o częstości występowania $C=5$ lat powoduje występowanie wylewów z kanalizacji. Należy podkreślić, że symulacje w modelu SWMM prowadzone były przy uwzględnieniu wspomnianej powyżej regulacji przepływów w Potoku Służewickim za pomocą zasuw, co prowadzi do pojawiania się nadpiętrzeń wód w sieci kanałów deszczowych, a w konsekwencji możliwości występowania wylewów.

Lokalizację studzienek kanalizacyjnych w modelu hydrodynamicznym SWMM, w których obserwowano symulowane wylewy wód na powierzchnię terenu przy obciążeniu zlewni opadami z modeli Bogdanowicz-Stachy i PMAOTP dla stacji Warszawa-Okęcie (punkty oznaczone kolorem czerwonym), pokazano dla przykładu na rycinie 7. Najbardziej niekorzystny stan systemu kanalizacyjnego na obszarze Lotniska uzyskano w reakcji na opad wyznaczony z modelu Bogdanowicz-Stachy (wysokość opadu wynosi 19,00 mm), względem wyników uzyskanych przy zastosowaniu wartości wysokości opadów z modeli Błaszczyka lub PMAOTP. Odnotowano krótkotrwałe wylewy wód w ok. 100 studzienkach, usytuowanych głównie w górnej i dolnej części zlewni. Natomiast symulując działanie sieci



Ryc. 6. Przepustowość kanalizacji na obszarze Lotniska Chopina dla opadów ($p=20\%$, $t=15$ min) z modeli Bogdanowicz-Stachy (A) i PMAOTP dla stacji Warszawa-Okęcie – kwantyl opadu (B)
Capacity for rainfall of stormwater sewers in the area around Warsaw's Chopin Airport area ($p = 20\%$, $t = 15$ min) on the basis of the Bogdanowicz-Stachy model (A) and PMAOTP model for the Warsaw-Okęcie Station – rainfall quantile (B)



Ryc. 7. Studzienki kanalizacyjne na obszarze Lotniska Chopina, w których stwierdzono symulowane wylewy wód – punkty czerwone (brak wylewów – punkty niebieskie), w reakcji na opady z modelu Bogdanowicz-Stachy (A) i PMAxTP dla stacji Warszawa-Okęcie – kwantyl opadu (B)

Manholes in the vicinity of Chopin Airport reporting simulated rainwater overflows – red points (no overflows – blue points), in response to rainfall assessed using (A) the Bogdanowicz-Stachy model, and (B) the PMAxTP model for the Warsaw-Okęcie Station – rainfall quantile

kanalizacyjnej dla opadu z modelu PMAxTP – wartości kwantyla opadu wyznaczone dla stacji Warszawa-Okęcie, wylania występują w ok. 70 węzłach (ryc. 7B). 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.

Przeprowadzone analizy miały również na celu obliczenie, a następnie wzajemne porównanie wartości maksymalnego strumienia (natężenia) przepływu wody Q i objętości odpływu V w Potoku Służewieckim w przekroju poniżej Lotniska Chopina (zbiornika ZR5 – patrz ryc. 7), w reakcji na opady o prawdopodobieństwie $p=20\%$ i czasie trwania $t=15$ min wyznaczone różnymi metodami (tab. 2). Przyjmując za podstawę porównań wartości wymienionych charakterystyk fali wezbraniowej, uzyskane na podstawie symulacji hydrodynamicznych dla opadu z modelu PMAxTP – wysokości kwantyla opadu dla stacji Warszawa-Okęcie ($Q = 1,070 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $V = 57,6 \text{ tys. m}^3$), model Błaszczyka znacznie zaniża wartości przepływu maksymalnego i objętości ($Q = 0,392 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $V = 40,7 \text{ tys. m}^3$). W tym przypadku wartości przyjętej miary statystycznej – błędu względnego – wyznaczone względem wyników symulacji dla opadu z modelu PMAxTP, wynoszą odpowiednio 63,4 i 29,3%. Natomiast wartości analizowanych charakterystyk fali wezbraniowej uzyskane dla opadu z modelu Bogdanowicz-Stachy ($Q = 1,245 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $V = 61,7 \text{ tys. m}^3$) są wyższe niż w reakcji na opad PMAxTP. Tym razem wartości błędu względnego wynoszą -16,4 i -7,1%. Z kolei wartości przepływu i objętości, symulowane dla wysokości opadu odpowiadającej górnej granicy przedziału ufności z modelu PMAxTP ($Q = 1,249 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $V = 60,2 \text{ tys. m}^3$), są bardzo zbliżone do obliczonych za pomocą numerycznego modelu SWMM dla opadu

