

Modelowanie intensywnych opadów deszczu w zlewni miejskiej na przykładzie Szczecina

Heavy rainfall modeling in an urban catchment area on the example of Szczecin

Magda Wawrzyniak, Marcin Wdowikowski^{*)}

Słowa kluczowe: hydrologia miejska, modele fizyczne, opady intensywne, modelowanie deszczów maksymalnych

Streszczenie

Modelowanie intensywnych opadów deszczu o zadanej wysokości oraz prawdopodobieństwie wystąpienia jest jednym z największych wyzwań hydrologii miejskiej, a w szczególności bezpiecznego odwadniania terenów, przede wszystkim z uwagi na losowy charakter występowania opadów atmosferycznych jako elementów meteorologicznych. Dostęp do danych meteorologicznych w Polsce przez wiele lat był istotną przeszkodą w procesie aktualizacji wiedzy i narzędzi służących w projektowaniu systemów racjonalnego gospodarowania wodami opadowymi i roztopowymi. W niniejszej pracy przedstawiono procedurę opracowania prostego modelu opadowego, umożliwiającego wyznaczenie charakterystyk projektowych intensywnych opadów deszczu, przy minimalnym dostępie do danych pomiarowych. Metodę przedstawiono na podstawie otwartych danych meteorologicznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego, z lat 1986–2015, na przykładzie Szczecina. Zaprezentowana metoda ma charakter uniwersalny, skalowalny dla dowolnej miejscowości, a jej wyniki zostały porównane z dostępnymi dotychczas rozwiązaniami i metodami takimi jak model Błaszczyka, model IMGW (Bogdanowicz–Stachy), atlas PANDa czy dostępne dla Szczecina wyniki niemieckiego modelu DWD KOSTRA. W wyniku analizy porównawczej zauważono, że opracowane modele fizyczne dają najlepsze spośród badanych rozwiązań wyniki, dla opadów występujących najczęściej $C = 1$ oraz $C = 2$ lata. Dla pozostałych częstości $C = 5$, $C = 10$ i $C = 30$ lat, opracowane autorską metodą modele dały się wyprzedzić wynikiem jedynie modelom probabilistycznym atlasu PANDa.

Keywords: urban hydrology, physical models, heavy rainfall, modeling of maximum rainfall

Abstract

Modeling intense rainfall of a given height and probability of occurrence is one of the greatest challenges of urban hydrology, and in particular safe drainage of areas, primarily due to the random nature of precipitation as meteorological elements. Access to meteorological data in Poland for many years was a significant obstacle in the process of updating knowledge and tools used in the design of systems for rational rainwater and snowmelt management. This paper presents a procedure for developing a simple precipitation model that enables the determination of the design characteristics of heavy rainfall with minimal access to measurement data. The method was presented on the basis of open meteorological data of the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute, from the years 1986–2015, on the example of Szczecin. The presented method is universal and scalable for any locality, and its results have been compared with the solutions and methods available so far, such as the Błaszczyk model, the IMGW (Bogdanowicz–Stachy) model, the PANDa atlas or the results of the German DWD KOSTRA model available for Szczecin. As a result of the comparative analysis, it was noticed that the developed physical models give the best results among the tested solutions, for precipitation occurring most often at $C = 1$ and $C = 2$ years. For the remaining frequencies of $C = 5$, $C = 10$, and $C = 30$ years, the models developed using the original method could be outpaced only by the probabilistic models of the PANDa atlas.

1. Wprowadzenie

W świetle postępujących zmian klimatycznych modelowanie intensywnych opadów deszczu, stanowiące część systemu zagospodarowania wód opadowych, szczególnie w obszarach zurbanizowanych, stało się istotnym wyzwaniem współczesnego świata. W modelowaniu matematycznym zmiennych elementów środowiska, kluczowy jest dostęp do rzetelnych danych pomiarowych, które służą do opisu obserwowanych zjawisk i weryfikacji opracowanych zależności. W środowisku inżynierskim istotne jest aby rozwiązania techniczne, wynikające z badań naukowych,

były możliwe do zastosowania w praktyce. Niedosyt informacji o warunkach opadowych w Polsce oraz niewielka dostępność do narzędzi, umożliwiających uzyskanie rzetelnych informacji do projektowania systemów odwodnienia terenów w ostatnich dziesięcioleciach, przyczynił się do stosowania nieaktualnych już rozwiązań, a w szczególności takich, które nie uwzględniają zmian klimatycznych.

Na przestrzeni ostatniej dekady, modelowanie opadów stało się popularnym przedmiotem badań. Nie oznacza to, że wcześniej nie interesowano się tym tematem, jednak intensywny rozwój miast w ostatnich dziesięcioleciach, a co za tym idzie zwiększone

^{*)} Magda Wawrzyniak, Marcin Wdowikowski, Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Wodociągów i Kanalizacji, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27 50-370 Wrocław, e-mail: marcin.wdowikowski@pwr.edu.pl

zapotrzebowanie na efektywne zarządzanie wodami opadowymi i systemami odwodnienia spowodował konieczność podjęcia nowych badań w tym zakresie. Do dzisiaj nie powstała jedna, spójna definicja określająca tak szerokie zagadnienie jakim jest modelowanie opadów deszczu, głównie z uwagi na mnogość podejść do tego skomplikowanego zadania, jednak najczęściej model opadu lub formułę opadową należy rozumieć jako funkcję natężenia deszczów miarodajnych, zależnych od czasu ich trwania, uzależniając wszystko od prawdopodobieństwa wystąpienia lub okresu powtarzalności [9].

Modelowanie matematyczne opadów złożone jest z kilku etapów, tworzących cały proces. Pierwszym z tych etapów jest zmierzenie wysokości opadów. [4,9]. Pomiaru te najczęściej prowadzone są w trybie 24 – godzinny, przy czym istotna jest rozdzielczość pięciu lub nawet jedno minutowa. Wyniki z pomiarów powinny być pobierane z odpowiednio długiego okresu czasu, najlepiej 30 lat, stanowiących wielolecie klimatologiczne, a pomiary muszą spełniać międzynarodowe standardy jakościowe, np. standardy Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO) [9]. Duża ilość wyników pozwala zbadać powtarzalność i cykliczność opadów. Następnym etapem jest analiza i opracowanie wyników (odczytów) oraz dopasowanie ich do znanych rozkładów matematycznych, dokładniej do rozkładów zmiennych losowych. Takie działania mają na celu możliwość przewidzenia wielkości i częstotliwości opadów pojawiających się w przyszłości [5]. Informacje te determinują dobór kubatury projektowanych urządzeń, tj. zbiorniki retencyjne oraz przekrojów kanałów. Dodatkowo na podstawie badań można zweryfikować poprawność inżynierskich rozwiązań obiektów nowoprojektowanych oraz modernizacji sieci [8].

Modelowanie, poza dopasowaniem do odpowiednich wzorców opadowych, musi bazować na wiarygodnych źródłach, jest to kolejny z wymogów modelowych. Wiarygodne źródła w tym przypadku oznaczają aktualne, lokalne dane opadowe zebrane z kilku miejsc. Jeszcze niedawno dane do modelowania przyjmowało się z najbliższych stacji meteorologicznych. Stacje często sytuowane były poza centrum miasta lub w innych pobliskich miejscowościach, a odczyty wykonywano z jednego deszczomierza. Można się domyślać, że w takich przypadkach opis pola opadowego był niepełny. Dowodem na to może być jedno z badań z 2015 r., które przeprowadzono na 25 deszczomierzach zlokalizowanych na jednej warszawskiej sieci. Okazuje się, że opady występujące w centrum miasta znacznie różnią się od tych poza nim [9]. Obecnie korzysta się ze znacznie większej ilości jednostek pomiarowych. Według IMGW-PIB w 2016 r. sieć deszczomierzy telemetrycznych w Polsce obejmowała blisko 500 posterunków. W każdym z nich zlokalizowane były dwa czujniki. Dodatkowo sieć radarów meteorologicznych na ten rok złożona była z ośmiu urządzeń tej samej klasy, co pozwoliło minimalizować możliwość powstawania istotnych różnic w uzyskiwanych wynikach. Również wtedy planowano budowę kolejnych dwóch radarów [14]. Nie wolno także zapominać o odniesieniu wyników do warunków klimatycznych, bowiem maksyma opadów są ściśle związane i uzależnione od klimatu w danym punkcie na mapie. Z racji widocznych zmian klimatu, istotne jest także systematyczne aktualizowanie rejestracji oraz poszerzanie obszarów badań.

