

Katarzyna Ewa Wartalska, Andrzej Kotowski

Metodyka tworzenia wzorców opadów do modelowania odwodnień terenów



Prace Naukowe
Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej

Monografie

5

Katarzyna Ewa Wartalska, Andrzej Kotowski

Metodyka tworzenia wzorców opadów do modelowania odwodnień terenów



*Prace Naukowe Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej.
Monografie są kontynuacją
Prac Naukowych Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej.
Seria: Monografie*

Recenzenci

Janusz ŁOMOTOWSKI
Ziemowit SULIGOWSKI

Opracowanie redakcyjne i korekta
Hanna JUREK

Zdjęcie na okładce
PIXABAY (Pexels)

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsza książka, zarówno w całości,
jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny,
fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2020

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>
e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-122-9

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

*hydrologia, hietogram wzorcowy,
wzorzec Eulera typu II, wzorzec DVWK*

Katarzyna Ewa WARTALSKA*
Andrzej KOTOWSKI*

Metodyka tworzenia wzorców opadów do modelowania odwodnień terenów

Ze względu na brak wiarygodnych wzorców opadów w Polsce, do modelowania zjawiska opad–odpływ zaleca się opady modelowe Eulera typu II bądź DVWK, stosowane w Niemczech. Brak jest jednak weryfikacji kształtu tych modeli w polskich warunkach klimatycznych. Celem badań było opracowanie i przetestowanie metodyki analizy kształtów lokalnych hietogramów w zastosowaniu do weryfikacji wzorców opadów wykorzystywanych do modelowania niezawodności działania systemów odwodnień terenów. Do testów wybrano dane opadowe z 2 charakterystycznych sieci pomiarowych: górskiej – IMGW-PIB w Jeleniej Górze oraz nizinnej – IMGW-PIB i MPWiK we Wrocławiu. Zakres badań obejmował: wybór metod ustalenia niezależności zjawisk opadowych oraz grupowania opadów do analiz jakościowych podobieństwa kształtów hietogramów lokalnych deszczów; Zdefiniowanie wskaźników rozkładów masy i nierównomierności w czasie lokalnych opadów do analiz ilościowych podobieństwa kształtów hietogramów wzorcowych Eulera typu II i DVWK, w układach bezwymiarowych i wymiarowych; Analizy jakościowe i ilościowe podobieństwa kształtów lokalnych hietogramów do wzorców Eulera typu II i DVWK, z uwzględnieniem typów genetycznych opadów: konwekcyjne (K), frontalne (F) i niszowe (N) oraz klas częstości przewyższeń: $C \geq 1$ rok, $C \geq 2$ lata, $C \geq 5$ lat, $C \geq 10$ lat; Weryfikacja kształtów wzorców Eulera typu II i DVWK dla lokalnych opadów, z uogólnieniem wyników badań dla stacji górskiej i nizinnych.

W celu wydzielenia niezależnych zjawisk opadowych zaproponowano własną metodykę ustalenia przerw między opadami (MDPD). Do analiz statystycznych wyselekcjonowano opady o częstościach przewyższeń $C(T) \geq 1$ rok, na podstawie ustalonych szeregów czasowych opadów typu DDF dla wybranych stacji. Do grupowania opadów ze względu na podobieństwo cech fizycznych hietogramów zaproponowano trzy metody badawcze: Huffa, analizę skupień metodą Warda oraz metodą k -średnich. Metody te, a zwłaszcza metoda k -średnich, okazały się przydatne do selekcji opadów (K, F i N). Analizę statystyczną podobieństwa kształtów lokalnych hietogramów wykonano w obrębie

* Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Wodociągów i Kanalizacji, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: katarzyna.wartalska@pwr.edu.pl, andrzej.kotowski@pwr.edu.pl

wyodrębnionych $k = 4$ skupień, na podstawie obliczeń parametrów opisujących: położenie geometryczne pików, rozkłady masy i nierównomierność intensywności w czasie, zdefiniowanymi w pracy 6 wskaźnikami. Wyniki analiz porównawczych wskazały na różnice w kształtach lokalnych hietogramów względem wzorców Eulera typu II, a zwłaszcza DVWK. Na tej podstawie zaproponowano uszczegółowione postacie wzorców opadów modelowych dla badanych stacji, co ma znaczenie naukowe i praktyczne.

Wykaz oznaczeń

h	– wysokość (warstwa) deszczu, mm,
h_i	– chwilowa wysokość deszczu, mm,
h_{\max}	– maksymalna wysokość deszczu, mm,
h_{sr}	– średnia wysokość deszczu w czasie t , mm,
Δh	– różnica (przedziałowa) wysokości deszczu w czasie Δt , mm,
n_l	– wskaźnik nierównomierności intensywności deszczu w czasie t , –,
m_{30}	– wskaźnik sumy wysokości (masy) opadu dla 30% czasu trwania, –,
m_{33}	– wskaźnik sumy wysokości (masy) opadu dla 33% czasu trwania, –,
m_{50}	– wskaźnik sumy wysokości (masy) opadu dla 50% czasu trwania, –,
p	– prawdopodobieństwo wystąpienia deszczu o natężeniu q z przewyższeniem, –,
q	– natężenie jednostkowe deszczu, $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$,
q_{\max}	– maksymalne (przedziałowe) jednostkowe natężenie deszczu, $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$,
q_{sr}	– średnie jednostkowe natężenie deszczu, $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$,
r	– wskaźnik położenia piku maksymalnej wysokości/intensywności opadu, –,
r_{sc}	– wskaźnik położenia środka ciężkości hietogramu, –,
t	– czas trwania deszczu, min,
t_i	– chwilowy czas trwania deszczu, min,
Δt	– różnica (przedział) czasu, mm,
C	– częstość (powtarzalność w latach) występowania deszczu z przewyższeniem, lata,
I	– intensywność opadu, mm/min,
I_{\max}	– maksymalna (przedziałowa) intensywność opadu, mm/min,
I_{sr}	– średnia intensywność opadu, mm/min,
P	– skumulowana (zsumowana) wysokość opadu w czasie t , mm,
P_c	– skumulowana (całkowita) wysokość opadu deszczu w czasie T , mm,
P_i	– skumulowana wysokość opadu deszczu – od początku opadu do chwili t_i , mm,
$rRMSE$	– względny błąd resztkowy średniokwadratowy, –,
T	– całkowity czas trwania deszczu, min.

Wykaz akronimów

- BAT – *Best Available Techniques* (Najlepsze dostępne techniki).
- BMP – *Best Management Practices* (Najlepsze praktyki zarządzania).
- DDF – *Depth-Duration-Frequency* (Powtarzalna wysokość opadu).
- DVWK – *Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau* (Niemiecki Związek Gospodarki Wodnej i Sztuki Budowlanej).
- DWA – *Deutscher Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.* (Niemieckie Stowarzyszenie Gospodarki Wodnej, Ściekowej i Odpadowej).
- IDF – *Intensity-Duration-Frequency* (Powtarzalna intensywność opadu).
- IMGW-PIB – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy.
- K, F, N – Typy genetyczne opadów, odpowiednio: konwekcyjne, frontalne, niżowe.
- KOSTRA – *Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung – Auswertung* (Skoordynowane regionalnie wartości silnych opadów).
- MDPD – *Minimum Dry-Period Duration* (Minimalny okres bezdeszczowy).
- MPWiK – Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji.
- PANDa – Polski Atlas Natężeń Deszczów.
- POT – *Peak Over Threshold* (Przewyższenie ponadprogowe).
- SCS – *Soil Conservation Service* (Urząd Ochrony Gleb).
- SWMM – *Storm Water Management Model* (Model zarządzania wodą deszczową).

1. Wprowadzenie

W ostatnich dziesięcioleciach obserwowane są zmiany klimatu przejawiające się coraz częstszym występowaniem ekstremalnych zdarzeń pogodowych, takich jak susze, powodzie czy trąby powietrzne [43]. Przyczyny ocieplania się klimatu nie są w pełni rozpoznane i wciąż budzą dyskusje. Stwierdzone trendy zmian w strukturze opadów objawiają się m.in. tym, że intensywne krótkotrwałe opady ulegają grupowaniu w dłuższe, nawet kilkudniowe, okresy o intensywności znacznie wyższej niż dawniej [6, 37, 43, 53, 73]. W perspektywie 2100 roku przewiduje się, że deszcze o obecnej intensywności będą występowały około dwukrotnie częściej, a w tym przepływy „100-letnie” będą pojawiały się częściej niż raz na 50 lat [51, 58, 86]. Przykładowo, we Wrocławiu na przestrzeni 50 lat (1960–2010) wykazano wzrostowe trendy odnośnie do intensywności opadów oraz liczby dni deszczowych w roku [47].

Intensywnym opadom deszczowym towarzyszą na ogół gwałtowne spływy wód powierzchniowych, które wyrządzają szkody zwłaszcza na terenach zurbanizowanych (podtopienia, osuwiska, erozje gleb). Istniejące systemy odwodnieniowe – przy wciąż postępującym uszczelnianiu powierzchni terenów zurbanizowanych (zaniku naturalnej retencji), przyczyniają się także do coraz częstszego występowania nagłych wezbrań wód powierzchniowych czy powodzi miejskich (ang. *Flash Flood*, *Urban Flood*). Należy zaznaczyć, że systemy te zwymiarowane zostały nieodpowiednimi obecnie metodami, w tym z wykorzystaniem formuły Błaszczyka na natężenie deszczów, opartej na danych opadowych z przełomu XIX i XX wieku, która zaniża obecne natężenia około o 40% dla Wrocławia (dla danych z lat 1960–2009) [48, 51, 53], oraz średnio o 36% w Warszawie i o 33% na terenie całego kraju (dla danych z lat 1986–2015) [54, 66]. Eksploatowane obecnie systemy kanalizacyjne mogą więc nie spełniać współczesnych, europejskich standardów odnośnie do dopuszczalnych częstości wylewów z kanałów i podtopień terenów [29, 48, 51, 88]. Wynika z tego konieczność badania niezawodności ich działania i podejmowanie na tej podstawie odpowiednich działań zaradczych, polegających m.in. na budowie zbiorników retencyjno-infiltracyjnych, kanałów odciążających czy obwałowań terenów. Badania takie, zalecane najnowszą normą PN-EN 752:2017 [77], są w Polsce rzadko stosowane, m.in. z braku danych z lokalnego monitoringu opadów i rejestracji przepływów w sieciach kanalizacyjnych, a także z powodu braku dostatecznych podstaw metodycznych, w tym lokalnych wzorców opadów do modelowania odwodnień

terenów. W wielu instytucjach prowadzone są prace zmierzające do standaryzacji metody opracowywania danych opadowych na potrzeby praktyki inżynierskiej [47, 51, 54, 59, 66, 68, 69, 71, 72, 106]. Niniejsza praca wpisuje się w nurt doskonalenia zasad modelowania hydrodynamicznego systemów odwodnień terenów.

Osiągnięcie w pełni niezawodnego działania systemów kanalizacyjnych nie jest jednak możliwe ze względu na stochastyczny charakter opadów. Dążyć możemy jedynie do tzw. bezpiecznego ich projektowania i eksploatacji, tj. dostosowywania systemów do przyjęcia maksymalnych – prognozowanych strumieni wód opadowych o częstości występowania równej dopuszczalnej częstości wystąpienia wylania na powierzchnię i podtopienia terenu. Dotyczy to również przyszłych obciążeń opadami – intensyfikowanymi przez zmiany klimatu [47, 51]. Polska norma – zharmonizowana z normą europejską – PN-EN 752 z 2017 r. [77], zaleca do projektowania kanalizacji deszczowej częstości deszczu obliczeniowego od $C = 1$ rok do $C = 10$ lat – w zależności od rodzaju zagospodarowania terenu (tab. 1.1).

Tabela 1.1. Zalecane częstości projektowe deszczu obliczeniowego wg PN-EN 752:2017

Częstość deszczu obliczeniowego [1 raz na C lat]	Rodzaj zagospodarowania terenu
1 na 1	Tereny pozamiejskie (wiejskie)
1 na 2	Tereny mieszkaniowe
1 na 5	Centra miast, tereny usług i przemysłu
1 na 10	Podziemne obiekty komunikacyjne, przejścia i przejazdy pod ulicami itp.

Tak zwymiarowane systemy kanalizacyjne, według zaleceń normy PN-EN 752:2017, powinny gwarantować dopuszczalną częstość wylewów z kanalizacji dla zdefiniowanych przykładowo lokalizacji terenów – z uwzględnieniem siedmiostopniowej skali wpływu zagrożenia na środowisko (tab. 1.2).