Tabela 2. Wartości charakterystyk dla przyjętych opadów i symulowanych fal wezbraniowych
Values of characteristics for the adopted levels of precipitation and simulated peak high-water

Metoda wyznaczenia opadu ($p=20\%$, $t=15$ min)	Wysokość opadu [mm]	Natężenie opadu [$\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$]	Przepływ maks. [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	Objętość odpływu [tys. m^3]
model Błaszczyka	11,88	132,0	0,392	40,7
model Bogdanowicz-Stachy	19,00	211,2	1,245	61,7
model PMAOTP – kwantyl – stacja Okęcie	16,32	181,4	1,070	57,6
model PMAOTP – górna gr. ufności – Okęcie	17,46	194,0	1,249	60,2
model PMAOTP – kwantyl – 22 komórki	16,21-16,42	180,1-182,5	1,053	57,4
model PMAOTP – kwantyl – stacja Bielany	15,85	176,1	0,935	55,8

z formuły Bogdanowicz-Stachy. Wynik symulacji przepływu wód przy obciążeniu zlewni opadami z modelu PMAOTP dla 22 komórek o powierzchni 1 km^2 ($Q = 1,053 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $V = 57,4$ tys. m^3), ze względu na bardzo małą ich przestrzenną zmienność na obszarze zlewni, jest zgodny z uzyskanym w reakcji na punktową wysokość opadu z modelu PMAOTP dla stacji Warszawa-Okęcie. Wartości błędu względnego, obrazujące różnicę między wielkościami przepływu maksymalnego i objętości odpływu wyznaczonymi w reakcji na opady z modelu PMAOTP dla stacji Warszawa-Okęcie i Warszawa-Bielany (położonej poza obszarem zlewni, w odległości ok. 13 km względem pierwszej z wymienionych stacji), wynoszą 12,6 i 3,1%. Warto zauważyć, że różnica między adekwatnymi wysokościami opadów dla tych stacji (punktów pomiarowych) wynosi jedynie 0,47 mm.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w pracy wyniki analiz, które obejmowały m.in. porównanie wysokości opadów o określonych charakterystykach (p w zakresie od 50 do 2% oraz t w przedziale od 5 do 4320 min) na podstawie najnowszych modeli PMAOTP względem wyznaczonych z dotychczas stosowanych modeli Błaszczyka i Bogdanowicz-Stachy, ustalenie przestrzennej zmienności opadów z modeli PMAOTP i weryfikację działania systemu kanalizacyjnego na obszarze Lotniska Chopina dla przyjętych opadów, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Opracowane w IMGW-PIB modele probabilistyczne opadów maksymalnych PMAOTP, dostępne na dedykowanej platformie internetowej (od roku 2022), stanowią źródło aktualnych, wiarygodnych lokalnych (w dowolnym punkcie na obszarze Polski) informacji w zakresie wysokości (natężenia jednostkowego) opadów maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia.
- Ze względu na przywołane w pracy wątpliwości dotyczące poprawności metody, jak i nieaktualności danych opadowych, należy przychylić się do stanowiska przedstawianego przez wielu badaczy, aby zaprzestać stosowania modelu opadowego Błaszczyka do projektowania systemów odwodnieniowych (kanalizacyjnych) na rzecz modelu PMAOTP.
- Wysokości (kwantyle) opadów z modelu probabilistycznego PMAOTP dla stacji Warszawa-Bielany charakteryzują się przeważnie niższymi wartościami w porównaniu

do korespondujących danych z historycznego już modelu probabilistycznego Bogdanowicz-Stachy (z okresu pomiarowego 1960-1990 dla regionu centralnego; wg metody AMP). Ponadto stwierdzono, że rozpatrywane wysokości opadów z modelu PMAOTP, ustalone dla górnego ograniczenia przedziału ufnosci, są na ogół również niższe od adekwatnych wartości z modelu Bogdanowicz-Stachy. Względne różnice są wówczas mniejsze. W pracy uznano, że bardziej miarodajne i wiarygodne są dane opadowe z najnowszego modelu PMAOTP (z okresu pomiarowego 1986-2015; wg metody POT).