Narzędziem umożliwiającym inżynierowi zorientowanie się na bezpieczne projektowanie systemu odwodnienia jest niewątpliwie analiza częstości występowania intensywnych opadów deszczu, względnie dopuszczalnych częstości wylewów w modelowanym systemie. Przykładowe lokalizacje wraz z kryteriami projektowymi zawiera norma PN-EN 752:2017, której częstość wylewów oraz stopień zagrożenia na projektowane urządzenia zestawiono w tab. 1 [13].

Tabela 1. Kryteria projektowe kanalizacji ze względu na zagrożenia wylewami wg PN-EN752:2017

Table 1. Design criteria for sewers due to spill hazards according to PN-EN752:2017

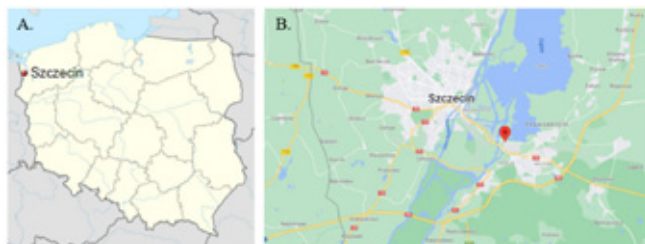
Stopień zagrożenia	Przykładowe lokalizacje	Dopuszczalna częstość wylewów, [1 raz na C lat]	Prawdopodobieństwo
Bardzo mały	Drogi lub otwarte przestrzenie z dala od budynków	1	1,0
Mały	Tereny rolnicze (w zależności od użytkowania, np. pastwiska, grunty orne)	2	0,50
Mały do średniego	Otwarte przestrzenie wykorzystywane do celów publicznych	3	0,30
Średni	Drogi lub otwarte przestrzenie w pobliżu budynków	5	0,20
Średni do wysokiego	Zalania zamieszkałych budynków z wyłączeniem piwnic	10	0,10
Wysoki	Zalania zamieszkałych piwnic lub przejazdów pod ulicami	30	0,03
Bardzo wysoki	Infrastruktura krytyczna	50	0,02

Z tab. 1. można odczytać, że najistotniejsze, pod kątem modelowania opadów, częstości występowania opadów, bądź wylewów, będą dotyczyły najczęściej używanych elementów infrastruktury o niskim wpływie, jak drogi, dla $C = 1, 2, 5, 10$ lub o wysokim wpływie, jak piwnice czy infrastruktura krytyczna dla $C = 30$ i 50 . Badania w kierunku intensywności opadów częściowo zostały wymuszone przez poszerzającą się urbanizację miast i terenów pozamiejskich. Utwardzanie i uszczelnianie coraz większych powierzchni, a także ingerencja w przyrodę i przekształcanie terenów podmiejskich mają istotny wpływ na tzw. „obieg wody” w przyrodzie. Jako utwardzanie i uszczelnianie rozumie się wszelkie powstające inwestycje (budynki, chodniki, deptaki, parkingi, drogi, przejazdy, place zabaw, itd.). Każde działanie powodujące zmniejszenie powierzchni naturalnych mimo tego, iż jest pod kontrolą instytucji prawnych, planistycznych, znacznie utrudnia infiltrację i spływ wód powierzchniowych, co w konsekwencji prowadzi do konieczności odbioru i transportu tych wód przez sieci [4,6]. Równocześnie z rozwojem cywilizacji obserwuje się postępujące ocieplenie klimatu. Od kilkunastu lat naukowcy śledzą zmiany zachodzące w atmosferze oraz ich wpływ na planetę. Udowodniona została zależność, że na ocieplenie klimatu znaczący wpływ mają działania antropogeniczne, a wraz ze wzrostem temperatury obserwuje się większe i częstsze opady atmosferyczne. Dodatkowo wzrasta liczba i częstotliwość skrajnych zjawisk pogodowych. Najbardziej zauważalne są zmiany w strukturze opadów, powodujące przegrupowanie na krótkie intensywne epizody o natężeniu ponad 20 mm na godzinę (ponad 20 mm na dobę) [4,6].

Wobec powyższego nadrzędnym celem niniejszej pracy było opracowanie autorskich, fizykalnych modeli opadowych dla miasta Szczecina, które do tej pory nie posiadało dedykowanej formuły opadowej. Podstawą opracowania były wysokości opadów pochodzące z państwowej sieci podstawowej IMGW-PIB z okresu 1986–2015. Zaproponowane rozwiązanie ma umożliwiać, we względnie prosty sposób, przy dostępie do odpowiednich danych opadowych, opisanie intensywnych opadów deszczu dla dowolnego czasu trwania i częstości ich występowania. W pracy porównano wartości rzeczywistych danych opadowych z wynikami powszechnie stosowanych formuł opadowych i atlasów opadowych.

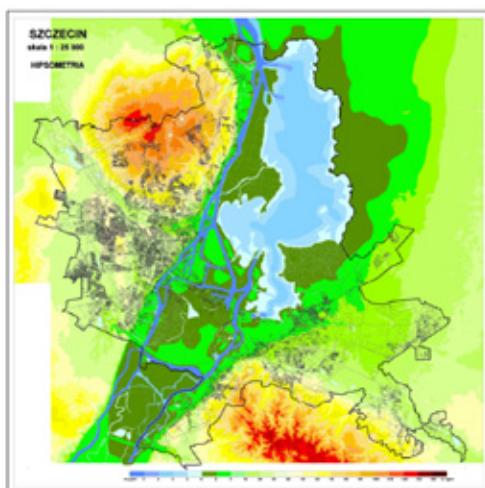
2. Obszar badań i materiał źródłowy

Jako obszar badawczy do przeprowadzenia analiz, związanych z modelowaniem intensywnych opadów deszczu, przyjęto teren miasta Szczecin, które jest największym miastem województwa zachodniopomorskiego i zarazem jego stolicą. Szczecin położony jest w strefie nadgranicznej z Republiką Federalną Niemiec w pobliżu ujścia rzeki Odry (rys. 1. A.). Powierzchnia miasta wynosi 300,55 km², przy czym 120,28 km² stanowią grunty pokryte wodą. Miasto leży na czterech mezoregionach tj. Dolina Dolnej Odry, Równia Goleniowska, Wzniesienia (Wzgórza) Szczecińskie oraz Wzgórza Bukowe. Wymienione miejsca wchodzi w skład jedenastu mezoregionów, tworzących makroregion Pobrzeża Szczecińskiego. Zróżnicowanie wysokościowe terenów Szczecina przedstawia rys. 2 [3].