Tabela 1.2. Kryteria projektowe zagrożeń wylewami z kanalizacji wg PN-EN 752:2017

Lp.	Wpływ zagrożenia	Lokalizacje terenów	Częstość (C) zagrożeń [lata]
1	Bardzo mały	Drogi lub otwarte przestrzenie z dala od budynków	1
2	Mały	Tereny rolnicze (w zależności od wykorzystania, np. pastwiska, grunty orne)	2
3	Mały do średniego	Otwarte przestrzenie wykorzystane do celów publicznych	3
4	Średni	Drogi lub otwarte przestrzenie w pobliżu budynków	5
5	Średni do wysokiego	Zalania zamieszkałych budynków z wyłączeniem piwnic	10
6	Wysoki	Głębokie zalania zamieszkałych piwnic lub przejazdów pod ulicami	30
7	Bardzo wysoki	Infrastruktura krytyczna	50

Zastrzega się jednak [77], że podane w tabeli 1.2 wartości dopuszczalnej częstości wylewów mogą być zarówno podwyższone – w przypadku szybko przemieszczających się wód powodziowych, jak i obniżane – w przypadku przebudowy istniejących systemów, gdy osiągnięcie tych samych kryteriów projektowych dla nowych systemów pociąga za sobą zbyt wysokie koszty. Ponieważ grawitacyjne systemy kanalizacyjne projektuje się na perspektywę 50–100 lat, ta druga możliwość jest dyskusyjna, wobec prognozowanego wzrostu intensywności opadów w przyszłości [6, 51, 58, 73, 86]. Zalecane wg PN-EN 752:2017 częstości projektowe dopuszczalnych zagrożeń mają więc charakter fakultatywny, jako że norma nie jest obecnie aktem prawnym. Zgodnie z Ustawą z 12 września 2002 roku o normalizacji, polskie normy, w tym PN-EN czy ISO, należy traktować jako źródło przepisów pozaprawnych – na równi np. z publikowanymi wynikami najnowszych prac badawczych. Obecny stan prawny nakłada na projektantów większą odpowiedzialność, w tym obowiązek bezpiecznego projektowania, tj. zgodnie ze sztuką budowlaną, wynikającą z najlepszej dostępnej wiedzy technicznej i organizacyjnej: BAT (ang. *Best Available Techniques*) czy BMP (ang. *Best Management Practices*) [51].

Ocena ryzyka występowania zagrożeń wylewami z kanałów, w warunkach zmieniającego się klimatu, jest niezbędna dla racjonalnej gospodarki wodnej miast. Dotyczy to zwłaszcza podstaw bezpiecznego wymiarowania i eksploatacji systemów odwodnień terenów, tj. kanalizacji deszczowej czy ogólnospławnej. Ryzyko zaistnienia niekorzystnych w skutkach zjawisk określa się najczęściej jako iloczyn prawdopodobieństwa – częstości wystąpienia oraz miary negatywnych skutków. Do zarządzania ryzykiem wylewów z kanałów należy więc każdorazowo uwzględniać zarówno dopuszczalną częstość wystąpienia, jak i przewidzieć, oszacować skutki zalań, tj. uszkodzenia mienia, a zwłaszcza wpływ na zdrowie i bezpieczeństwo ludzi. Realne zagrożenia środowiskowe powodowane wylewami z systemów kanalizacyjnych można zauważyć albo w trakcie ich eksploatacji, albo wykazać na drodze modelowania hydrodynamicznego. W drugim przypadku pomocne są zalecenia niemieckie, wg DWA-A118 z 2006 r. [4], wprowadzające pojęcie częstości nadpiętrzenia do poziomu terenu do obliczeń sprawdzających działanie kanalizacji (tab. 1.3). Wówczas w pośredni sposób wyznacza się stan przeciążenia, który jest najbliższy występującemu w dalszej kolejności wylaniu i podtopieniu terenu [51, 80].

Tabela 1.3. Dopuszczalne częstości nadpiętrzeń dla nowo projektowanych bądź modernizowanych systemów kanalizacyjnych wg DWA-A118:2006

Częstość deszczu obliczeniowego [1 raz na C lat]	Rodzaj zagospodarowania terenu	Częstość wystąpienia nadpiętrzenia [1 raz na C lat]
1 na 1	Tereny wiejskie	2
1 na 2	Tereny mieszkaniowe	3
1 na 5	Centra miast, tereny usług i przemysłu	rzadziej niż 5
1 na 10	Podziemne obiekty komunikacyjne, przejścia i przejazdy pod ulicami itp.	rzadziej niż 10

Celem modelowania zjawiska opad–odpływ w skanalizowanej zlewni miejskiej jest najczęściej określenie maksymalnego strumienia lub objętości spływu wód opadowych/ścieków do celów praktycznych. Uzyskanie wiarygodnych wyników symulacji wymaga właściwej identyfikacji, a następnie kalibracji i walidacji parametrów modelu – na podstawie pomiarów w rzeczywistej zlewni. Głównym źródłem błędów modelowania są najczęściej dane o opadach [54, 72]. Modele hydrodynamiczne umożliwiają uwzględnienie zmiennych w czasie i przestrzeni spływów wód opadowych, czyli zmiennego przepływu ścieków w kanałach, przez różne scenariusze obciążenia zlewni opadami [3, 48, 51, 53, 54]. Scenariuszami tymi mogą być rzeczywiste, zmierzone w wieloletnim intensywnym opady lokalne, które są na ogół trudno dostępne [4, 53, 63], jak i opady modelowe (np. Eulera typu II, DVWK, blokowe) tworzone na podstawie lokalnych krzywych IDF (ang. *Intensity–Duration–Frequency*) lub DDF (ang. *Depth–Duration–Frequency*) [4, 47, 48, 51, 55, 59, 68, 80], czy też deszcze syntetyczne generowane losowo, będące w fazie eksperymentów [24, 25, 38, 59, 64, 83, 104]. Scenariusze rzeczywistych opadów wymagają najczęściej długich okresów ich rejestracji – zależnych od częstości (C) weryfikowanego zagrożenia. Przykładowo na potrzeby weryfikacji napięć, zalecenia wg DWA-A118 [4] odnośnie do minimalnego okresu rejestracji opadów podano w tabeli 1.4.

Tabela 1.4. Minimalne okresy rejestracji opadów do weryfikacji częstości napięć wg DWA-A118:2006

Częstość napięcia	Minimalny okres rejestracji opadów
1 na 1 rok do 1 na 2 lata	10 lat
1 na 3 lata	15 lat
1 na 5 lat	20 lat
1 na 10 lat	30 lat

Pojęcie opady modelowe określa obciążenie deszczem o znormalizowanym (wzorcowym) przebiegu w czasie. Normalizacja bazuje na statystycznej analizie zarejestrowanych w przeszłości intensywnych deszczów i odzwierciedla najczęściej powtarzające się przebiegi w czasie. Opady modelowe znajdują powszechne zastosowanie w hydrologicznych bądź hydrodynamicznych modelach zjawiska opad–odpływ [4, 51, 80, 81, 107]. Obciążenie zlewni opadem modelowym stosowane jest do rozwiązywania wielu zadań projektowych, których celem jest: sprawdzanie funkcjonowania istniejących systemów, bądź efektów ich modernizacji, czy też weryfikacja częstości napięć i szacowanie pewności braku wylania (stopnia niezawodności) [4, 5, 18, 28, 48, 51, 68, 72, 80]. Wybierając jako obciążenie zlewni, np. opad modelowy Eulera typu II, należy stosować częstość deszczu (C) równą zadanej częstości napięcia. Zalecenie to bazuje na obszernych obliczeniach porównawczych po zastosowaniu opadu modelowego Eulera i zmierzonych serii intensywnych opadów, jednakowych szeregów czasowych [4, 80, 81].

Powszechne wdrożenie modelowania w krajowej praktyce projektowania i eksploatacji systemów odwodnieniowych napotyka jednak liczne bariery. Jedną z nich jest brak dostępu przez projektantów do wiarygodnych baz danych o lokalnych opadach. Podjęte w ostatnich latach działania o charakterze metodycznym, w tym opracowanie atlasu opadów w Polsce (PANDa), mogą zmienić tę sytuację. Przykładowo w Niemczech dostęp do takich informacji jest powszechny, a na podstawie atlasu opadów KOSTRA można praktycznie dla każdej miejscowości konstruować lokalne, syntetyczne wzorce deszczów. Modelowanie niezawodności działania systemów kanalizacyjnych napotyka też wiele trudności metodologicznych, wymagających uściślenia zasad prowadzenia takich badań [51, 71, 72]. Zadawany hietogram opadu, w postaci graficznej reprezentacji rozkładu intensywności w czasie, ma zwykle decydujący wpływ na symulowaną wielkość odpływu ze zlewni [10, 21, 51, 55, 68]. Wybór scenariusza opadowego do modelowania/wymiarowania systemów odwodnień terenów jest więc istotnym problemem. Ze względu na ograniczony dostęp do danych meteorologicznych w Polsce, do modelowania kanalizacji zaleca się najczęściej opady modelowe, które powinny odzwierciedlać podstawowe właściwości lokalnych opadów, tj. zmienność wysokości (zamiennie intensywności czy natężenia) w czasie [14, 31, 51, 68, 69, 94]. Jednakże różnorodność rzeczywistych opadów deszczu w znacznym stopniu wpływa na niepewność w uzyskaniu miarodajnych wyników modelowania odpływu ze zlewni. Stąd też ważne jest znalezienie takiego wzorcowego hietogramu, który w sposób możliwie dokładny odzwierciedli typową zmienność w czasie parametrów rzeczywistych – lokalnych opadów.

W literaturze opisanych jest wiele metod tworzenia hietogramów wzorcowych dla warunków lokalnych bądź regionalnych. Przykładowo w Niemczech do modelowania zjawiska opad–odpływ w zlewniach zurbanizowanych stosowane są najczęściej opady modelowe Eulera typu II, bądź też wzorce rozkładów DVWK [4, 31, 80]. Modele te są także stosowane w Polsce, jednakże brak jest kompleksowej weryfikacji zasadności ich stosowania w polskich warunkach klimatycznych. Wspomniane wzorce opadów charakteryzują się pojedynczymi tzw. pikami szczytowych wartości intensywności deszczu oraz nieliniowym bądź liniowym wzrostem i spadkiem intensywności, odpowiednio przed i po pikie. W szczególności dla opadów modelowych Eulera typu II pik ten występuje w jednej trzeciej całkowitego czasu trwania deszczów, a dla „miarodajnego” wzorca DVWK – w połowie tego czasu. Tworzenie hietogramów wzorcowych wymaga więc określenia zmian parametrów opadu w czasie jego trwania, a w tym ustalenia położenia pikę maksymalnej intensywności deszczu. Do tego celu wykorzystuje się najczęściej krzywe wysokości lub intensywności deszczów (DDF czy IDF), bądź modele opadów maksymalnych (fizykalne czy probabilistyczne), dla przyjmowanych częstości przewyższeń – według zaleceń PN-EN 752 i wytycznych DWA-A118. Modele opadów – krzywe DDF/IDF opracowane dla Polski, Niemiec czy Czech są zbliżone do siebie jakościowo, lecz różnią się ilościowo [53]. O zjawisku opadowym danego obszaru decyduje wiele uwarunkowań, do których zalicza się: położenie geo-

graficzne, wyniesienie ponad poziomem morza, lokalne ukształtowanie powierzchni i sposób zagospodarowania terenu.

Zarysowane we wstępie problemy badawcze związane z tworzeniem hietogramów wzorcowych w zastosowaniu do modelowania niezawodności działania systemów kanalizacyjnych są przedmiotem szczegółowych badań w prezentowanej pracy. Współczesne metody badawcze stosowane w hydrologii, w powiązaniu z wiedzą z zakresu statystyki, rachunku prawdopodobieństwa i modelowania matematycznego, umożliwiają bowiem rozwiązywanie podanych problemów badawczych.

2. Podstawy modelowania opadów

2.1. Ogólna charakterystyka opadów deszczowych

Źródłem opadów są chmury tworzące się w efekcie kondensacji pary wodnej w atmosferze. Opady występują najczęściej w strefach frontów atmosferycznych, gdzie stykają się ze sobą masy powietrza o różnych temperaturach. W zależności od rodzaju frontu: ciepły, chłodny czy okluzji, występujące opady mają różny charakter. Front ciepły oznacza, że masa ciepłego powietrza wypiera chłodną, nasuwając się nad nią wzdłuż pochylonej powierzchni frontalnej. Występują wówczas chmury *Cirrus*, gęstniejące i przechodzące w *Cirrostratus*, a następnie w *Altostratus* i *Nimbostratus*, którym towarzyszą już opady. W przypadku frontu chłodnego bardziej aktywne są cięższe masy powietrza i to one wypierają masę ciepłego powietrza. W strefie frontowej pojawiają się wypiętrzone chmury burzowe *Cumulonimbus*, którym towarzyszą często gwałtowne opady. Front okluzji występuje wówczas, gdy front chłodny i wędrujący przed nim front ciepły łączą się. Może on mieć charakter frontu ciepłego lub chłodnego [56, 71, 75, 85].

Opady atmosferyczne występują zarówno w postaci ciekłej (deszczu), jak i stałej (śniegu czy gradu). Ze względu na odmienny charakter splotu powierzchniowego tych wód: natychmiastowy w przypadku deszczów oraz przesunięty w czasie w przypadku topnienia śniegu czy lodu, do wymiarowania systemów odwodnień terenów rozważane są wyłącznie opady deszczowe, dające największe – szczytowe odpływy.

W strukturze czasowo-przestrzennej opadów deszczowych występujących w Polsce wyróżnia się najczęściej trzy typy genetyczne [9, 56, 57, 87, 92]:

- opady konwekcyjne (K) – krótkotrwałe, najczęściej do ok. 2 godzin,
- opady frontalne (F) – o czasie trwania od 2 do 12 godzin,
- opady niżowe (N) – długotrwałe, najczęściej ponad 12 godzin.