- Przeprowadzone porównanie wysokości opadów z modeli PMAOTP, wyznaczonych dla jednej ze 100 stacji pomiarowych w projekcie PMAOTP (tj. stacji Warszawa-Bielany) oraz stacji synoptycznej Warszawa-Okęcie (oddalonej ok. 13 km) – w tym przypadku wyznaczonych w wyniku interpolacji danych ze stacji pomiarowych, wykazało, że korespondujące wartości są zbliżone do siebie. Stwierdzono również, że na obszarze badanej zlewni (o powierzchni 17,8 km²) występuje bardzo mała zmienność wartości kwantyla wysokości opadów w odniesieniu do rozpatrywanego deszczu ($p=20\%$, $t=15$ min). Świadczy to o tym, że do zasilania modelu hydrodynamicznego w badanej zlewni miejskiej można przyjmować wysokości opadów z modelu PMAOTP, oszacowane zarówno w wyniku interpolacji dla dowolnie wybranego punktu na obszarze zlewni, jak i bezpośrednio na podstawie wyników pomiarów z deszczomierza dla stacji Warszawa-Bielany.
- Znaczące różnice w wielkościach opadów z modeli PMAOTP występują między stacjami pomiarowymi Warszawa-Bielany i Świder, które oddalone są od siebie o ok. 27 km. Wysokości kwantyla opadów dla stacji Świder przewyższają korespondujące wartości górnej granicy przedziału ufnosci opadów dla drugiej z wymienionych stacji. Stwierdzone różnice w opadach potwierdzają, że stosowanie lokalnych modeli opadów maksymalnych do projektowania systemów kanalizacyjnych jest zasadne.
- W wyniku hydrodynamicznych symulacji w modelu SWMM wykazano, że rozpatrywane w pracy modele opadowe mają znaczący wpływ na wartość przepływu maksymalnego w badanej zlewni. Wartości strumieni przepływu wód (Q), symulowane przy obciążeniu zlewni opadem z historycznego już modelu Bogdanowicz-Stachy, są większe niż w wariancie dla opadu z kwantyla modelu PMAOTP (odpowiednio 1,245 i 1,070 m³·s⁻¹), ale już dla górnej granicy przedziału ufnosci modelu PMAOTP – mniejsze (1,245 i 1,249 m³·s⁻¹). Na tym tle bardzo odstaje wartość przepływu uzyskana w reakcji na opad z historycznego modelu Błaszczyka (0,392 m³·s⁻¹). Ponadto stwierdzono działanie pod ciśnieniem określonych kanałów deszczowych i możliwość występowania krótkotrwałych wylewów na obszarze Lotniska Chopina. Tym samym wykazano, że weryfikacja sprawności hydraulicznej systemów kanalizacyjnych przy zastosowaniu modelu hydrodynamicznego jest uzasadniona.

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródła, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

Informacja dotycząca danych opadowych z modelu PMAOTP:

Źródłem pochodzenia danych jest Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy. Dane pochodzą ze strony <https://klimat.imgw.pl/opady-maksymalne>. Dane Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego pochodzące ze strony <https://klimat.imgw.pl/opady-maksymalne> zostały przetworzone.

Informacja dotycząca danych radarowych z produktu PAC:

Źródłem pochodzenia danych jest Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej — Państwowy Instytut Badawczy.

Dane Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej — Państwowego Instytutu Badawczego zostały przetworzone.