Rys. 1. Lokalizacja Szczecina w Polsce (A.) [3] Lokalizacja stacji meteorologicznej IMGW-PIB w Szczecinie (B.) [opracowano na podstawie portalu google maps]

Fig. 1. Location of Szczecin city in Poland (A.) [3] Location of the IMGW-PIB meteorological station in Szczecin [developed on the basis of google maps]

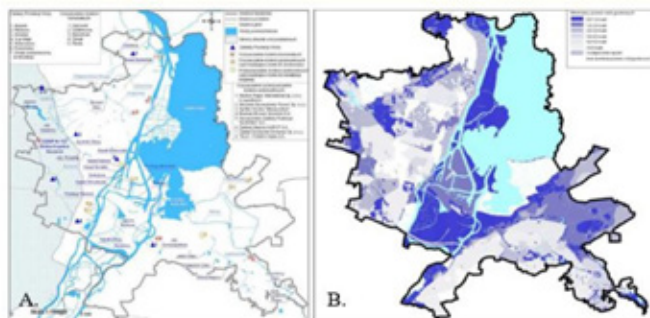


Rys. 2. Hipsometria Szczecina – rysunek pochodzi z opracowania [3]

Fig. 2. Hypsometry of Szczecin – drawing comes from the study [3]

Istotnym elementem hydrograficznym zlewni miejskiej Szczecina jest wspomniana rzeka Odra, która do miasta dopływa dwoma nurtami: Odrą Wschodnią tzw. Regalicą (nurt wschodni) oraz Odrą Zachodnią (nurt zachodni). Zlewnia Odry Wschodniej w granicach administracyjnych miasta osiąga długość ok. 13 km i średnią głębokość 7 m, a Odrą Zachodniej ok. 19,5 km długości i głębokość wahającą się od 5–10 m. Dolina Dolnej Odry obejmuje środkową część miasta, jej szerokość w tej okolicy wynosi blisko 10 km. Szczecin, z racji położenia geograficznego, ma kilka zlewni miejskich. Poza Odrą wyróżnia się także rzekę Płonię i jezioro Dąbie. Dodatkowo w granicach Szczecina znajduje się kilka zbiorników wód stojących, tj. jezioro Głębokie, jezioro Dąbie, jezioro Szmaragdowe, jezioro Słoneczne oraz jezioro Rusalka (rys. 3). Takie położenie oraz bliskość morza Bałtyckiego (ok. 60 km w linii prostej) i Zalewu Szczecińskiego (30 km) podkreśla wyjątkowość klimatu, który cechuje się łagodnymi zimą i dość chłodnymi, wilgotnymi porami letnimi.

Bogaty system hydrograficzny oraz obecność zbiorników wodnych silnie koresponduje z wysokim poziomem wód gruntowych co przedstawiono na rys. 3.B. [3].



Rys. 3. System hydrograficzny oraz najważniejsze obiekty gospodarki wodno-ściekowej Szczecina (A.), poziom wód gruntowych (B.) [3]

Fig. 3. Hydrographic system and the most important water and sewage management facilities of Szczecin (A.), groundwater level (B.) [3]

W pracy wykorzystano dane opadowe ze stacji meteorologicznej IMGW-PIB w Szczecinie, które dostępne są w otwartym repozytorium danych publicznych poprzez stronę internetową: <https://danepubliczne.imgw.pl>.

Stacja meteorologiczna w Szczecinie zlokalizowana jest przy lotnisku aeroklubowym, w południowej części jeziora Dąbie. Jest to stacja synoptyczna I rzędu, mająca etatową obsługę obserwatorów meteorologicznych oraz wyposażona jest w automatyczne urządzenia pomiarowe, rejestrujące podstawowe elementy meteorologiczne, wymagane w standardowym programie pomiarowym WMO, umożliwiające opracowanie wysokiej jakości danych oraz międzynarodowej depeszy meteorologicznej SYNOP, takie jak: opad atmosferyczny, temperatura powietrza na wysokości 2 m oraz przy gruncie, wilgotność powietrza, prędkość i kierunek wiatru, ciśnienie atmosferyczne, widzialność czy nasłonecznienie. Współrzędne stacji meteorologicznej wynoszą 53°23'43.0"N 14°37'22.0"E (w układzie dziesiętnym: 53.395278, 14.622778). Stacja pomiarowa jest położona na wysokości 1 m n.p.m., a według międzynarodowej nomenklatury WMO posiada identyfikator 12205. Lokalizację stacji ilustruje rys. 1.B.

3. Metodyka

W pracy porównano wyniki modeli Błaszyka [1], Bogdanowicz-Stachy (nazywanego również modelem IMGW) [2], autorskich modeli fizykalnych oraz wyniki atlasów opadowych niemieckiej służby meteorologicznej KOSTRA-DWD [11] i polski atlas PANda [9].

3.1 Dane pluwiograficzne

Analizę danych pluwiograficznych, do konstrukcji fizykalnych modeli opadowych, oparto na wynikach przedziałowych wysokości opadów wyselekcjonowanych z danych minutowych dla stacji IMGW-PIB w Szczecinie z 30 lat w okresie 1986–2015. Jako wartości maksymalne przyjmowano wartości roczne, zgodnie z metodą AMS (ang. annual maximum series). Przedziałowe wysokości opadów obejmowały 16 czasów trwania opadów: 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 360, 720, 1080, 1440, 2160, 2880, 4320 minut. W pracy wykorzystano przedziałowe wysokości opadów dla następujących częstości $C = 1, 2, 5, 10$ i 30 lat. Przedziałowe wysokości opadów maksymalnych zebrano w tab. 2. Dane opadowe, niezbędne do wyliczenia rocznego opadu normalnego w modelu Błaszyka, obejmowały również okres 1986–2015, aby uzyskać możliwie zbliżone warunki do porównania wyników.

Tabela 2. Przedziałowe wysokości opadów maksymalnych dla Szczecina (h_{max})
 Table 2. Partial duration series of maximum rainfall for Szczecin (h_{max})

t, min	C				
	1	2	5	10	30
5	3,2	3,4	4,1	5,0	15,8
10	5,3	5,5	5,8	7,3	21,4
15	5,5	5,8	7,4	9,0	23,1
30	5,8	7,0	9,5	11,1	27,5
45	5,8	7,5	10,6	12,0	27,5
60	6,2	8,0	10,9	13,1	27,5
90	9,0	9,4	12,0	13,7	30,3
120	9,8	11,0	13,4	15,1	31,1
180	12,6	12,9	14,4	18,5	35,2
360	14,7	17,5	18,3	19,9	42,5
720	17,6	18,9	20,8	25,0	47,1
1080	17,9	21,5	23,9	27,1	48,5
1440	19,4	21,5	24,4	27,3	50,2
2160	19,8	22,0	25,2	31,3	56,2
2880	22,9	24,0	25,3	32,2	73,1
4320	22,9	26,4	28,7	35,9	81,6

3.2 Procedura konstrukcji fizykalnego modelu opadowego

Autorskie modele fizykalne opadów maksymalnych tworzone w oparciu o metodykę przedstawioną przez Kotowskiego z zespołem [5]. W założeniu opiera się ona na podejściu Błaszczyka i Chomicza, w którym metodą najmniejszych kwadratów poszukiwana jest najlepiej dopasowana do danych pomiarowych funkcja wykładnicza, która przyjmuje postać uogólnioną:

$$h_{max}(t, C) = a(C) \cdot t^{n(C)} \quad (1)$$

przy czym:

t – czas trwania deszczu, min

h_{max} – maksymalna wysokość deszczu w funkcji prawdopodobieństwa p lub częstości C oraz czasu trwania deszczu t , mm

C – bezwymiarowy okres powtarzalności (częstość) występowania opadów deszczu

a, n – parametry równania wykładniczego

Modele opadowe opisane w literaturze bardzo często mają różną formę i wymagają przekształceń. Dobrym przykładem jest model Bogdanowicz-Stachy, który wykorzystuje czas trwania opadu t oraz prawdopodobieństwo przewyższenia p . W odniesieniu do modelu Błaszczyka, który oparty jest o częstość występowania opadu, niezbędne jest wykonanie przeliczenia częstości na prawdopodobieństwo lub na odwrót wg poniższej zależności [5,7,16]:

$$p = \frac{1}{C} \quad (2)$$

przy czym:

p – prawdopodobieństwo, %

C – częstość występowania opadu, –

Wobec powyższego wszystkie zaprezentowane modele fizykalne opracowano w oparciu o jeden schemat, który obejmował:

1. uszeregowanie danych pomiarowych maksymalnych rocznych wysokości opadu w macierz szeregów rozdzielczych, gdzie każdy szereg obejmuje 30 elementów odpowiadających liczbie lat analizowanego okresu; wybrane elementy przedstawia tab. 3,

2. przypisanie każdemu elementowi empirycznego prawdopodobieństwa wystąpienia definiowanego w następujący sposób:

$$p_{emp} = \frac{m}{N} \quad (3)$$

przy czym:

p_{emp} – prawdopodobieństwo empiryczne, –

m – kolejny element szeregu rozdzielczego dla $m = 1$ do N

N – Liczba wszystkich elementów zbioru danych pomiarowych, dla okresu 1986–2015 $N=30$