Intensywność deszczu (I – zmiany wysokości opadu Δh w czasie Δt) nie jest stała w czasie jego trwania, jak też w przestrzeni objętej opadem. Deszcze wyjątkowo intensywne (np. ulewne czy nawalne) zdarzają się rzadko, trwają krótko i mają mały zasięg terytorialny. Deszcze średnio czy mało intensywne występują częściej, trwają dłużej – często z przerwami i obejmują większe obszary. Na przykład do wymiaro-

wania kanalizacji deszczowej największe znaczenie mają intensywne opady deszczów – o czasie trwania ograniczonym czasem przepływu w kanałach, zwykle do kilku godzin [4, 16, 18, 47, 48, 51, 59, 72, 95, 96].

Związki wysokości (zamiennie intensywności lub natężenia) opadów deszczu z czasem trwania i częstością występowania – typu DDF (zamiennie typu IDF), opracowane dla wielu regionów geograficznych Europy są do siebie podobne. Nie znaczy to, że są one równe ilościowo. Ekstremalne wysokości opadów (o czasach trwania od 5 min do 72 h) zarejestrowane w warunkach hydrologicznych Polski nie różnią się znacząco od notowanych w krajach centralnej Europy, podobnie jak i opady maksymalne zmierzone na stacji IMGW – PIB we Wrocławiu – Strachowice (w okresie 1960–2009) w porównaniu do stacji IMGW – PIB w Warszawie – Bielany (1960–1990) [53]. Jest to szczególnie widoczne dla opadów o czasach trwania 1, 2 i 3 doby dla Polski, Niemiec i Czech, a także dla wszystkich zakresów czasu t dla Wrocławia i Warszawy (tab. 2.1).

Tabela 2.1. Ekstremalne wysokości opadów (h w mm) w wybranych krajach Europy na tle zmierzonych we Wrocławiu i w Warszawie [53]

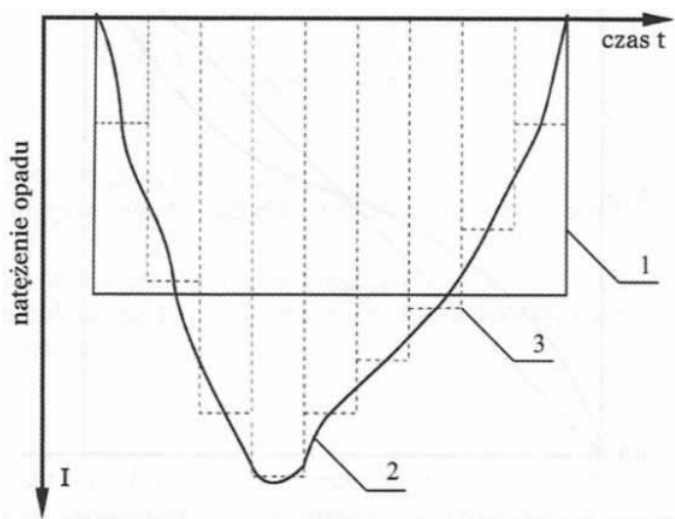
Kraj/ miasto	Czas trwania opadu (t):											
	minuty				godziny					doby		
	5	10	15	30	1	2	3	6	12	1	2	3
Polska	25,3	80	79,8	126	176,1	117,9	220	221,8	–	300	428	557
Niemcy	–	126	–	40	200	239	246	112	–	312	379,9	458
Czechy	29,8	39,8	50,2	79,9	92,8	117	126,6	158,5	203,6	345,1	380	536,7
Słowenia	–	–	56	84	141	147	191	275	297	363	584	–
Norwegia	17,9	31,5	–	60	64,9	–	–	105	142,2	229,6	378,9	402,4
Wrocław	13,1	18,7	24,7	32,9	35,3	57,7	61,9	63,1	64,2	80,1	103,9	116,9
Warszawa	20,6	21,9	28	36,6	40,8	49,5	50,4	57	68	80,1	109,7	113,3

Na potrzeby modelowania pomiary opadów powinny być prowadzone z zachowaniem odpowiedniej rozdzielczości czasowej. Miarą tej rozdzielczości jest krok czasowy, z którym rejestrowane są przyrosty wysokości opadu (Δh) w czasie (Δt), co umożliwia wyznaczenie „chwilowej” intensywności (zamiennie natężenia jednostkowego) deszczu. Rejestrację opadów prowadzi się w sposób punktowy – w sieci stacji pomiarowych, co wymaga stosowania odpowiednich metod interpretacji uzyskanych wyników. W zależności od wielkości obszaru i zróżnicowania czasowego opadów (wysokości dobowe, godzinowe czy minutowe), w wyniku generalizacji zmienia się stopień dokładności odwzorowania ich czasoprzestrzennego rozkładu. Dla obszaru kraju czy też regionu izohiety opadów mają najczęściej w miarę regularny przebieg, podczas gdy w odwzorowaniach dla mniejszych powierzchni (np. aglomeracji miejskich), przebiegi izolinii są bardziej zawile – im wyższa jest gęstość sieci pomiarowej opadów, silnie uzależnione od lokalnych warunków środowiskowych [53].

Pomiary opadów atmosferycznych wykonywane były w przeszłości za pomocą deszczomierzy Hellmana i pluwiografów pływakowych [51, 63]. Przyrządy te, ze

względu na brak systemu ogrzewania były stosowane jedynie w okresie dodatnich temperatur, a więc zwykle od 1 maja do 31 października (tzw. ciepłego półrocza, miesiące: V–X). W pluwiografach pływakowych zmienność w czasie opadów deszczowych rejestrowana była na papierowych paskach, o podstawowej podziałce – rozdzielczości czasowej 10 minut. Wadą pluwiografów była więc stosunkowo mała dokładność zapisu zmian wysokości opadów w czasie, szczególnie w przypadku intensywnych opadów deszczowych [31, 41, 52, 53, 63]. Od kilkunastu lat dane opadowe rejestrowane są z wykorzystaniem deszczomierzy elektronicznych: korytkowych (np. na stacji meteorologicznej IMGW – PIB we Wrocławiu od 2007 r.), bądź wagowych (np. w sieci MPWiK we Wrocławiu od 2012 r.) – z cyfrowym zapisem parametrów opadów, w rozdzielczości czasowej 1 minuty.

Hietogram jest graficznym zapisem zmian parametrów opadu, tj. wysokości lub intensywności lub natężenia jednostkowego, w czasie jego trwania. Funkcje zmienności parametrów opadu mogą mieć postać ciągłą bądź dyskretną (w tym wymiarową bądź bezwymiarową), co zobrazowano na rysunku 2.1.

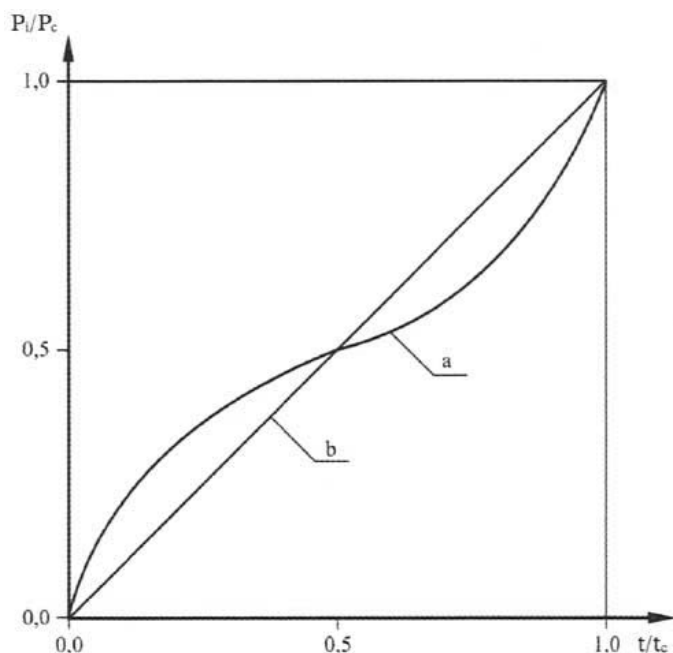


Rys. 2.1. Sposoby przedstawiania przebiegu opadów w czasie:

1 – hietogram blokowy, 2 – hietogram chwilowy (rzeczywisty), 3 – hietogram słupkowy [28]

Przykładem postaci ciągłej i wymiarowej jest tzw. hietogram chwilowy (ang. *instantaneous hyetograph*), będący „rzeczywistym” odzwierciedleniem zarejestrowanych zmian parametrów opadu (wysokości bądź intensywności, bądź natężenia jednostkowego) w czasie jego trwania (hietogram 2 na rys. 2.1). Hietogramy dyskretne i wymiarowe przedstawiają natomiast uśrednione parametry opadu w przyjętym przedziale czasu, najczęściej w postaci bloków np. dla całego czasu trwania opadu (t), lub słupków dla przyjętych przedziałów czasu, np. $\Delta t = 5$ min (hietogramy 1 i 3

na rys. 2.1). Przebieg opadu w czasie można również przedstawić w postaci bezwymiarowej i ciągłej, jako tzw. hietogram skumulowany (ang. *cumulative hyetograph*), obrazujący zależność względnej wysokości opadu od względnego czasu jego trwania. Bezwymiarowe współrzędne takiej krzywej sumowej opisują (rys. 2.2): na osi rzędnych: stosunki zsumowanej wysokości opadu P_i (od początku do chwili t) do całkowitej wysokości opadu P_c , natomiast na osi odciętych: stosunki zsumowanego czasu t (w którym wysokość opadu wyniosła P_i) do całkowitego czasu trwania opadu ($t_c = T$). Tak skumulowana wysokość opadu, jak i skumulowany czas jego trwania wyrażane są w ułamku (lub w procentach) całkowitych wartości (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Hietogram skumulowany (bezwymiarowy):
a – rozkład dla hietogramu rzeczywistego, b – rozkład dla hietogramu
o stałej wysokości w czasie [28]

Hietogram wzorcowy jest definiowany jako syntetyczny opad oparty na analizie statystycznej historycznych zapisów opadów w danym terenie, którego ideą jest reprezentacja typowych lokalnych cech opadów w formie graficznego zapisu zmian wysokości (zamiennie intensywności lub natężenia jednostkowego) w określonym czasie trwania i dla określonej częstości występowania z przewyższeniem, do zastosowań praktycznych.

Programy użytkowe do modelowania działania systemów odwodnień terenów (np. Hystem–Extran, InRoads&Sanitary, Mike Urban, Mouse, SWMM) wymagają wpro-

wadzenia danych o opadach w postaci dyskretnej [4, 48, 51, 69, 107]. Hietogram ma wówczas postać wykresu słupkowego. Wysokość słupka prezentuje intensywność opadu w przyjętym przedziale czasu. W dalszej części pracy omówione zostaną najbardziej znane metody tworzenia hietogramów wzorcowych, będące rezultatem badań przeprowadzonych w różnych rejonach świata, dla różnych warunków klimatycznych.

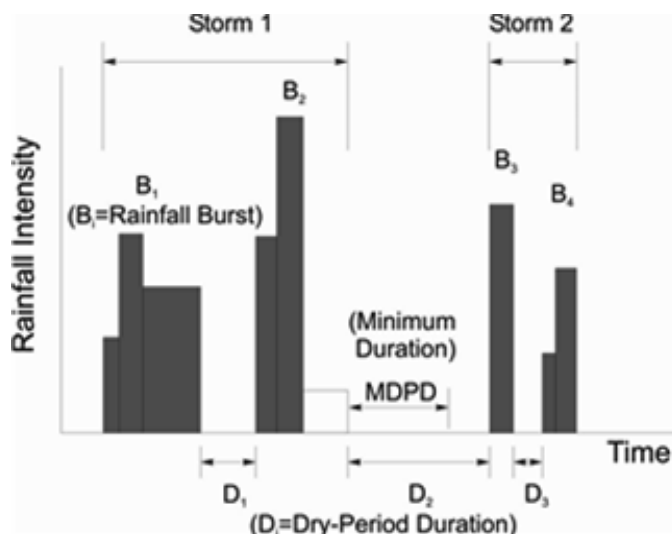
2.2. Wybrane zagadnienia badawcze w modelowaniu opadów

2.2.1. Definiowanie niezależnych zjawisk opadowych

Jak już wspomniano, szczególnym problemem w modelowaniu zjawiska opad-odpływ jest wybór miarodajnego scenariusza obciążenia zlewni opadem. Scenariusz ten powinien odzwierciedlać przebieg typowych opadów rzeczywistych. Wymaga to m.in. ustalenia podstawowych parametrów deszczu, tj.: czasu trwania (t) i wysokości (h), w tym rozkładu zmian wysokości (Δh) w czasie (Δt):

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Intensywność deszczów (wg I (2.1)) ustalana jest zwykle dla odrębnych zdarzeń opadowych, które mają charakter losowy. Aby zdefiniować niezależne zdarzenie



Rys. 2.3. Idea wyodrębniania niezależnych zjawisk opadowych: „deszcz 1” i „deszcz 2” [19]

opadowe, konieczne jest określenie minimalnego czasu trwania przerwy pomiędzy sąsiednimi niezależnymi zdarzeniami, co z kolei wymaga ustalenia kryteriów wyodrębniania takiego czasu [19, 70, 78]. Ilustrację idei wyodrębniania niezależnych zjawisk opadowych przedstawiono na rysunku 2.3, cytowanym z pracy Bonty [19].