Piśmiennictwo

- Barszcz, M. (2017). Zastosowanie modelu SWMM do obliczenia przepływów i ich redukcji przez zbiorniki na obszarze Lotniska Chopina. *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, 16(1), 79-91. <https://doi.org/10.22630/ASPA.2017.16.1.08>
- Barszcz, M. (2022). Ocena przydatności disdrometru laserowego i radaru meteorologicznego do szacowania wielkości opadów deszczu. *Przegląd Geograficzny*, 94(4), 451-470. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2022.4.3>
- Barszcz, M. (2024). Modelowanie hydrodynamiczne dużego systemu kanalizacji deszczowej — na przykładzie Lotniska Chopina w Warszawie. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2, 18-24. <https://doi.org/10.15199/17.2024.2.3>
- Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J.D., & Obled, C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299 (3-4), 166-179. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.002>
- Bisht, D.S., Chatterjee, C., Kalakoti, S., Upadhyay, P., Sahoo, M., & Panda, A. (2016). Modelling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study. *Natural Hazards*, 84, 749-776. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2455-1>
- Błaszczak, W., Stamatello, H., & Błaszczak, P. (1983). *Kanalizacja*. Warszawa: Wydawnictwo Arkady.
- Bogdanowicz, E., & Stachý, J. (1998). *Maksymalne opady deszczu w Polsce — charakterystyki projektowe*. Materiały badawcze IMGW. Seria Hydrologia i Oceanologia, 23. Warszawa: IMGW.
- Ciepielowski, A., & Dąbkowski, S.L. (2006). *Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami)*. Bydgoszcz: Oficyna Wydawnicza Projprzem Eko.
- Kaźmierczak, B., Kotowski, A., & Dancewicz, A. (2012). Weryfikacja metod wymiarowania kanalizacji deszczowej za pomocą modelu hydrodynamicznego (SWMM) w warunkach wrocławskich. *Ochrona Środowiska*, 34(2), 25-31.
- Kotowski, A. (2011). *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów*. Lublin: Wydawnictwo Seidel-Przywecki.
- Kotowski, A., Kaźmierczak, B., & Dancewicz, A. (2010). *Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji*. Warszawa: Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN.
- Kotowski, A., Kaźmierczak, B., & Licznar, P. (2018). Wybrane problemy projektowania i modelowania odwodnienia terenów. *Instal*, 5, 39-44.
- Kotowski, A., Kaźmierczak, B., Wartalski, A., & Cieślik, W. (2013). Modelowanie hydrodynamiczne kanalizacji deszczowej na osiedlu Rakowiec we Wrocławiu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 3, 113-119. <https://doi.org/10.15199/17.2018.7.4>
- Licznar, P., Siekanowicz-Grochowina, K., Oktawiec, M., Kotowski, A., & Burszta-Adamiak, E. (2018). Empiryczna weryfikacja formuły Błaszczaka do obliczania wartości natężenia deszczu miarodajnego. *Ochrona Środowiska*, 40(2), 17-22.
- Licznar, P., & Zaleski, J. (2020) (red.). *Metodyka opracowania polskiego atlasu natężeń deszczów (PANDa)*. Warszawa: IMGW-PIB.

- Ozga-Zieliński, B. (red.). (2022). *Modele probabilistyczne opadów maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia – projekt PMAxTP*. Warszawa: IMGW-PIB.
- PANDa. (2019). *Polski Atlas Natężeń Deszczów*. Pobrane z: <https://atlaspanda.pl> (01.03.2019).
- PMAxTP. (2022). *Model probabilistyczny opadów Precipitation MAXimum Time (duration) Probability*. Warszawa: IMGW-PIB. Pobrane z: <https://klimat.imgw.pl/opady-maksymalne> (26.03.2024).
- PN-EN 752:2017. (2017). *Drain and sewer systems outside buildings – Sewer systems management (Zewnętrzne systemy odwadniające i kanalizacyjne – Zarządzanie systemem kanalizacyjnym)*. Warszawa: PKN.
- Pozwolenie wodnoprawne. (2017). *Pozwolenie wodnoprawne na wprowadzanie wód opadowych i roztopowych z terenu Lotniska im. F. Chopina do Potoku Służewieckiego (decyzja nr 119/17/PZ.W)*. Marszałek województwa mazowieckiego.
- Rossmann, L., & Simon, M. (2022). *Storm Water Management Model. User's Manual Version 5.2*. Cincinnati: Center for Environmental Solutions and Emergency Response, U.S. Environmental Protection Agency.
- SWMM. (2023). *Storm Water Management Model*. U.S. Environmental Protection Agency. Pobrane z: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (07.08.2023).
- Tuszyńska, I. (2015). *Rozwój meteorologii radarowej w Polsce*. Warszawa: IMGW-PIB.
- Wawrzyniak, M., & Wdowikowski, M. (2023). Modelowanie intensywnych opadów deszczu w zlewni miejskiej na przykładzie Szczecina. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 07-08, 22-30. <https://doi.org/10.15199/17.2023.7.4>.
- Wdowikowski, M., Wartalska, M., Kaźmierczak, B., & Kotowski, A. (2023). Zasady formułowania probabilistycznych modeli deszczów maksymalnych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 1, 22-29. <https://doi.org/10.15199/17.2023.1.4>.
- Węglarczyk, S. (2013). O poprawności wzorów Błaszczyka na obliczanie opadów miarodajnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 3(4), 63-76.
- Zawilski, M., & Sakson, G. (2011). Modelowanie spływu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. Część II. Weryfikacja modelu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 9, 321-332.