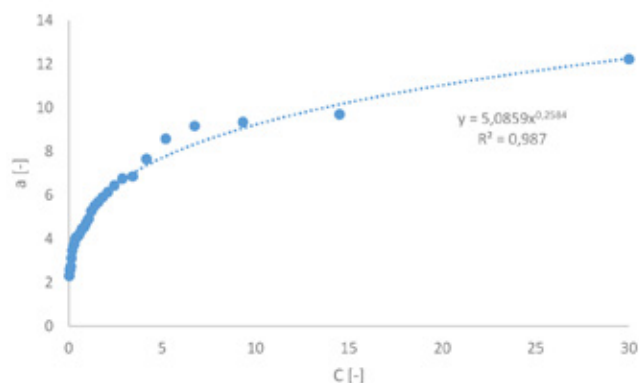
3. przypisanie każdemu elementowi prawdopodobieństwa empirycznego p_{emp} częstości obliczeniowej C wg zależności (2),
4. wyznaczenie równania wykładniczego typu $h_{max}=a \cdot t^n$ dla każdego elementu szeregu rozdzielczego z przedziałowych wysokości opadu (uzyskano 30 funkcji dla każdego m , dla których odczytano wartości parametrów a, n oraz współczynnik determinacji R^2),
5. otrzymane parametry a i n , współczynniki determinacji oraz częstość obliczeniową C zestawiono w tab. 3,

Tabela 3. Wyniki estymacji wartości współczynników a i n równania h_{max} dla 30 elementowej serii czasowej

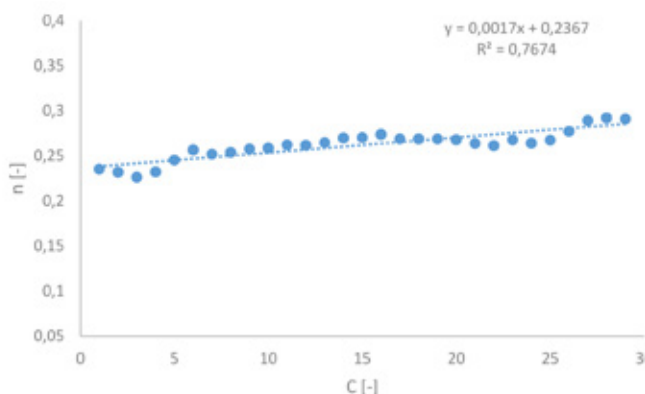
Table 3. Results of estimation of the values of the coefficients a and n of the h_{max} equation for a 30-element time series

m	C	n	R^2	a
1	30,00	0,2091	0,968	12,223
2	15,00	0,2352	0,934	9,6874
3	10,00	0,2318	0,929	9,3346
4	7,50	0,2263	0,933	9,1588
5	6,00	0,2322	0,944	8,5761
6	5,00	0,2453	0,941	7,6519
7	4,29	0,2565	0,942	6,8507
8	3,75	0,2518	0,941	6,7469
9	3,33	0,2537	0,952	6,4339
10	3,00	0,2575	0,943	6,1318
11	2,73	0,2585	0,947	5,9008
12	2,50	0,2622	0,949	5,6785
13	2,31	0,2617	0,957	5,4904
14	2,14	0,2646	0,959	5,2706
15	2,00	0,2696	0,977	4,9125
16	1,88	0,2702	0,982	4,7259
17	1,76	0,2737	0,984	4,5289
18	1,67	0,2688	0,977	4,4483
19	1,58	0,2686	0,978	4,3041
20	1,50	0,2686	0,979	4,1631
21	1,43	0,2677	0,979	4,0979
22	1,36	0,2637	0,976	4,0733
23	1,30	0,2613	0,970	3,9627
24	1,25	0,2676	0,967	3,7324
25	1,20	0,264	0,961	3,6642
26	1,15	0,2673	0,968	3,4516
27	1,11	0,2773	0,972	3,1124
28	1,07	0,2891	0,975	2,7337
29	1,03	0,2920	0,976	2,5734
30	1,00	0,2907	0,961	2,3073

6. przedstawienie parametrów a i n w funkcji częstości obliczeniowej C jako $a(C)$ oraz $n(C)$, co przedstawiono na rys. 4 i 5,

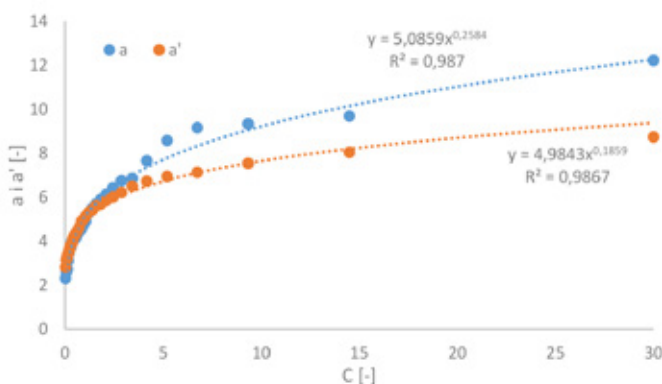


Rys. 4. Trend zmian wartości parametru a w funkcji C obliczeniowego
Fig. 4. Trend of changes in the value of parameter a as a function of calculated C



Rys. 5. Trend zmian wartości parametru n w funkcji C obliczeniowego
Fig. 5. Trend of changes in the value of parameter n as a function of calculated C

7. ze względu na niewielkie zróżnicowanie parametru n , uśrednienie do wartości $n = 0,2602$,
8. wyznaczenie nowych wartości parametru a jako a' , stosując funkcję wykładniczą $h_{max} = a \cdot t^n$ ze zdefiniowanym parametrem $n = 0,2602$ (wyniki parametru a' przedstawiono w tabeli 6, a porównanie parametrów $a(C)$ oraz $a'(C)$ na rys. 6),



Rys. 6. Trend zmian wartości parametrów a oraz a' w funkcji C obliczeniowego
Fig. 6. Trend of changes in the values of parameters a and a' in the function of C calculation

Tabela 6. Wyniki ponownej estymacji wartości współczynników a' i n równania h_{max} dla 30 elementowej serii czasowej

Table 6. Results of reestimation of the values of the coefficients a' and n of the h_{max} equation for a 30-element time series

m	C	n	a'	R^2
1	30,00	0,2602	8,7332	0,937
2	15,00		8,0423	0,940
3	10,00		7,5389	0,931
4	7,50		7,1280	0,930
5	6,00		6,9447	0,941
6	5,00		6,7258	0,945
7	4,29		6,5058	0,957
8	3,75		6,2109	0,950
9	3,33		6,0106	0,961
10	3,00		5,8600	0,955
11	2,73		5,6738	0,957
12	2,50		5,6032	0,965
13	2,31		5,4093	0,971
14	2,14		5,2969	0,973
15	2,00		5,1456	0,992
16	1,88		4,9821	0,993
17	1,76		4,8914	0,994
18	1,67		4,6277	0,984
19	1,58		4,4774	0,981
20	1,50		4,3328	0,987
21	1,43		4,2364	0,988
22	1,36		4,0861	0,979
23	1,30		3,9032	0,970
24	1,25		3,8325	0,973
25	1,20		3,6529	0,959
26	1,15		3,5291	0,966
27	1,11		3,4124	0,971
28	1,07		3,2692	0,968
29	1,03		3,1456	0,970
30	1,00		2,8123	0,965

9. na podstawie parametrów znacznie lepiej dopasowanej funkcji $a'(C)$ zaproponowanie fizycznej postaci formuły opadowej według zależności (1),

Przy konstrukcji kolejnych modeli fizycznych punkty od 1 do 8 są powtarzane, jedynie postać dopasowania nowych funkcji do zbioru danych $a'(C)$ ulega zmianie. Każdorazowo model fizyczny przyjmuje postać uwzględniającą zależność (1) oraz stały wykładnik $n = 0,2602$, zgodnie z poniższą formą:

$$h_{max}(t, C) = a'(C) \cdot t^{0,2602} \quad (4)$$

przy czym:

- t – czas trwania deszczu, min
- h_{max} – maksymalna wysokość deszczu w funkcji prawdopodobieństwa p lub częstości C oraz czasu trwania deszczu t , mm
- C – bezwymiarowy okres powtarzalności (częstość) występowania opadów deszczu
- a' – parametr równania wykładniczego

3.3 Wskaźniki dopasowania wyników modeli do danych pomiarowych

Do oceny dopasowania wartości modelowanych z pomiarowymi (rzeczywistymi) zastosowano wskaźniki statystyczne średniego błędu kwadratowego MSE oraz średniego kwadratowego błędu resztkowego RMSE, których opis przedstawiono poniżej [5, 9,15].