Epizody opadowe (B_i) – o charakterze ciągłym, oddzielone są okresami bezopadowymi (D_i). W szczególności epizody opadowe B_1 i B_2 są oddzielone przez okres bezdeszczowy D_1 , epizody B_2 i B_3 przez okres D_2 , natomiast B_3 i B_4 przez D_3 . Okres umożliwiający wydzielenie niezależnych od siebie zdarzeń opadowych określa się w literaturze jako minimalny okres bezdeszczowy – MDPD (ang. *Minimum Dry – Period Duration*). Na rysunku 2.3 spełniony jest warunek czasów: $D_3 < D_1 < \text{MDPD} < D_2$, co prowadzi do wyodrębnienia dwóch niezależnych deszczy („deszcz 1” i „deszcz 2”).

W literaturze przedmiotu opisanych jest wiele metod określania minimalnego okresu bezdeszczowego (MDPD). W pracy Powella i in. [78] z 2007 r. przedstawiono ogólny ich podział na:

1. Metody praktyczne oparte na intensywności opadów (ang. *practical/intensity driven methods*).
2. Metody statystyczne (ang. *statistical methods*).
3. Metody ustalonego czasu (ang. *set time methods*).

Problem ten jest szerzej omówiony w pracy doktorskiej Wartalskiej [94] z 2019 r. Zgodnie z publikacją Mazurkiewicz i Sowińskiego [70] z 2014 r. kryteria wyznaczania MDPD w zlewniach miejskich podzielić można na 2 grupy:

1. Kryteria oparte na charakterystykach fizycznych deszczu.
2. Kryteria oparte na analizie czasu opróżnienia się systemów odwodnieniowych po intensywnym opadzie deszczu.

Większość przedstawionych w literaturze kryteriów dotyczy tzw. metod ustalonego czasu, które można intuicyjnie powiązać z czasem reakcji obiektów inżynierskich na opad deszczu, tj. z czasem opróżnienia się sieci kanalizacyjnych po intensywnym opadzie.

W Polsce badania nad MDPD zapoczątkowali Kupczyk i Suligowski, którzy w pracy [57] z 1997 r. zalecili uzależnianie wartości MDPD od rodzaju opadów. Dla opadów krótkotrwałych (o czasie trwania do około 1,5 h), które pochodzą z pojedynczych, szybko przemieszczających się konwekcyjnych komórek opadowych, zalecono przyjęcie $\text{MDPD} = 2$ godziny. Kryterium to ustalono po uwzględnieniu badań Eaglesona [32] z 1978 r. Dla opadów średnio- i długotrwałych (o czasie trwania ponad 3 h) zalecają natomiast przyjęcie okresu MDPD większego od dłuższego spośród czasów trwania sąsiadujących ze sobą zdarzeń opadowych.

Zgodnie z niemieckimi wytycznymi DWA – A118 [4] z 2006 roku, minimalny odstęp pomiędzy opadami, uzależniony od czasu opróżnienia sieci kanalizacyjnej po intensywnym opadzie, nie powinien być krótszy od 4 godzin. Kryterium to odnosi się do opadów o wysokościach nie mniejszych niż 10 mm oraz minimalnej chwilowej intensywności wynoszącej 0,1 mm w ciągu 5 minut (lub 0,5 mm w ciągu 1 h). Podstawą

tego kryterium były badania Wenzela i Voorheesa [98] z 1981 r., gdzie w warunkach zlewni miejskich oszacowano minimalną przerwę do wyodrębnienia niezależnych zdarzeń opadowych na 4 do 5 godzin. Podobne wartości proponowano w pracach: Arnella [7] z 1983 r. i Schillinga [79] z 1984 r., powstałych na potrzeby modelowania odpływu ze zlewni miejskich.

Kryterium MDPD wg wytycznych DWA – A118 jest często stosowane w Polsce (m.in. w pracach [46, 53, 59, 62]) do wyodrębniania zjawisk opadowych do analiz statystycznych częstości ich występowania, tj. na potrzeby tworzenia szeregów czasowych opadów (IDF/DDF). Uzasadnieniem poprawności przyjęcia takiego założenia jest fakt, że Polska i Niemcy mają zbliżone warunki hydrologiczne, tj. są położone w strefie przejściowej klimatu kontynentalnego i morskiego.

Najkrótszą przerwę pomiędzy niezależnymi zdarzeniami opadowymi – MDPD równą 1,0 h zaproponował i zweryfikował w praktyce Johansen w pracy doktorskiej [76] z 1979 r. Kryterium Johansena doprecyzowali Madsen i in. w pracy [67] z 1998 r., a mianowicie:

- dla opadów o czasie trwania krótszym od 1 godziny – MDPD wynosi 1,0 h,
- dla opadów trwających powyżej 1 h – MDPD powinna przewyższać dłuższy czas trwania jednego z sąsiednich zdarzeń opadowych.

Kryterium Madsena zastosowali Thorndahl i Willems, w pracy [91] z 2008 r., do wyodrębnienia epizodów opadowych na potrzeby modelowania probabilistycznego odpływu ze zlewni miejskiej. W nieco zmienionej wersji kryterium Madsena zastosowała Mazurkiewicz w pracy doktorskiej [68] z 2016 r., mianowicie:

- dla deszczy o czasie trwania $t \leq 1,0$ h – okres MDPD wynosi 1,0 h, podczas którego nie wystąpi żaden opad lub wystąpi opad o wysokości $h \leq 0,2$ mm, przy czym odstęp czasu pomiędzy początkowym lub końcowym impulsem opadu deszczu a ewentualnym eliminowanym impulsem, powinien przekraczać 15 minut,
- dla deszczy o czasie trwania: $t > 1,0$ h – okres MDPD powinien być dłuższy od czasów trwania sąsiadujących ze sobą zdarzeń opadowych, w którym nie wystąpi żaden deszcz lub wystąpi deszcz o wysokości $h \leq 0,2$ mm, przy tym odstęp czasu pomiędzy końcowym lub początkowym impulsem opadu deszczu a ewentualnym eliminowanym impulsem powinien przekraczać 15 min.

Kryteria Madsena i in. [67] w uszczegółowionym zapisie zaproponowanym przez Mazurkiewicz [68], jako zweryfikowane w praktyce na opadach w zlewniach miejskich, zastosowano również w pracy doktorskiej Wartalskiej [94] z 2019 r. do wydzielenia niezależnych opadów na potrzeby analizy kształtów lokalnych hietogramów.

2.2.2. Metody tworzenia szeregów czasowych typu DDF/IDF

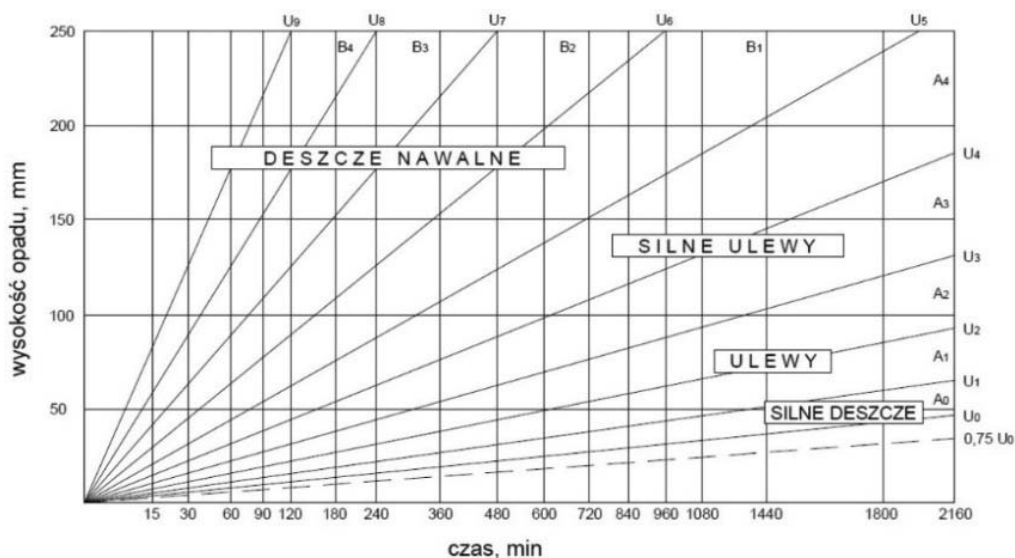
Niezależne zdarzenia opadowe wybierane do analiz statystycznych częstości ich występowania powinny spełniać określone wymagania odnośnie do wysokości (inten-

swyności) w czasie ich trwania. Ze względów praktycznych interesują nas najczęściej intensywne opady deszczowe. Analizowanie wszystkich zarejestrowanych opadów, w tym o małej czy średniej intensywności (metodą przeglądu zupełnego), wydłuża tylko listę tworzonych szeregów czasowych opadów znacznie poza interpretowany zwykle zakres częstości (np. $C \in [1; 50]$ lat). Należy więc przyjąć odpowiednie kryterium wyboru intensywnych deszczów. Na przykład podział opadów wg Chomicza opiera się na kryterium [26]:

$$U_k = \sqrt{2^k} \sqrt{t} \quad (2.2)$$

gdzie: U – wysokość opadu kategorii k w skali Chomicza, mm, k – numer skali (stosowny do kategorii) opadu: $k \in [0; 9]$, t – czas trwania opadu, min.

Na rysunku 2.4 przedstawiono podział opadów deszczowych wg kryterium Chomicza. I tak: obszar pomiędzy prostymi U_0 i U_1 określa silne deszcze, obszar pomiędzy U_1 i U_3 – ulewy, obszar między U_3 i U_5 – silne ulewy, a powyżej U_5 – deszcze nawalne. Opady znajdujące się poniżej granicznej wysokości opadu U_0 traktowane są jako tzw. zwykłe deszcze.



Rys. 2.4. Klasyfikacja opadów wg skali Chomicza [53]

Jak wykazali Bogdanowicz i Stachy w monografii [17] z 1998 r., w 30-leciu 1961–1990 na 63 stacjach meteorologicznych w Polsce największe w roku wysokości opadów dobowych zdarzyły się w półroczu zimowym (XI–IV) jedynie sporadycznie (przeciętnie 2 razy na 30 lat) i były znacznie niższe od średniej z najwyższych opadów dobowych. Tak więc oparcie się na wynikach pomiarów opadów

z półrocza ciepłego (V–X) może być uznane za miarodajne dla opadów maksymalnych, zwłaszcza typu: silne deszcze, ulewy, silne ulewy czy deszcze nawalne – wg kryterium Chomicza (rys. 2.4).

Szeregowanie opadów deszczowych według malejących przedziałowych wysokości (zamiennie intensywności lub natężenia jednostkowego) ma na celu przyporządkowanie empirycznych prawdopodobieństw (p) przewyższenia bądź zamiennie statystycznych powtarzalności – częstości (C), tworzonym w ten sposób seriom czasowym opadów syntetycznych. Idea rozkładu empirycznego wynika wprost z częstościowej interpretacji prawdopodobieństwa występowania danej wysokości opadu [53]:

$$p(m, N) = \frac{m}{N+1} \quad (2.3)$$

$$C(m, N) = \frac{N+1}{m} \quad (2.4)$$

gdzie: m – miejsce danego wyrazu w ciągu (szeregu) rozdzielczym opadów, N – liczebność ciągu.

W monografii [53] do szeregowania opadów ze względu na częstość występowania zalecono do stosowania metodę przewyższeń progowych – POT (ang. *Peak Over Threshold*). Do wyboru opadów miarodajnych do analiz statystycznych zaproponowano modyfikację kryterium Chomicza – przez obniżenie o 25% progowej wysokości dla silnych deszczy (U_0), czyli przyjęto próg o wartości $h \geq 0,75t^{0,5}$. Miało to na celu wyodrębnienie do rocznych zestawień większej liczby intensywnych deszczy, tak aby każdy sezon pluwiograficzny (V–X) był reprezentowany przez co najmniej kilka opadów. Przykładowo, z pluwiogramów wyodrębniano opady o wysokości: $h \geq 1,7$ mm dla interwału $t = 5$ min, $h \geq 2,4$ mm dla $t = 10$ min, $h \geq 2,9$ mm dla $t = 15$ min itd. dla $t = 180$ min, aż do $h \geq 20,0$ mm dla $t \geq 720$ min (12 godzin) – do 72 h włącznie. Kryterium to zostało wykorzystane m.in. w pracy Mazurkiewicz [68] z 2016 r. Selekcję opadów o ponadprogowej wysokości w 16 przedziałach czasów trwania, z okresu $N = 50$ lat obserwacji, dokonywano metodą sumy ruchomej. Do analiz statystycznych wyselekcjonowano 514 opadów syntetycznych, co umożliwiło przypisanie 500 szeregom czasowym częstości występowania od: $C = 50$ lat, przez $C = 1$ rok, aż do podczęstości $C = 0,1$ rok – 10 razy w roku – interpretując wówczas wzór (2.4) jako: $C(m, N) = N/m$.