Summary

Accurate determination of amounts of rainfall in a catchment area, in the context of duration and exceedance probability, forms the basis for the design and verification of drainage (sewerage) systems in cities, and for stormwater management based on hydrodynamic models. Existing rainfall models are the ones used most commonly in supplying simulation models. The development and implementation of PMAxTP models by Poland's Institute of Meteorology and Water Management (IMGW-PIB) in 2022 (based on rainfall data from 100 rain gauges from the period 1986-2015), covering the entire territory of Poland, has ensured free access to current and reliable information regarding local maximum amounts of rainfall (unit intensities). This study presents the results of analyses comparing rainfall amounts with specific characteristics (durations ranging from 5 to 4320 minutes and probabilities from 2 to 50%), as determined using the probabilistic PMAxTP model for the Warsaw-Bielany Meteorological Station, as set against corresponding values from the Błaszczyk and Bogdanowicz-Stachý models used commonly in Poland. Given doubts cited in the study as regards correctness of method and data, it is advisable to extend support

to a position presented by various researchers, that the Błaszczyk model for the design of sewer systems be discontinued. On the other hand, in general the maximum amounts of rainfall (quantiles) from the probabilistic PMAOTP model for the Warsaw-Bielany Station are seen to exhibit lower values as compared with corresponding data from the probabilistic Bogdanowicz-Stachý model (for the central region), for rainfall durations ranging from 15 to 1440 minutes, and for all assumed levels of probability of rainfall. The differences between amounts of rainfall predicted by the two models do achieve significance in some cases. The authors also found that the amounts of rainfall considered from the PMAOTP model in relation to the upper confidence interval are also lower than the corresponding values from the Bogdanowicz-Stachý model, where rainfall duration is in the 15- to 720-minute range (denoting the values used most commonly in practice). In such a situation, use of the PMAOTP model for the Warsaw-Bielany Station in the designing of a sewer system would generally suggest lower diameters of pipe than would the values obtained using the Bogdanowicz-Stachý model. The advice is thus for the modelling of drainage systems for other areas of Poland to first compare amounts of rainfall from the PMAOTP model with data from other (including local) rainfall models. Our analyses also included verification as to the spatial variability of rainfall from the PMAOTP models, in relation to the performance of the sewer system in the area around Warsaw's Chopin Airport. Equally, corresponding values were found to be similar in a comparison of amounts of rainfall suggested by the PMAOTP model for one of that project's 100 measurement stations (i.e. Warsaw-Bielany) and the synoptic Warsaw-Okęcie Station (approximately 13 km away, and located within the studied catchment area of Warsaw's Potok Służewiecki) – in this case determined through interpolation of data from measurement stations. The studied catchment area of 17.8 km² was also found to be characterised by minimal variability in the quantile values for rainfall with the rainfall event considered ($p=20\%$, $t=15$ min). However, significant differences in amounts of rainfall generated by the PMAOTP models are to be observed between the Warsaw-Bielany and Świder measurement stations, located about 27 km apart. The quantile rainfall amounts for the Świder Station exceed the corresponding upper confidence-interval rainfall values for the Warsaw-Bielany Station. These differences in rainfall confirm that the use of local maximum-rainfall models in designing sewer systems is justified. Hydrodynamic simulations in the SWMM model determined that choice of rainfall models adopted impacted significantly on maximum values for flows in the catchment studied. The flows obtained under the catchment loading with the Bogdanowicz-Stachý model are substantially greater than those from the PMAOTP model; while the value obtained in response to rainfall using the Błaszczyk model stands out significantly. Information was further obtained concerning overloads in specific stormwater drains in the vicinity of Chopin Airport, as well as rainwater overflows from that area's network of drains. All of this denotes the wisdom and justification of the hydraulic efficiency of systems of sewers and drains being verified using a hydrodynamic model.