Średni błąd kwadratowy (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{teor,i} - X_{emp,i})^2 \quad (5)$$

Średni kwadratowy błąd resztkowy (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{teor,i} - X_{emp,i})^2} \quad (6)$$

przy czym:

$X_{teor,i}$ – i-ty element szeregu rozdzielczego fizykalnego modelu teoretycznego,

$X_{emp,i}$ – i-ty element szeregu rozdzielczego rozkładu empirycznego (wartości pomiarowe opadów),

N – liczba elementów szeregu rozdzielczego odpowiadająca liczbie lat obserwacji (pomiarów).

4. Wyniki

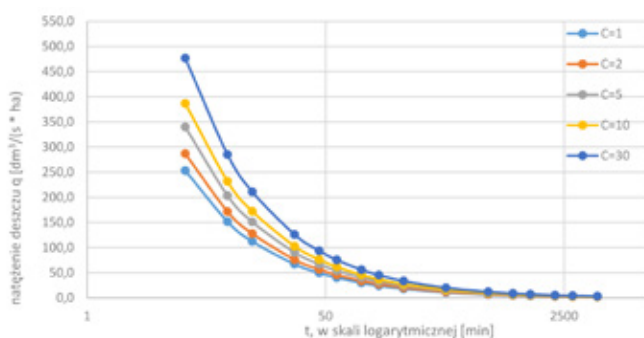
W oparciu o metodę konstruowania fizykalnych modeli opadowych na wysokość opadów maksymalnych o zadanej częstotliwości ich występowania oraz równanie (4) opracowano trzy modele fizykalne: nr 1 reprezentowany przez równanie (7), nr 2 reprezentowany przez równanie (9) oraz nr 3 reprezentowany przez równanie (11).

4.1 Autorski model fizykalny nr 1

W toku obliczeń dla równania (4) uzyskano dla $a'(C) = 4,9843C^{0,1859}$ z R^2 na poziomie 0,9886, co jest bardzo silnym dopasowaniem funkcji teoretycznej względem danych. Ostatecznie model fizykalny nr 1 przyjął postać:

$$h_{max}(C,t) = 4,9843C^{0,1859} \cdot t^{0,2602} \quad (7)$$

Wizualizację jednostkowych natężeń deszczu q , dla analizowanych wartości C od $C = 1$ do $C = 30$ przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Natężenia jednostkowe deszczu q dla C od 1 do 30 dla Szczecina wg modelu fizykalnego nr 1

Fig. 7. Rain unit intensity q for C from 1 to 30 for Szczecin according to physical model no. 1

4.2 Autorski model fizykalny nr 2

Kolejny model fizykalny opracowano w oparciu o równanie wykładnicze asymptotyczne o ogólnej postaci funkcji logistycznej wieloparametrowej, wg poniższego równania:

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + (x/x_0)^k} + A_2 \quad (8)$$

przy czym:

A_1 – parametr funkcji, który w wyniku numerycznego dopasowania wynosi – 201,12031

A_2 – parametr funkcji, który w wyniku numerycznego dopasowania wynosi 9,65985

x_0 – parametr funkcji, który w wyniku numerycznego dopasowania wynosi 0,00139

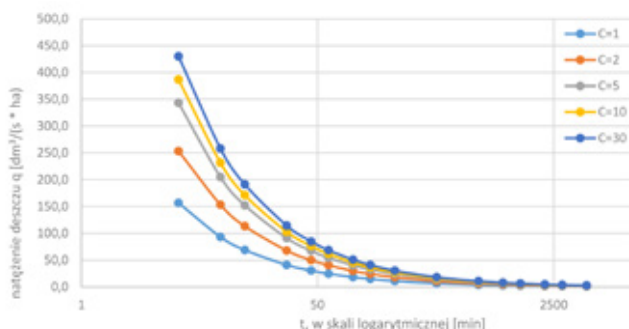
k – parametr funkcji, który w wyniku numerycznego dopasowania wynosi 0,52232

x – próba losowa

Po wykonaniu numerycznego dopasowania funkcji teoretycznej do wyznaczonych wcześniej danych parametru $a'(C)$ ostatecznie model fizykalny nr 2, po uwzględnieniu zależności (4) i (8) przyjął skomplikowaną postać:

$$h_{max}(C,t) = \left(\frac{-210,838}{1 + \left(\frac{t}{0,00139}\right)^{0,52232}} + 9,65985 \right) \cdot t^{0,2602} \quad (9)$$

Wizualizację jednostkowych natężeń deszczu q , dla analizowanych wartości C od $C = 1$ do $C = 30$ przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Natężenia jednostkowe deszczu q dla C od 1 do 30 dla Szczecina wg modelu fizykalnego nr 2

Fig. 8. Rain unit intensity q for C from 1 to 30 for Szczecin according to physical model no. 2

4.3 Autorski model fizykalny nr 3

Ostatnią propozycją był model fizykalny wykorzystujący równanie wykładnicze w postaci zalecanej przez Kotowskiego z zespołem jako prosty i dający najlepsze wyniki dla Wrocławia [5,7]:

$$y = a(x-b)^k \quad (10)$$

przy czym:

a, b, k – parametry funkcji

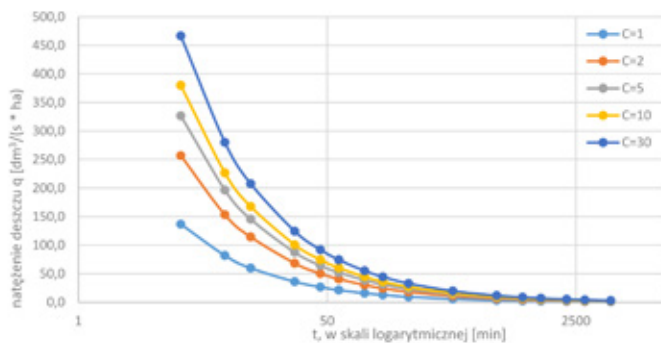
x – próba losowa

Dopasowanie powyższej funkcji do zbioru danych uzyskano na poziomie $R^2 = 0,986$, a zatem niższe od wartości modelu fizykalnego nr 2 i zbliżone do wartości dopasowania w przypadku modelu nr 1. Ostatecznie model fizykalny nr 3, po uwzględnieniu wyznaczonych numerycznie wartości parametrów $a = 5,04253$, $b = 0,97136$, oraz $k = 0,17938$, przyjął postać:

$$h_{max}(C,t) = 5,04253 \cdot (C - 0,97136)^{0,17938} \cdot t^{0,2602} \quad (11)$$

Wizualizację jednostkowych natężeń deszczu q , dla analizowanych wartości C od $C = 1$ do $C = 30$ przedstawia rys. 9.

W celu podsumowania wyników badań oraz zobrazowania różnic między zaproponowanymi modelami, zdecydowano się



Rys. 9. Natężenia jednostkowe deszczu q dla C od 1 do 30 dla Szczecina wg modelu fizycznego nr 3

Fig. 9. Rain unit intensity q for C from 1 to 30 for Szczecin according to physical model no. 3

zestawić wysokości przedziałowych opadów maksymalnych dla wszystkich analizowanych częstotliwości C osobno oraz stworzyć rysunki, które będą wizualizowały wartości liczbowe. Dodatkowo dokonano oceny kryterium błędów. Takie działanie pozwoli wybrać najlepiej dopasowany rozkład prawdopodobieństwa. Najlepszym modelem dla konkretnych opadów będzie ten, którego wynik będzie najbliższy rzeczywistych wartości opadów, w tym przypadku przyjętych jako dane opadowe ze stacji meteorologicznej IMGW-PIB w Szczecinie.