W monografii Kaźmierczaka [46] z 2019 r. zaproponowano modyfikację metody przewyższeń progowych (POT), czyli próbę losową do szeregowania opadów zalecono przyjmować powyżej progu odcięcia na poziomie:

$$h(t) = 3,5t^{0,275} \quad (2.5)$$

Metoda ta jako efektywniejsza w zakresie szeregowania opadów dla częstości $C \in [1; 50]$ lat znalazła zastosowanie w pracy doktorskiej Wartalskiej [93] do opracowania modeli opadów maksymalnych (z wielolecia 1968–2017) dla Jeleniej Góry i Wrocławia.

Dla uszeregowanych już opadów możliwe do zastosowania są dwie odmienne metodyki interpretacji i uogólnień wyników badań. Pierwsza metoda, zastosowana m.in. przez Błaszczyka [15], Licznara i Łomotowskiego [61] czy Wartalską [94] polega na przyjęciu hipotezy, iż uszeregowanym malejąco opadom (o danej wysokości wraz z wyższymi) można *a priori* przypisać empiryczne prawdopodobieństwo występowania – odniesione co najwyżej do długości okresu obserwacji opadów. Uogólnienie wyników polega tutaj na estymacji (metodą najmniejszych kwadratów) współczynników empirycznych przyjętej postaci modelu fizykalnego opadów, np. postaci Lindleya [51]. Druga metoda, zastosowana m.in. przez Bogdanowicz i Stachý’ego [24], Kotowskiego i in. [53] czy Kaźmierczaka [46], zakłada wygładzanie metodami probabilistycznymi zmierzonych serii czasowych opadów i na tej podstawie przypisywanie im statystycznych częstości występowania, nawet w dłuższym okresie niż okres obserwacji opadów. Uogólnieniem wyników jest tutaj model probabilistyczny opadów, w postaci wyestymowanego kwantyla przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa.

Ocenę dokładności odwzorowań tworzonych modeli prowadzić można na podstawie różnych wskaźników jakości dopasowania. Nie są one jednak standaryzowane. Wyniki odwzorowań uznaje się za satysfakcjonujące, gdy spełniona zostanie pożądana dokładność w zakresie wybranej wielkości – np. wysokości (h). Najczęściej stosowane są klasyczne wskaźniki do porównywania wyników obliczeń z wynikami pomiarów [46, 51, 54, 65, 66, 72], przykładowo: względny błąd resztkowy średniokwadratowy – *rRMSE* (ang. *Relative Residual Mean Square Error*):

$$rRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_{o,i} - h_{p,i}}{h_{p,i}} \right)^2} \quad (2.6)$$

We wzorze (2.6) indeksy o i p oznaczają odpowiednio: obliczenia i pomiary, a n oznacza liczbę par danych – porównywanych wzajemnie wartości (przykładowo h).

2.2.3. Metody tworzenia hietogramów wzorcowych bazujące na krzywych IDF

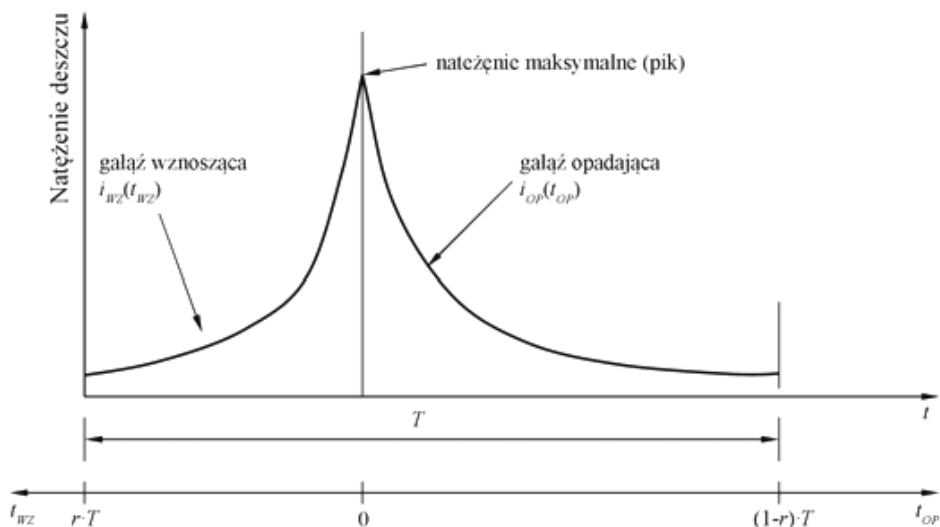
W literaturze opisanych jest wiele sposobów tworzenia hietogramów wzorcowych. Najbardziej ogólny ich podział, zaproponowany przez Chow i in. w pracy [27] z 1988 r., dzieli metody na dwie grupy: metody bazujące na historycznych zapisach opadów oraz metody bazujące na krzywych IDF (ang. *Intensity – Duration – Frequency*). Bar-

dziej szczegółowy podział przedstawiono w pracy Venezziano i Villani z 1999 r. [93], w której metody opracowania hietogramów wzorcowych podzielono na cztery grupy, cytowane m.in. w pracach [23, 33, 68, 83, 94]:

1. Hietogramy bazujące na pojedynczym punkcie krzywej IDF.
2. Hietogramy bazujące na całych krzywych IDF.
3. Hietogramy tworzone na podstawie rzeczywistych danych opadowych.
4. Hietogramy tworzone z wykorzystaniem modeli stochastycznych.

Do metod bazujących na pojedynczym punkcie krzywej IDF należą hietogramy o prostych kształtach figur geometrycznych. Najbardziej reprezentatywne są tutaj hietogramy blokowe – o kształcie prostokąta, charakteryzujące opady o stałej intensywności w czasie ich trwania. Opady tego typu wykorzystywane są powszechnie do wymiarowania systemów kanalizacji deszczowej czy ogólnospławnej, tzw. metodami czasu przepływu [4, 18, 48, 51, 80]. Prosta konstrukcja hietogramu blokowego nie odzwierciedla jednak rzeczywistych przebiegów opadów w czasie ich trwania [1, 2, 8, 10, 20, 30, 35, 42, 68, 94, 103, 105].

Do reprezentatywnych metod opartych na całej krzywej IDF należą hietogramy modelowe Chicago i Eulera. Pierwsza metoda, zaproponowana przez Keifer i Chu w 1957 r. [50], nazwana jest metodą Chicago – od nazwy miasta, gdzie ją testowano (rys. 2.5).



Rys. 2.5. Schemat hietogramu wg metody Chicago [69]

Hietogram Chicago bazuje na krzywych IDF określonych dla dużej liczby zarejestrowanych intensywnych zjawisk opadowych typu konwekcyjnego. Ma postać ciągłą i cechuje się zmienną chwilową intensywnością – natężeniem opadu i jednym pikiem

maksymalnej wartości. Pik ten dzieli hietogram na dwie części: gałąź wznoszącą i opadającą (rys. 2.5). Istotne są tutaj dwa parametry: czas do piku t_{wz} (jako czas trwania opadu od momentu jego rozpoczęcia do wystąpienia piku) oraz czas po piku t_{op} (jako czas trwania opadu od momentu wystąpienia piku do zakończenia opadu), przy czym $T = t_{wz} + t_{op}$. Czasy te można wyznaczyć z funkcji, odpowiednio:

$$t_{wz} = rT \quad (2.7)$$

$$t_{op} = (1 - r)T \quad (2.8)$$

gdzie r – wskaźnik położenia piku definiowany jako stosunek czasu jego wystąpienia względem początku deszczu do całkowitego czasu trwania opadu $r = t_{wz}/T$.

Wskaźnik położenia piku (r) jest wielkością bezwymiarową, przyjmującą wartości z przedziału $0 < r < 1$.

Próbie zastosowania metody Chicago w polskich warunkach hydrologicznych podjęła Mazurkiewicz [68]. Materiał badawczy pochodził z 3 stacji pomiarowych, zlokalizowanych w centrum Poznania, z okresu ciepłych półroczy lat 2002–2012. Do określenia analitycznej postaci równań opisujących ciągłą formę hietogramu wykorzystano probabilistyczny model opadów maksymalnych Bogdanowicz–Stachý – o regionalnym zasięgu (postaci DDF) [17]. Hietogramy wzorcowe Chicago dla $C = 2$ lata i czasów trwania $t \in \{15; 30; 45; 60; 90; 120; 150; 180\}$ minut opracowano na potrzeby analiz

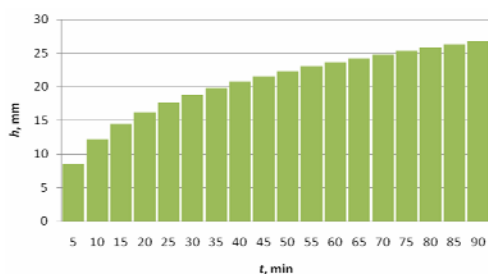
Tabela 1.2. Wskaźniki położenia piku w metodzie Chicago dla różnych lokalizacji [68]

Państwo	Miejscowość	Wskaźnik r
USA	Baltimore	0,399
	Chicago	0,375
	Cincinnati	0,325
	Philadelphia	0,494
Kanada	Ontario	0,488
Indie	Gauahati	0,416
Słowacja	Pieszczany	0,233
	Hurbanovo	0,210
	Łuczeniec	0,315
	Trebišov	0,360
	Kamenica	0,357
	Stropkov	0,349
	Poprad	0,338
	Žylica	0,375
Szwecja	Göteborg	0,43 dla $C = (0,2-0,5)$ lat 0,35 dla $C = (1-10)$ lat

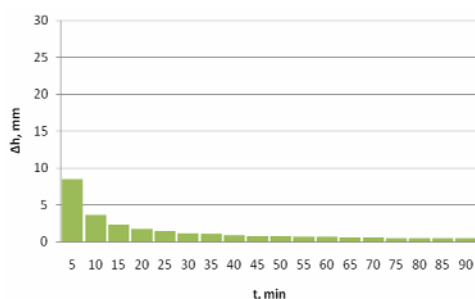
odpływu ze skanalizowanej zlewni miejskiej. Wskaźnik położenia pików ustalono w przybliżeniu na $r = 0,40$. W tabeli 2.2 zestawiono wartości wskaźnika położenia pików wyznaczone dla różnych państw – miejscowości, cytowane w pracy [68].

Należy zauważyć (tab. 2.2), że wartości wskaźnika r znacznie się różnią, nawet w obrębie danego kraju: $r \in [0,210; 0,494]$. Wskazuje to na potrzebę wyznaczania modeli hietogramów wzorcowych dla warunków lokalnych. Hietogramy tworzone na podstawie metodyki Keifer i Chu mają postać ciągłą – nienadającą się wprost do wykorzystania w modelowaniu zjawiska opad–odpływ z zastosowaniem istniejących programów użytkowych, gdzie wymagana jest dyskretna wartość przedziałowej intensywności opadów.

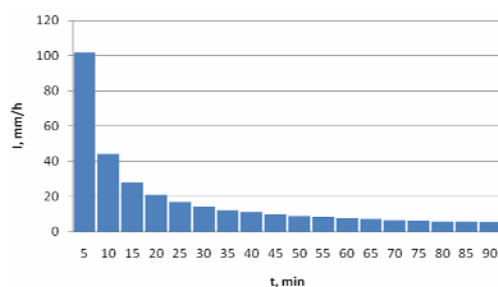
a) Przyrost wysokości opadu w czasie (DDF)



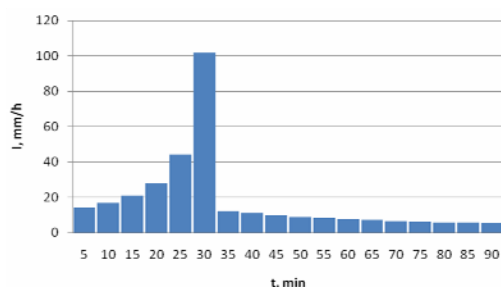
b) Zmiana wysokości opadu w przedziałach 5 min



c) Intensywność opadu w przedziałach 5 min (IDF)



d) Opad modelowy Eulera typu II



Rys. 2.6. Fazy tworzenia opadu modelowego Eulera typu II na podstawie probabilistycznego modelu opadów maksymalnych dla Wrocławia ($t = 90$ min, $C = 3$ lata) [51]

Najczęściej stosowanym w praktyce hietogramem wzorcowym jest model Eulera typu II. Model ten ma postać dyskretną i jest zalecany do modelowania kanalizacji w Niemczech – zgodnie z wytycznymi DWA – A118 z 2006 r. [4], a także od kilku lat również w Polsce [48, 49, 51, 55], w domniemaniu, że polskie warunki klimatyczne zbliżone są do niemieckich – strefa przejściowa klimatu kontynentalnego i morskiego [53]. Kształt hieto-

gramu Eulera typu II wymaga jednak odpowiedniej weryfikacji w polskich warunkach klimatycznych. Model ten opiera się na założeniu, że największa chwilowa (Δt) intensywność opadu (z krzywej IDF) występuje na końcu jednej trzeciej czasu jego trwania, co wykazano w pracach Ottera i Königera w 1986 r. [74]. Podczas tworzenia tego wzorca, dla pięciominutowego kroku dyskretyzacji czasu ($\Delta t = 5$ min), przedział o najwyższej intensywności z początku krzywej IDF (dla danej częstości występowania (C)) lokalizuje się na końcu 1/3 czasu trwania opadu modelowego. Kolejne przedziały o niższej intensywności szereguje się malejąco – na lewo od przedziału z najwyższą intensywnością, aż do momentu osiągnięcia czasu rozpoczęcia opadu. Pozostałe, przedziałowe intensywności szereguje się też malejąco, na prawo od przedziału z najwyższą intensywnością, aż do osiągnięcia czasu zakończenia opadu (rys. 2.6).