Na poniższych rys. 10–13, przedstawiono wysokości opadów maksymalnych uzyskane w opracowanych modelach oraz wyniki z atlasu KOSTRA i atlasu PANDa, odniesione do danych pomiarowych, odpowiednio dla analizowanych $C = 1, 2, 5, 10$ lat.

4.4 Analiza porównawcza otrzymanych wyników

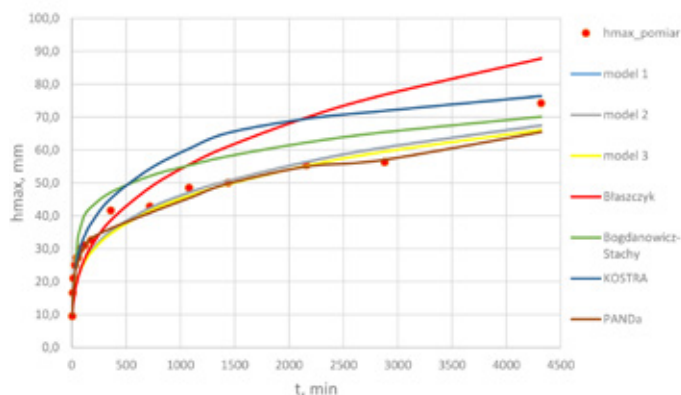
Na rys. 10 opisano powtarzalność występowania opadów $C = 10$. W tym przypadku różnica między wynikami modelu Błaszczyka oraz tych z atlasu KOSTRA nie odbiegają od siebie tak znacząco. Nie zmienia to faktu, że dla czasu trwania $t = 4320$ min model Błaszczyka zwraca wartości $h_{max} = 87,8$ mm, a KOSTRA $h_{max} = 76,4$ mm przy wysokości opadów rzeczywistych na poziomie 67,1 mm. Pozostałe wysokości tzn. od czasu trwania opadów $t = 5$ min do $t = 90$ min wykazują zbliżone różnice blisko 4–9 mm. Dla najdłuższego czasu trwania najlepsze wyniki osiągnął atlas PANDa, gdzie wysokość opadów maksymalnych wynosi $h_{max} = 65,4$ mm. Najmniej dopasowany okazał się, poza modelem Błaszczyka, autorski model fizyczny nr 3, którego wartość wynosi $h_{max} = 66,1$ mm. Najlepsze dopasowanie dla największej liczby czasów trwania przypada dla wyników atlasu PANDa.

Dla częstotliwości występowania opadów $C = 5$ wartości wysokości opadów maksymalnych widoczne są na rys. 11. Na podstawie wyników można wywnioskować wysoką skuteczność autorskiego fizycznego modelu nr 3 oraz atlasu PANDa. Przy najdłuższym czasie trwania opadów $t = 4320$ min najwyższe dopasowanie osiąga mimo wszystko atlas PANDa, jego wartość z $h_{max} = 57,1$ mm wobec 55,0 mm opadów rzeczywistych. Podobne do siebie wyniki osiągają model nr 1 i nr 2, jednak są dość duże w porównaniu z pomiarem, wynoszą one blisko 59 mm. Dla czasów trwania opadów od $t = 5$ min do $t = 180$ min różnice w wymienionych modelach względem pomiarowym były większe, osiągały 4–6 mm. Przy $t = 360$ min wartość modelu nr 2 była identyczna wobec wartości pomiarowej $h_{max} = 31,3$ mm. Wartość modelu nr 1 była minimalnie mniejsza $h_{max} = 31,1$ mm. W tym przypadku najgorzej wypadł ponownie model Błaszczyka, którego wysokość dla czasu $t = 4320$ min wynosi $h_{max} = 69,7$ mm, a dla czasu $t = 360$ min wartość wysokości $h_{max} = 55,0$ mm.

Wyniki dla $C = 2$ przedstawiono na rys. 12. Zaczynając od czasu trwania opadów $t = 5$ min najlepsze dopasowanie względem warto-

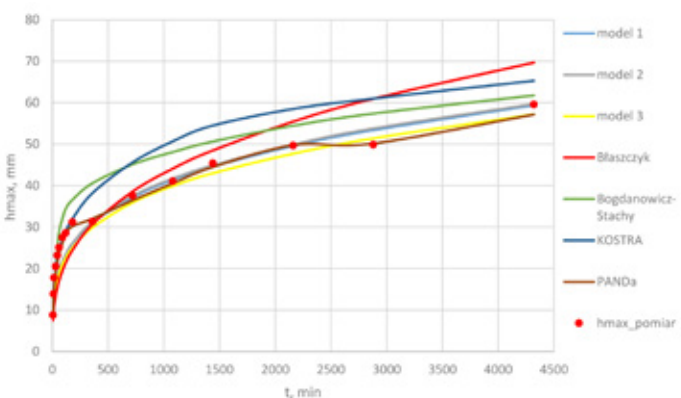
ści pomiarowej dał wynik z modelu Błaszczyka $h_{max} = 5,5$ mm. Dla czasu $t = 15$ min najlepszy okazał się model Bogdanowicz – Stachy gdzie wysokość opadów wyniosła $h_{max} = 11,0$ mm, czyli dokładnie tyle samo ile przy wartościach pomiarowych. W późniejszych czasach czyli od $t = 720$ min do $t = 4320$ min najlepsze wyniki osiągnął autorski model nr 3. Dla przykładu dla najdłuższego czasu trwania opadów $t = 4320$ min wysokość w modelu nr 3 osiąga wartość $h_{max} = 44,8$ mm, czyli dokładnie tyle samo ile w wartości pomiarowej. W tym przypadku model Błaszczyka w większości czasów trwania zaniział wysokości opadów nawet do 4 mm. Dopiero powyżej czasu trwania $t = 1080$ min wartości modelowe zaczęły przekraczać wartości pomiarowe. Model PANDa przeważnie przewyższał wysokości pomiarowe o blisko 2 mm.

W ostatnim przypadku czyli dla $C = 1$ wyniki przedstawione na rys. 13. W tym przypadku zauważalne są największe odchylenia od pomiarowych wartości. Dla opadów trwających $t = 4320$ min najwyższą wartość (blisko 100 % przekroczenia) osiąga autorski model nr 1, którego wysokość $h_{max} = 44,0$ mm przy czym wartość pomiarowa to $h_{max} = 22,9$ mm. Kolejne znaczne przekroczenia wykazuje model Błaszczyka oraz atlas opadów KOSTRA, odpowiednio $h_{max} = 40,8$ mm i $h_{max} = 39,8$ mm. Relatywnie najlepszy wynik dla najdłuższego czasu osiąga model Bogdanowicz-Stachy gdzie $h_{max} = 22,5$ mm. Przy krótszych czasach trwania opadów od $t = 5$ min do $t = 2880$ min znacznie lepsze dopasowanie występowało dla autorskiego modelu fizycznego nr 3. Różnice modelu 3 w porównaniu z pomiarami wahały się o 0,5–1,5 mm. W tym przypadku atlas PANDa nie wykazał się najlepszym dopasowaniem. Jego wartości porównywalne są z wysokościami opadów z atlasu KOSTRA.