Dla ilustracji metody tworzenia wzorca Eulera typu II wykorzystano przykład z pracy [51], gdzie do weryfikacji napiętrzeń w kanałach deszczowych we Wrocławiu przyjęto częstość $C = 3$ lata dla czasu trwania opadu $t = 90$ min. Do opracowania wzorcowego opadu wykorzystano probabilistyczny model maksymalnych wysokości opadów we Wrocławiu (z okresu 1960–2009), oparty na kwantylu rozkładu prawdopodobieństwa Fishera–Tippetta typu III_{min}, o postaci [51, 53]:

$$h_{\max} = -4,583 + 7,412t^{0,242} + (97,105t^{0,0222} - 98,675)(-\ln p)^{0,809} \quad (2.9)$$

gdzie: h_{\max} – maksymalna wysokość deszczu, mm, t – czas trwania deszczu: $t \in [5; 4320]$, min, p – prawdopodobieństwo przewyższenia: $p \in [1; 0,01]$, –.

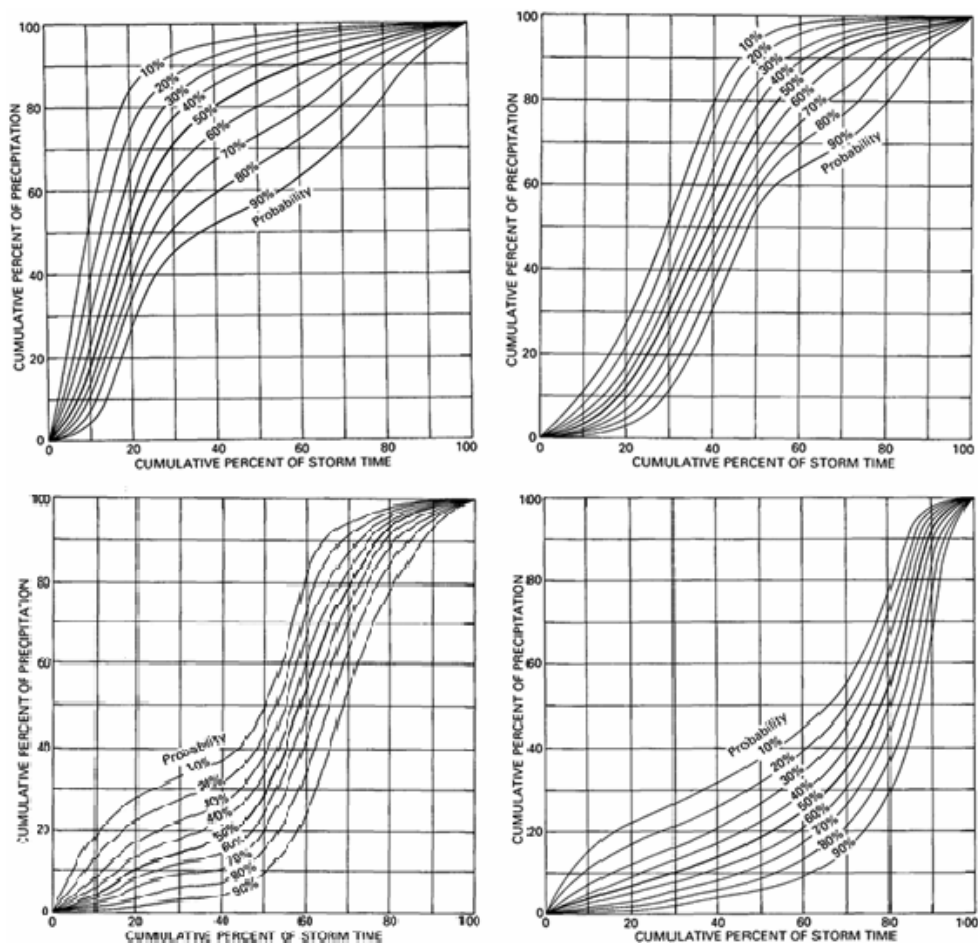
Ilustrację faz tworzenia opadu modelowego Eulera typu II zobrazowano na rysunku 2.6.

Próbie weryfikacji zasadności stosowania modelu Eulera typu II w polskich warunkach hydrologicznych podjęli Licznar i Szelağ w pracy [62] z 2014 r. Oparli się na opadach z 25 deszczomierzy w Warszawie, z okresu około 2 lat. Porównawcze modele Eulera typu II konstruowali z wykorzystaniem (nieaktualnej) formuły Błaszczyka (z 1954 r.) na natężenie deszczu miarodajnych. Stwierdzono pewną rozbieżność między przebiegiem uzyskanych krzywych a powszechnie stosowanym modelem Eulera typu II, zwłaszcza dla czasów trwania opadów $t > 180$ min. Jednakże model Eulera typu II ma zastosowanie dla małych zlewni miejskich, gdzie czasy trwania opadów miarodajnych, ograniczone czasem przepływu w kanałach, nie przekraczają zwykle 2 godzin [4, 51, 80]. Ponadto w przyjętej metodyce badań [59, 62, 64] nie uwzględniono częstości występowania analizowanych opadów, stąd nie ma możliwości wykorzystania otrzymanych hietogramów syntetycznych do modelowania systemów kanalizacyjnych.

2.2.4. Metody tworzenia hietogramów wzorcowych bazujące na rzeczywistych opadach

Podstawy metod tworzenia hietogramów dla rzeczywistych danych opadowych sformułował Huff w pracy [39] z 1967 r. Huff wykorzystał dane opadowe z okresu 12 lat

(1955–1966), pochodzące z 49 deszczomierzy, na obszarze o powierzchni 1037 km² we wschodniej części stanu Illinois (USA). Wyodrębnił 261 niezależnych opadów o czasach trwania od 1 h do 48 h, przyjmując za minimalny okres bezdeszczowy MDPD = 6 h. Do analiz statystycznych wybrał opady, dla których dla wszystkich deszczomierzy zarejestrowano średni opad powyżej 12,7 mm (0,5 cala) i/lub dla przynajmniej jednego deszczomierza przekraczający 25,4 mm. Na podstawie wstępnych analiz Huff dokonał podziału zdarzeń opadowych na 4 grupy, nazwane kwartylami – określającymi, w której części czasu trwania opadu wystąpiła jego maksymalna intensywność. Każda grupa określała kolejne 25% czasu trwania opadu. Dla każdej z grup opracował tzw. wykresy kwartylny, będące prezentacją stosunków skumulowanych wysokości opadów do skumulowanych czasów trwania, w postaci tzw. izoplei prawdopodobieństwa.

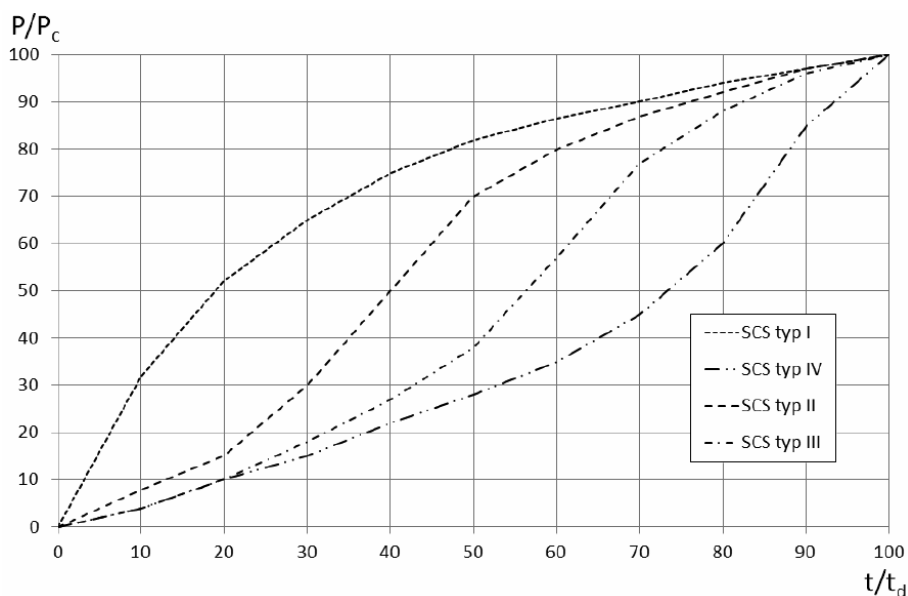


Rys. 2.7. Krzywe Huffa dla opadów z Illinois: a) pierwszego kwartyła, b) drugiego kwartyła, c) trzeciego kwartyła, d) czwartego kwartyła [40]

W pracy [40] z 1990 r. Huff przedstawił uogólnienie wyników swoich badań. Mianowicie sporządził łącznie 36 izoplei, po 9 dla każdej grupy kwartylniej (rys. 2.7). 10-procentowa krzywa prawdopodobieństwa jest interpretowana jako graniczna dla intensywności opadów, które zostaną przekroczone w przypadku mniej niż 10% liczby opadów. Według Huffa krzywa 50% (mediana) jest najbardziej reprezentatywna, a skrajne krzywe 10% i 90% stanowią reprezentację najbardziej ekstremalnych rozkładów czasowych opadów.

Opady pierwszego i drugiego kwartyla są najbardziej rozpowszechnione w Illinois. W szczególności: opady o czasie trwania $t \leq 6$ h wykazywały tendencję do częstszego powiązania z rozkładem wg pierwszego kwartyla, natomiast opady, których czas trwania wynosił $t \in (6, 12]$ h, należały najczęściej do drugiego kwartyla. Opady o dłuższych czasach trwania: o $t \in (12, 24]$ h miały najczęściej rozkład charakterystyczny dla trzeciego kwartyla, a opady o czasie trwania dłuższym od 24 godzin najczęściej kojarzone były z czwartym kwartylem. Należy jednak podkreślić, że poszczególne opady wśród wszystkich czasów trwania mogą być też związane z dowolnym z czterech typów rozkładów [41].

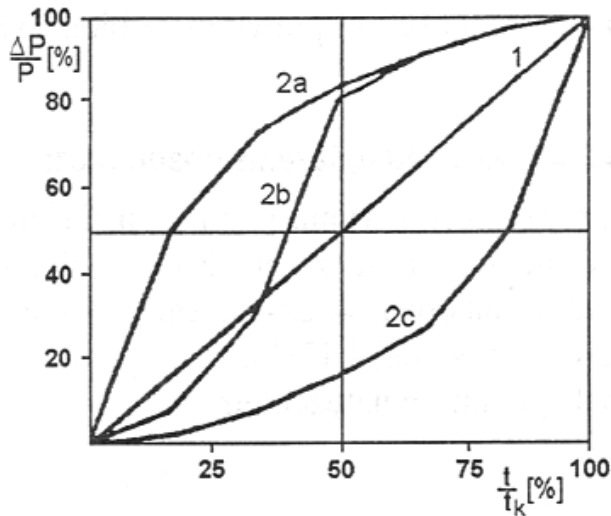
Idea bezwymiarowego opisu parametrów opadów na wzór krzywych Huffa znalazła powszechne zastosowanie do analiz zmienności opadów w wielu rejonach świata, w tym Europy i Polski [31, 45, 76, 90, 94]. Na jej podstawie stowarzyszenie SCS (ang. *Soil Conservation Service*) [82] opracowało wzorce bezwymiarowych krzywych sumowych opadów dla USA, co zilustrowano na rysunku 2.8.



Rys. 2.8. Wzorce krzywych sumowych opadów wg SCS dla USA [28]

W Niemczech, według wytycznych stowarzyszenia DVWK (niem. *Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau*) [31] (cytowanych m.in. w pracach [11, 22]), wyróżniono również 4 typy charakterystycznych rozkładów intensywności opadów w czasie, których bezwymiarowe hietogramy przedstawiono na rysunku 2.9:

1. Opad o stałej intensywności – opad blokowy (prosta 1).
2. Opad z maksymalną intensywnością na początku (krzywa 2a).
3. Opad z maksymalną intensywnością w środku (krzywa 2b).
4. Opad z maksymalną intensywnością na końcu zdarzenia (krzywa 2c).

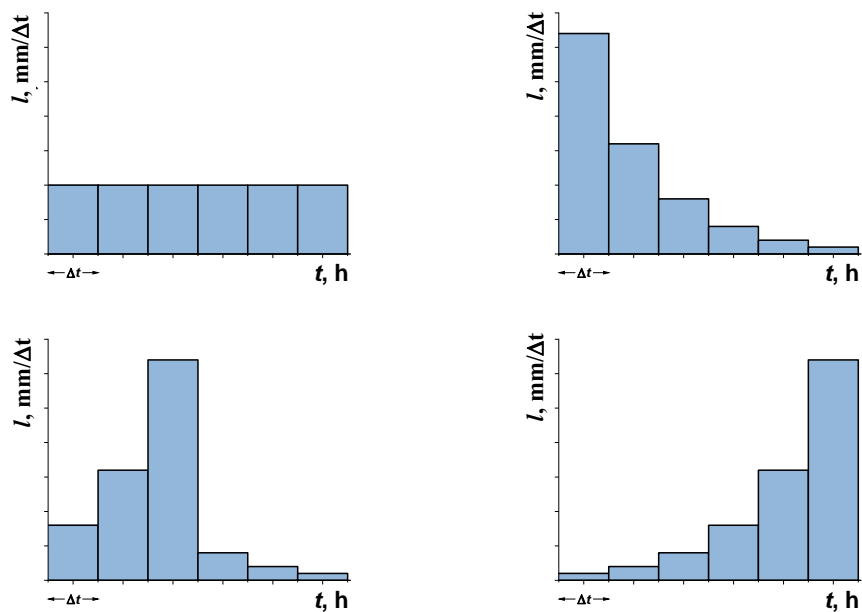


Rys. 2.9. Krzywe sumowe opadów dla 4 typów rozkładów w czasie wg DVWK:

- 1 – opad o stałej intensywności (blokowy);
- 2a – opad z maksymalną intensywnością na początku;
- 2b – w środku; 2c – na końcu zdarzenia [22]

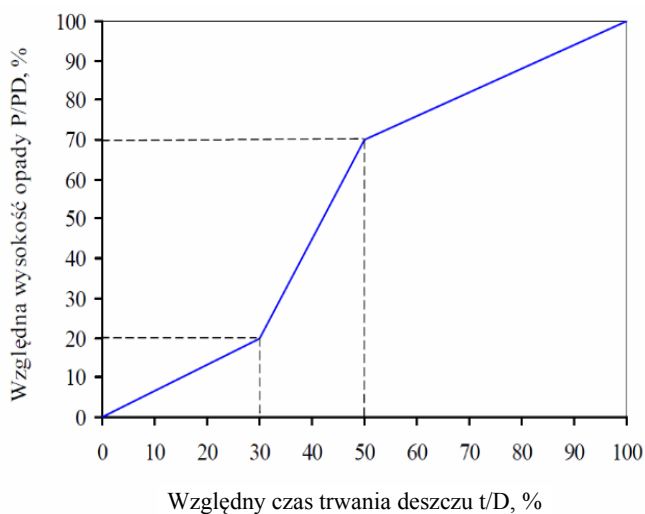
Na rysunku 2.10 dla każdego z 4 bezwymiarowych rozkładów (wg rys. 2.9) zobrazowano odpowiadające im wymiarowe hietogramy słupkowe z przyjętym podziałem – dyskretyzacją całkowitego czasu trwania opadów (t) na 6 równych przedziałów $\Delta t = 0,166 t$.

Zgodnie z zaleceniami DVWK [31], opad blokowy ma głównie zastosowanie do wymiarowania systemów odwodnień terenów tzw. metodami czasu przepływu. Do obliczeń hydrologicznych, w tym do modelowania zjawiska opad–odpływ w dużych zlewniach, należy stosować rozkład opadu w czasie określony w warunkach lokalnych. W przypadku braku takich danych, jako miarodajny należy przyjmować rozkład z maksymalną intensywnością w środku zdarzenia. Łamaną krzywą sumową takiego



Rys. 2.10. Hietogramy słupkowe 4 rozkładów intensywności deszczów w czasie wg DVWK [22]

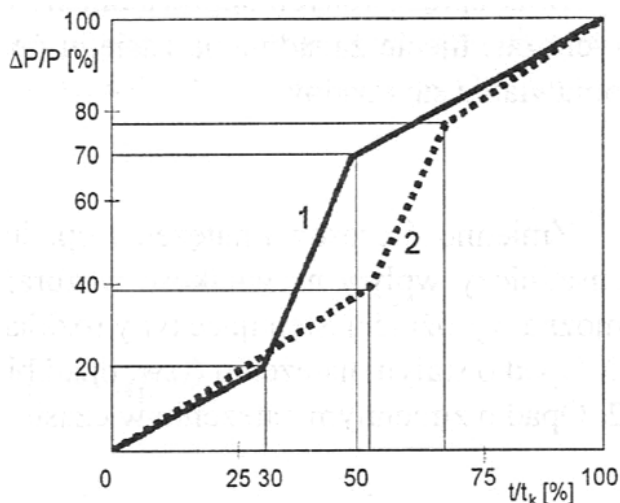
rozkładu – uproszczonego do 2 punktów węzłowych krzywej sumowej, tj. do 3 przedziałów o prostoliniowej zależności bezwymiarowej wysokości $P/PD \equiv h_i/P_c$ od bezwymiarowego czasu $t/D \equiv t_i/T$, przedstawiono na rysunku 2.11.



Rys. 2.11. Krzywa sumowa opadów wg DVWK dla Niemiec [12]

Zgodnie z przebiegiem krzywej sumowej (rys. 2.11), przez pierwsze 30% całkowitego czasu trwania opadu (tj. dla $t/D = 30\%$) występuje 20% jego całkowitej wysokości (tj. $P/PD = 20\%$), w połowie czasu trwania (tj. dla $t/D = 50\%$) pojawia się 70% (tj. $P/PD = 70\%$), a pozostałe 30% całkowitej wysokości opadu występuje w drugiej połowie czasu trwania deszczu. Rozkład ten ma zbliżony przebieg do rozkładu SCS typu II (por. z rys. 2.8). Wzorzec DVWK jest stosowany w Polsce, m.in. do określania przepływów maksymalnych o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia w przekrojach niekontrolowanych, zamykających zlewnie deszczowe o stopniu uszczelnienia powierzchni większym niż 5% [11–13].

W literaturze krajowej jest niewiele prac dotyczących rozkładów intensywności opadów w czasie i w przestrzeni. Zagadnieniami tymi zajmowali się m.in.: Gładysz (1987 [34]), Więzik (1988 [102]), Kupczyk i Suligowski (1997 [57]), Barszcz (2012 [13]), Mazurkiewicz (2016 [68]), Licznar i in. (2017 [62, 64]) oraz Wartalska (2019 [94]). Wciąż jednak brakuje wiarygodnego uogólnienia zmienności intensywności opadów w polskich warunkach hydrologicznych, zwłaszcza w zastosowaniu do modelowania odwodnień terenów. W większości krajowych publikacji autorzy zwykle cytują najbardziej znane w literaturze rozkłady, np. wg DVWK [31] czy wg DWA – A118 [4] (opracowane dla Niemiec), czy też wg SCS [82] (opracowane dla USA).



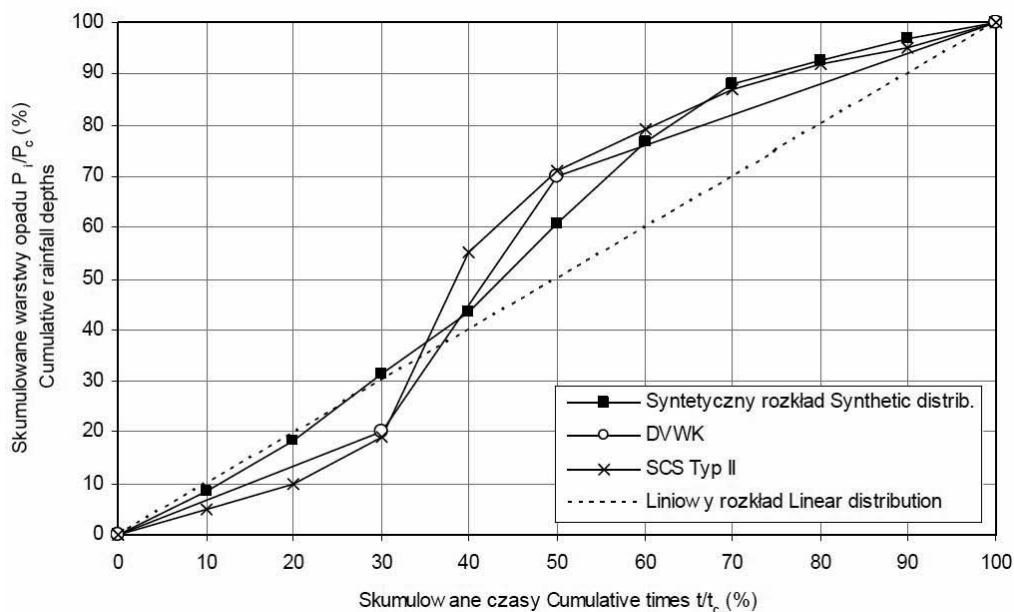
Rys. 2.12. Rozkład wysokości opadów niżowych dla Kielc [31]:

1 – krzywa sumowa wg DVWK [31], 2 – krzywa sumowa wg Kupczyka i Suligowskiego [57]

Kupczyk i Suligowski w pracy [57] z 1997 r. podjęli próbę opracowania krzywych sumowych opadów dla 4 stacji: Gdańsk, Toruń, Kielce i Wisła oraz 3 typów genetycznych opadów: konwekcyjnych (dla czasów trwania do ok. 1,5 h), frontalnych (2,5–7,5 h) oraz niżowych (ponad 10,5 h). Dla przykładu na rysunku 2.12 przedsta-

wiono rozkład wysokości opadów niżowych uzyskany dla Kielc. Wątpliwość przyjętej metodyki badań budzi m.in. fakt, że do analizy wybrano tylko po 10 zdarzeń opadowych o podobnym średnim natężeniu dla każdego typu opadu i stacji.

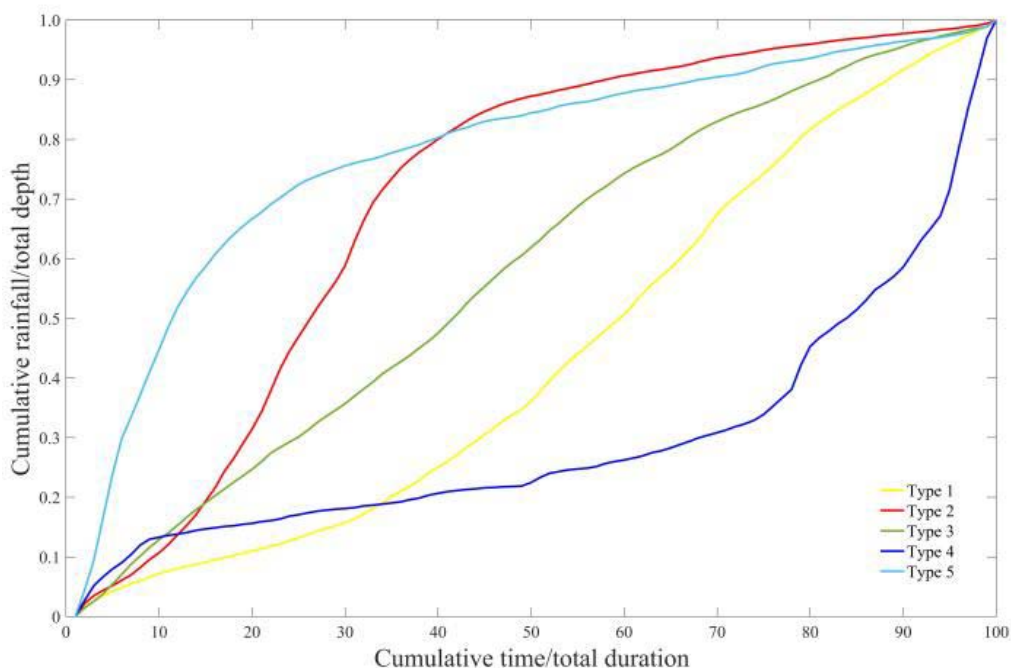
Próbie tworzenia skumulowanych hietogramów podjął też Barszcz w pracy [13] z 2012 r., który analizował 71 zdarzeń opadowych, zarejestrowanych przez 3 deszczomierze w zlewni Potoku Służewieckiego. Do analiz statystycznych wybrał opady o wysokościach od 1,0 do 81,5 mm i czasach trwania od 20 do 1000 minut. Dla każdego deszczomierza opracował syntetyczny rozkład wysokości opadów w czasie (z median). Przeprowadzone analizy wykazały, że na badane rozkłady nie miało istotnego wpływu zróżnicowanie czasów trwania i wysokości opadów. Duża zbieżność otrzymanych rozkładów umożliwiła ustalenie jednego rozkładu syntetycznego dla 3 stacji (rys. 2.13). Istotną wadą metodyki Barszcza jest m.in. zbyt niski próg wysokości przyjętych do analiz opadów, co skutkuje wyborem deszczy o małej lub średniej intensywności, czyli o częstościach występowania $C(t) < 1$ rok.



Rys. 2.13. Syntetyczny znormalizowany rozkład wysokości opadu wg Barszcza [13], w porównaniu z rozkładami DVWK [31], SCS typu II [82] oraz liniowym

W pracy Licznara i in. [64] z 2017 r. przedstawiono wyniki badań nad rozkładem wysokości opadów dla 2 stacji meteorologicznych zlokalizowanych na północy Polski, zarejestrowane w latach 1966–1993 i 2010–2015. Do analizy wybrano 236 opadów spełniających kryterium wysokości $h \geq 10$ mm, z założeniem minimal-

nej przerwy między opadami (MDPD) równej 4 h. Analizowane opady miały wysokość od 10 do 118,3 mm i czasy trwania od 35 do 3634 minut. Podczas przeprowadzonej analizy skupień metodą k -średnich dokonano podziału opadów na 5 grup. Dla każdej grupy opracowano bezwymiarową krzywą sumową (rys. 2.14). Największą liczebnie grupą było skupienie typu 1 – ok. 33% wszystkich analizowanych zdarzeń, a następnie skupienie typu 3 – ok. 28%. Oba typy mają podobny i w przybliżeniu równomierny przebieg w czasie. Skupienia typów 2 i 5 miały liczebność odpowiednio 15% i 16%. Najmniej liczną grupę stanowiło skupienie typu 4 – tylko 8% badanych opadów. W metodyce tej, podobnie jak we wcześniej omówionych, nie uwzględniano progowych wysokości opadów w funkcji czasu, tj. dla częstości występowania $C(t) \geq 1$ rok. Stąd mała praktyczna przydatność wyników badań w odniesieniu do modelowania odwodnień terenów.