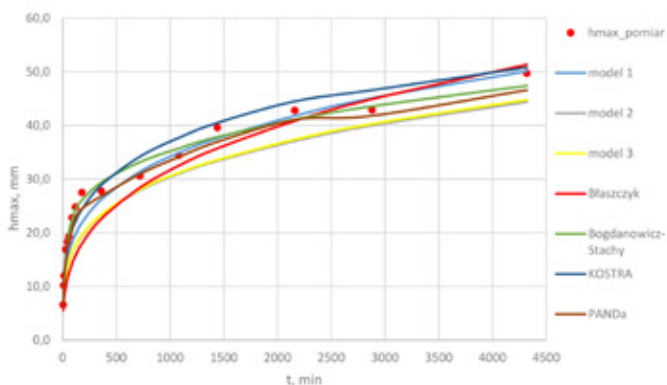
Rys. 10. Porównanie wysokości opadów maksymalnych dla $C = 10$

Fig. 10. Comparison of maximum rainfall for $C = 10$

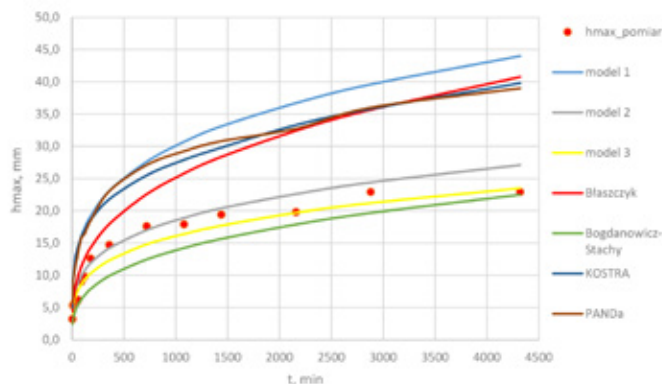


Rys. 11. Porównanie wysokości opadów maksymalnych dla $C = 5$

Fig. 11. Comparison of maximum rainfall for $C = 5$



Rys. 12. Porównanie wysokości opadów maksymalnych dla $C = 2$
 Fig. 12. Comparison of maximum rainfall for $C = 2$



Rys. 13. Porównanie wysokości opadów maksymalnych dla $C = 1$
 Fig. 13. Comparison of maximum rainfall for $C = 1$

Z szerokiego zakresu stosowanych kryteriów zdecydowano się obliczyć błędy na podstawie średniego błędu kwadratowego MSE. Do potwierdzenia wyników użyto metody średniej kwadratowej błędów RMSE. Bez względu na wybraną metodę ocena dystrybucyjności teoretycznej i empirycznej (danych pomiarowych) pozwala wyodrębnić najdokładniejsze dopasowanie. W tym przypadku obliczenia wykonano na podstawie jednostkowego natężenia deszczu q odniesionego do wartości empirycznych. Ocenę stopnia dopasowania wyników badanych modeli opadowych do danych pomiarowych wyrażoną wskaźnikami MSE i RMSE przedstawiono w tab. 7 i 8.

Tabela 7. Wskaźnik MSE dla wybranych C i badanych modeli opadowych
 Table 7. MSE for selected C and analyzed precipitation models

badane modele	częstość C				
	1	2	5	10	30
Błaszczyk	54,09	10,70	44,98	117,42	549,55
B-S*	8,83	13,73	33,18	66,74	140,58
model 1	119,96	7,94	10,18	15,84	30,92
model 2	3,21	1,40	10,34	15,83	21,83
model 3	2,08	1,23	11,79	15,79	26,51
KOSTRA	80,74	20,02	41,74	99,58	264,34
PANDa	80,98	6,49	0,67	3,6	10,72

*model Bogdanowicz–Stachy

Analizując wartość MSE i RMSE wskazane w tab. 7 i 8 można zauważyć, że wartości atlasu PANDa są wyraźnie bardziej dopasowane do danych pomiarowych dla $C = 5, 10$ i 30 , natomiast dla $C = 1$ oraz $C = 2$ autorskie modele nr 2 i 3 bezkonkurencyjnie lepiej opisują wyniki opadów rzeczywistych.

Tabela 8. Wskaźnik RMSE dla wybranych C i badanych modeli opadowych
 Table 8. RMSE for selected C and analyzed precipitation models

badane modele	częstość C				
	1	2	5	10	30
Błaszczyk	7,35	3,27	6,71	10,83	23,44
B-S*	2,97	3,70	5,76	8,17	11,86
model 1	10,91	2,81	3,19	3,98	5,56
model 2	1,79	1,18	3,21	3,98	4,67
model 3	1,44	1,11	3,43	3,97	5,15
KOSTRA	8,99	4,47	6,46	9,98	16,26
PANDa	8,99	2,54	0,82	1,89	3,28

*model Bogdanowicz–Stachy

Przeprowadzone badania wskazują na to, że żaden z badanych modeli nie jest idealnym dopasowaniem. Dodatkowo nie ma też modelu, który we wszystkich częstotliwościach osiągnąłby najniższe wartości. Wyniki potwierdzają niepoprawność stosowania modelu Błaszczyka, ponieważ wykazuje najwyższe wartości błędów, a co za tym idzie, jest najmniej dopasowany. Odrzucić można również model nr 1. Jego błędy nie są najwyższe, ale dla poszczególnych częstotliwości występują modele o lepszym dopasowaniu. Najwięcej wartości pokrywa się z atlasem opadów PANDa. Można stwierdzić, że formuła ta wpisuje się najlepiej, ze wszystkich badanych w charakterystykę szczytnickich opadów. Nie oznacza to jednak, że jest jedyną pasującą. Dla mniejszych częstotliwości najbardziej odpowiednie są wartości z zaproponowanych funkcji. Dokładniej, dla częstotliwości opadów raz na rok oraz raz na dwa lata najmniejszy błąd osiągnął model nr 3. Wartości dla najmniejszych częstotliwości potrzebowałyby jednak potwierdzenia, ponieważ w przestrzeni jednego roku występują znaczne wahania pogodowe. Jest to za krótki czas, żeby móc ocenić trend i powtarzalność opadów. Częstość $C = 30$ z kolei jest dość odległym planowaniem. Przy takim prawdopodobieństwie między poszczególnymi opadami może nastąpić wiele istotnych zmian klimatycznych, np. coraz częściej występujące opady nawalne spowodują przesunięcie wartości szacowanych wysokości opadów h_{max} z $C = 30$ na $C = 10$. W analizie struktury częstotliwości występowania opadów, ważnym czynnikiem będzie również urbanizacja miasta, która będzie wpływała na kształt i zasięg pola opadowego, ale to wymaga zagadnienie wymaga odrębnych badań.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Mając na uwadze postępujące zmiany klimatyczne oraz związane z nimi zagrożenie ograniczenia dostępności zasobów wody pitnej, pochodzącej ze słodkich zasobów wód powierzchniowych, modelowanie opadów jest trudnym, często karkołomnym (z uwagi na losowy charakter występowania opadów oraz bardzo wiele zmiennych fizycznych opisujących procesy atmosferyczne) ale niezbędnym do rozwijania zagadnień, służącym w jednej strony rzetelnemu opisowi danych historycznych, z drugiej zaś przewidywaniu zarówno natężeń oraz wysokości opadów jak i ich wpływu na kształtowanie zasobów wód powierzchniowych. Swoje znaczenie wyraźnie zaznacza podczas wymiarowania, projektowania oraz przy budowie nowych i modernizacji istniejących sieci kanalizacji ogólnospławnej i deszczowej, a także modernizacji i rozbudowy istniejącej infrastruktury retencjonowania oraz odprowadzania wód opadowych i roztopowych.

Uwzględnienie zmian klimatycznych oraz postępu urbanizacji ma kluczowy wpływ na wyniki badanych modeli opadowych. Poprawność wprowadzonych danych sprawia, że modele cały czas pozostają aktualne. Udowadnia to bezkrytyczne stosowanie popularnych w Polsce formuł opadowych np. Błaszczyka oraz Bogdanowicz-Stachy [10,17], które z oczywistych względów nie zakładały wspomnianych zmian, przez co ich wyniki wykazują coraz mniejsze dopasowania do obecnie rejestrowanych danych opadowych. W niemieckim atlasie opadów KOSTRA możliwe zmiany klimatyczne uwzględniono na etapie jego

tworzenia (blisko 30 lat temu) i nadal sprawdzają się jego wyliczenia, a sam atlas jest cyklicznie aktualizowany. Powstanie Polskiego Atlasu Natężeń Deszczy (PANDa) znacznie usprawniło i rozbudowało proces modelowania opadów na obszarze całego kraju. Zakres czasowy, z którego pobierane są dane do badań, powinien być jak największy (min. 30 lat), aby móc ocenić powtarzalność opadów, a także zbadać zachodzące zmiany. Długi okres badawczy wpływa przede wszystkim na dokładność dopasowania konkretnego modelu do rzeczywistych warunków opadowych charakteryzowanych przez dane pomiarowe w reprezentatywnej stacji meteorologicznej.

Na podstawie przeprowadzonych w niniejszej pracy badań zauważyć można zmiany w natężeniu opadów wynikające ze zmian klimatu. Zastosowanie formuły Błaszczyka na 30-letniej serii szczecińskich opadów deszczu (pomijając najmniejsze i największe częstotliwości) wykazały największe błędy, a co za tym idzie najmniejsze dopasowanie. Potwierdza to podnoszone od lat stanowisko środowiska naukowego i technicznego niestosowania tego modelu opadowego do projektowania systemów odwodnienia terenów zurbanizowanych [16].

Porównanie wyników formuł opadowych stosowanych bardzo często w praktyce inżynierskiej (takich jak model Błaszczyka czy model Bogdanowicz–Stachy) z wynikami modeli rozwijanych w jednostkach badawczo-rozwojowych (jak autorskie modele powstające między innymi na Politechnice Wrocławskiej czy systemy geo-prze-strzenne, jak niemiecki atlas KOSTRA czy polskie atlasy opadowe PANDa oraz PMASTP [12]) oraz dostępnymi danymi pomiarowymi rejestrowanymi na sieci państwowych stacji meteorologicznych, umożliwia formułować wnioski rozwijające dziedzinę modelowania intensywnych opadów deszczu:

1. Zaproponowane modele fizykalne (model nr 1 i 2), w efekcie zastosowania proponowanej procedury opracowania modelu fizycznego, osiągnęły niską skuteczność podczas modelowania. Podczas oceny poprawności w zasadzie można je pominąć, ponieważ dla każdej z badanych częstotliwości, każdy inny model wypadł jako znacznie lepiej dopasowany.
2. Zaproponowany model nr 3 osiągnął najlepsze dopasowanie dla deszczy występujących odpowiednio raz na rok ($C = 1$) oraz raz na dwa lata ($C = 2$).
3. Najlepszym modelem dla Szczecina okazał się atlas opadów PANDa (dla $C = 5, 10$ i 30), który jest modelem probabilistycznym. Jako drugi, dla mniejszych częstotliwości ($C = 1$ i $C = 2$) skuteczny okazał się model nr 3, który jest modelem fizykalnym. Wykazują one największe dopasowania do opadów, a co za tym idzie największą efektywność. Obliczone błędy kwadratowe osiągnęły stosunkowo najniższe wartości. Fakt ten jednak nie wyklucza istnienia modelu jeszcze bardziej dopasowanego.
4. Na podstawie badań oraz poprzedzających wniosków można stwierdzić, że bardzo trudne jest opisanie wszystkich opadów dla każdego prawdopodobieństwa jedną formułą, co byłoby rozwiązaniem idealnym z punktu widzenia inżyniera. Do scharakteryzowania opadów w jednym mieście potrzebne jest kilka formuł, zmiennych w czasie trwania opadów. Przypuszcza się, że w odniesieniu do całego kraju wymagania mogłyby być jeszcze wyższe.
5. Istotna jest idea tworzenia atlasów natężeń deszczów, ponieważ z definicji łączą one kilka formuł i stosują je wymiennie, przez co dopasowanie osiąga wyższe wartości. Konstrukcja atlasów poszerza możliwości badań, a osiągnięte wyniki są bardziej prawdopodobne niż w przypadku używania pojedynczych formuł.

Badania skupiające się na modelowaniu intensywnych opadów deszczu pozwalają określić ich wysokość oraz natężenie w zróżnicowanych przedziałach czasowych i dla różnych częstotliwości występowania opadów. Dzięki temu możliwe jest, z jednej strony bezpieczne wymiarowanie systemów odwodnienia terenów, w tym systemów kanalizacji wód opadowych i roztopowych czy zbiorników retencyjnych, z drugiej zaś zapobieganie lub w dużym stopniu ograniczenie

skutków ekstremalnych zjawisk meteorologicznych, powodujących lokalne podtopienia czy powodzie. Rzetelna i łatwo dostępna dla inżyniera informacja o statystykach intensywnych opadów deszczu, jaką umożliwiającą dedykowane dla konkretnej miejscowości modele opadowe, opracowane na podstawie ogólnodostępnych danych opadowych, pozwala przygotować sieci miejskiej infrastruktury sanitarnej, na bezpieczny odbiór odpowiedniej ilości opadów. ■

Autorzy składają podziękowania firmie Retencja.PL za udostępnienie danych opadowych z atlasu PANDa

LITERATURA

- [1] Błaszczyk Waclaw. 1954. „Splywy deszczowe w sieci kanalizacyjnej (Wytyczne do normatywu)”. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* 9: 262–271.
- [2] Bogdanowicz Ewa, Juliusz Stachy. 1998. „Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe”. *Wydawnictwo Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej*. Seria Hydrologia i Oceanologia nr 23: 85.
- [3] Dobrucka Justyna, Aleksandra Działowska-Chmara, Ewa Kowalska-Klimczak, Krzysztof Michalski, Angelika Szerniewicz-Kwas, Jolanta Wiśniewska. 2011. „Prognoza oddziaływania na środowisko”. *Biuro Planowana Przestrzennego Miasta w Szczecinie*.
- [4] Hejduk Leszek, Ewa Kazanowska. 2016. „Hydrologia zlewni zurbanizowanych”. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk*: 39.
- [5] Kotowski Andrzej, Bartosz Kaźmierczak, Andrzej Danczewicz. 2010. „Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji”. *Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Instytut Podstawowych Problemów Techniki. Studia z zakresu inżynierii nr 68*: 170.
- [6] Kotowski Andrzej, Katarzyna Wartalska, Monika Nowakowska. 2016. „Uogólniona metoda analityczna wymiarowania przelewowych zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych”. *Ochrona Środowiska* 1(38): 45–52.
- [7] Kotowski Andrzej. 2015. „Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów”. *Wydawnictwo Seidel-Przywecki*: 288
- [8] Krzanowski Stanisław, Andrzej Wałęga. 2007. „Hydrometeorologiczne aspekty wymiarowania urządzeń do retencji wód opadowych terenów zurbanizowanych”. *Zakład Gospodarki Wodnej i Ochrony Wód*.
- [9] Licznar Paweł, Janusz Zieliński [red.]. 2020. „Metodyka opracowania Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDa)”. *Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy*: 139
- [10] Licznar Paweł, Katarzyna Siekanowicz–Grochowina, Michał Oktawiec, Andrzej Kotowski, Ewa Burszta–Adamiak. 2018. „Empiryczna weryfikacja formuły Błaszczyka do obliczania wartości natężenia deszczu miarodajnego”. *Ochrona Środowiska* 40 (2): 17–22.
- [11] Malitz Gabriele, Heinz Ertel. 2015. „Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010). KOSTRA-DWD-2010”. *Deutscher Wetterdienst*: 40.
- [12] Ozga-Zieliński Bogdan [red.]. 2022. „Modele probabilistyczne opadów maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia – projekt PMASTP”. *Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy*: 55.
- [13] PN-EN 752:2017: Drain and sewer systems outside buildings – Sewer system management. *Comité Européen de Normalisation*: 90.
- [14] Szturc Jan, Anna Jurezyk, Katarzyna Ośródk. 2016. „System estymacji nowcastingu opadów (SEINO) generujących dane z wysoką rozdzielczością”. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk*: 39.
- [15] Wdowikowski Marcin, Bartosz Kaźmierczak, Andrzej Kotowski. 2021. „Probabilistyczne modelowanie deszczów maksymalnych na przykładzie dorzecza Górnej i Środkowej Odry”. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*.
- [16] Wdowikowski Marcin, Katarzyna Wartalska, Bartosz Kaźmierczak, Andrzej Kotowski. 2023. „Zasady formułowania probabilistycznych modeli deszczów maksymalnych”. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1: 22–29.
- [17] Węglarczyk Stanisław. 2013. „O poprawności wzorów Błaszczyka na obliczanie opadów miarodajnych”. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 3: 63–76.