Rys. 2.14. Bezwymiarowe krzywe sumowe opadów deszczu dla 5 skupień (typów) uzyskanych metodą k -średnich [64]

Metody stochastyczne generowania hietogramów wzorcowych są trudne do zastosowania w praktyce inżynierskiej zarówno ze względu na rozbudowaną parametryzację opisu fizykalnego zjawisk, jak i bardzo zaawansowany aparat matematyczny [59, 60]. Ponadto znajdują się wciąż w fazie eksperymentów.

2.3. Podsumowanie stanu wiedzy, cel i zakres badań

Analiza zmienności czasoprzestrzennej opadów na potrzeby tworzenia hietogramów wzorcowych była i jest nadal przedmiotem zainteresowania wielu badaczy. Wybrane i przedstawione w tym rozdziale pracy wyniki badań są najbardziej znanymi w literaturze, a zarazem reprezentatywne do oceny dotychczasowego stanu wiedzy.

Tworzenie hietogramów wzorcowych na podstawie historycznych danych opadowych napotyka wiele trudności. Głównym problemem jest wybór zjawisk opadowych do analiz statystycznych. Studiując dotychczasowe badania, można zauważyć, że ich autorzy kierowali się różnymi kryteriami, zarówno do wyodrębniania niezależnych opadów, jak i wyboru parametrów deszczy (h, t) do analiz podobieństwa kształtu hietogramów. Tłumaczyć to można m.in. różnymi warunkami meteorologicznymi, w których prowadzone były badania. Na przykład podczas wyboru i selekcji opadów do analiz statystycznych stosowano różne wartości minimalnego okresu bezdeszczowego (MDPD) – z zakresu od 1 do 6 godzin, najczęściej też bez określenia minimalnej wysokości badanych opadów, bądź powyżej stałej wartości progowej (np. $h_{\min} \geq 10$ mm) – niezależnie jednak od czasu trwania. Brakuje więc badań, w których uwzględniano by także częstość występowania opadów z przewyższeniem (C), tj. selekcji danych powyżej progu wysokości $h(t, C)$ – w funkcji czasu (t) i częstości $C \geq 1$ rok, co byłoby właściwe w zastosowaniu do modelowania niezawodności działania kanalizacji deszczowej. Jednocześnie nie są zdefiniowane i badane parametry opadów opisujące ich nierównomierność w czasie, które należy brać pod uwagę podczas porównywania kształtów hietogramów. Przykładowo dane literaturowe odnośnie do położenia piku maksymalnej przedziałowej wysokości opadów różnią się znacznie, nawet w obrębie danego kraju. Wskazuje to na potrzebę badania i wyznaczania hietogramów wzorcowych dla warunków lokalnych.

W Polsce ze względu na brak wiarygodnych wzorców opadów, jako obciążenie zlewni deszczowych w modelowaniu zjawiska opad–odpływ zaleca się najczęściej opady modelowe Eulera typu II bądź DVWK, stosowane w Niemczech. Brak jest jednak odpowiedniej weryfikacji kształtu tych modeli w polskich warunkach klimatycznych. Właściwe jest zatem przeprowadzenie badań nad zmiennością intensywności opadów w czasie na podstawie lokalnych baz danych opadowych.

Celem badań jest opracowanie i przetestowanie metodyki analizy kształtów hietogramów (w układach bezwymiarowych i wymiarowych) w zastosowaniu do weryfikacji wzorców opadów dotychczas stosowanych do modelowania niezawodności działania odwodnień terenów. Do testów wybrano dane opadowe z 2 charakterystycznych stacji – sieci pomiarowych, zlokalizowanych w zlewni Górnej i Środkowej Odry – w Jeleniej Górze i we Wrocławiu. Zakres badań obejmował:

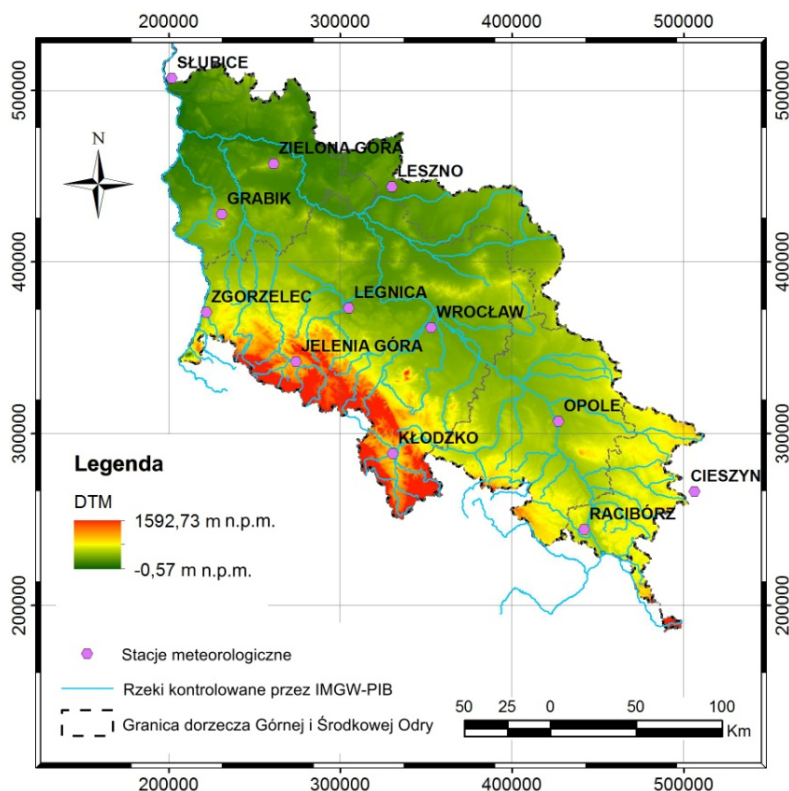
- Wybór metod do ustalenia niezależności zjawisk opadowych (MDPD) oraz grupowania opadów do analiz jakościowych podobieństwa kształtów hietogramów rzeczywistych opadów deszczowych dla częstości przewyższeń $C(T) \geq 1$ rok.

- Zdefiniowanie wskaźników rozkładu masy i nierównomierności w czasie opadów rzeczywistych do analiz ilościowych podobieństwa kształtów hietogramów wzorcowych Eulera typu II i DVWK, w układach bezwymiarowych i wymiarowych.
- Analiza jakościowa i ilościowa podobieństwa kształtów lokalnych hietogramów do wzorców Eulera typu II i DVWK z uwzględnieniem typów genetycznych opadów (K, F, N) oraz klas częstości przewyższeń ($C \geq 1$ rok, $C \geq 2$ lata, $C \geq 5$ lat, $C \geq 10$ lat), w układach bezwymiarowych i wymiarowych.
- Weryfikacja kształtu wzorców opadów Eulera typu II i DVWK dla hietogramów lokalnych deszczów z uogólnieniem wyników badań dla stacji górskiej i nizinnej, do zastosowań naukowych i praktycznych.

3. Materiał badawczy i metoda analiz

3.1. Charakterystyka stacji i ciągów pomiarowych opadów

W wybranym do badań dorzeczu Górnej i Środkowej Odry, na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat, zauważalna jest rosnąca tendencja do występowania długotrwałych opadów, w tym o charakterze ulewnym bądź nawalnym (m.in. w latach 1997, 2001,



Rys. 3.1. Dorzecze Górnej i Środkowej Odry z lokalizacją stacji meteorologicznych IMGW-PIB [98]

2006, 2010, 2013). Intensywne opady o zasięgu regionalnym powodują przekroczenie zdolności retencyjnych gruntu i formowanie się wzmożonego spływu powierzchniowego w zlewniach rzek: Nysa Kłodzka, Bóbr, Kwisa, Nysa Łużycka, Barycz, Mała Panew i Olza. Prowadzi to m.in. do powodzi miejskich (np. we Wrocławiu, Legnicy, Kłodzku czy Głogowie) czy też do lokalnych podtopień terenów w zlewniach tych rzek. Uzasadnia to zainteresowanie tym obszarem jako poligonem doświadczalnym wykorzystanym na potrzeby niniejszej pracy (rys. 3.1).

Do realizacji przyjętego celu i zakresu pracy niezbędne było zebranie danych opadowych z dwóch charakterystycznych lokalizacji stacji meteorologicznych w dorzeczu Górnej i Środkowej Odry. Wyboru stacji pomiarowych dokonano na podstawie następujących kryteriów: różnorodność położenia geograficznego – na terenie górskim i nizinnym; dostępność do długich ciągów rejestracji opadów z zapisem elektronicznym – w wysokiej rozdzielczości czasowej (1 minuty), a także możliwość uzupełnienia danych z lokalnego monitoringu opadów – lokalnej sieci pomiarowej. Uwzględniając podane kryteria, do badań wytypowano 2 stacje IMGW-PIB: Jelenia Góra i Wrocław-Strachowice, uznając je za reprezentatywne dla dorzecza Górnej i Środkowej Odry. Stacja górská – IMGW-PIB Jelenia Góra położona jest na wysokości 342 m n.p.m. (długość geograficzna E154720, szerokość geograficzna N505401), a stacja nizinna – IMGW-PIB Wrocław położona jest na wysokości 120 m n.p.m. (długość geograficzna E165357, szerokość geograficzna N510614). Opady ze stacji IMGW-PIB Jelenia Góra cechują się znacznie wyższymi wartościami dobowych sum wysokości (119,3 mm), w porównaniu z opadami ze stacji IMGW-PIB Wrocław-Strachowice (74,4 mm). Dane opadowe ze stacji IMGW-PIB Wrocław zostaną uzupełnione danymi z lokalnego monitoringu opadów – sieci 11 deszczomierzy MPWiK we Wrocławiu.

Dostępne ciągi danych z rejestracji opadów na wybranych stacjach IMGW-PIB – z podziałem na okresy rejestracji na paskach pluwiograficznych i w zapisie elektronicznym przedstawiono w tabeli 3.1. Dla analizowanych stacji okres rejestracji opadów był dłuższy od 50 lat, w tym dane w zapisie elektronicznym były dostępne z okresów dłuższych niż 10 lat.

Tabela 3.1. Ciągi rejestracji opadów na stacjach meteorologicznych IMGW-PIB [94]

Stacja pomiarowa	Okres rejestracji pluwiograficznych	Okres rejestracji elektronicznych	Łączny okres rejestracji opadów	Uwagi
Jelenia Góra	1960–2008	2005–2018	59 lat	Brak danych: 07.2006, 05–06.2007 i 06.2008
Wrocław	1960–2009	2007–2018	59 lat	Brak danych dla 2008 r. w zapisie elektronicznym

Sieć pomiarowa opadów MPWiK S.A. we Wrocławiu została założona w 2011 roku. Składa się obecnie z 11 deszczomierzy wagowych typu TRwS 203 i TRwS 200.

Informacje dotyczące ciągów rejestracji opadów w sieci pomiarowej MPWiK S.A. we Wrocławiu (początek monitoringu oraz ostatni dostępny pomiar) zestawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Ciągi rejestracji opadów w sieci deszczomierzy MPWiK S.A. we Wrocławiu [94]

Oznaczenie deszczomierza	Lokalizacja	Początek monitoringu	Ostatni pomiar	Okres rejestracji
D1	ul. Bogusławskiego	14.04.2014	30.05.2018**	ok. 4 lata
D2	ul. Bystrzycka	17.11.2011	30.10.2018	ok. 7 lat
D3	ul. Przedwiośnie	20.02.2012	31.10.2018	ok. 6,5 roku
D4	ul. Gitarowa	10.04.2015	30.10.2018	ok. 3,5 roku
D5*	ul. Na Grobli (ZPW)	14.11.2011	15.05.2014	ok. 2,5 roku
	ul. Na Grobli	20.05.2014	30.10.2018	ok. 5,5 roku
D6	ul. Jagniątkowska	11.10.2011	31.10.2018	ok. 7 lat
D7	ul. Milicka	09.11.2011	30.10.2018	ok. 7 lat***
D8	ul. Powstańców Śląskich	14.04.2014	31.10.2018	ok. 4,5 roku
D9	ul. Ślázowa	24.07.2013	30.10.2018	ok. 5 lat
D10*	ul. Krynicka	05.10.2011	20.08.2012	ok. 1 rok
	ul. Terenowa	20.08.2012	30.10.2018	ok. 6 lat
D11	ul. Wędkarzy	25.05.2015	30.10.2018	ok. 3,5 roku

* Deszczomierze ze zmienioną lokalizacją.

** Zakończenie pomiarów spowodowane awarią deszczomierza.

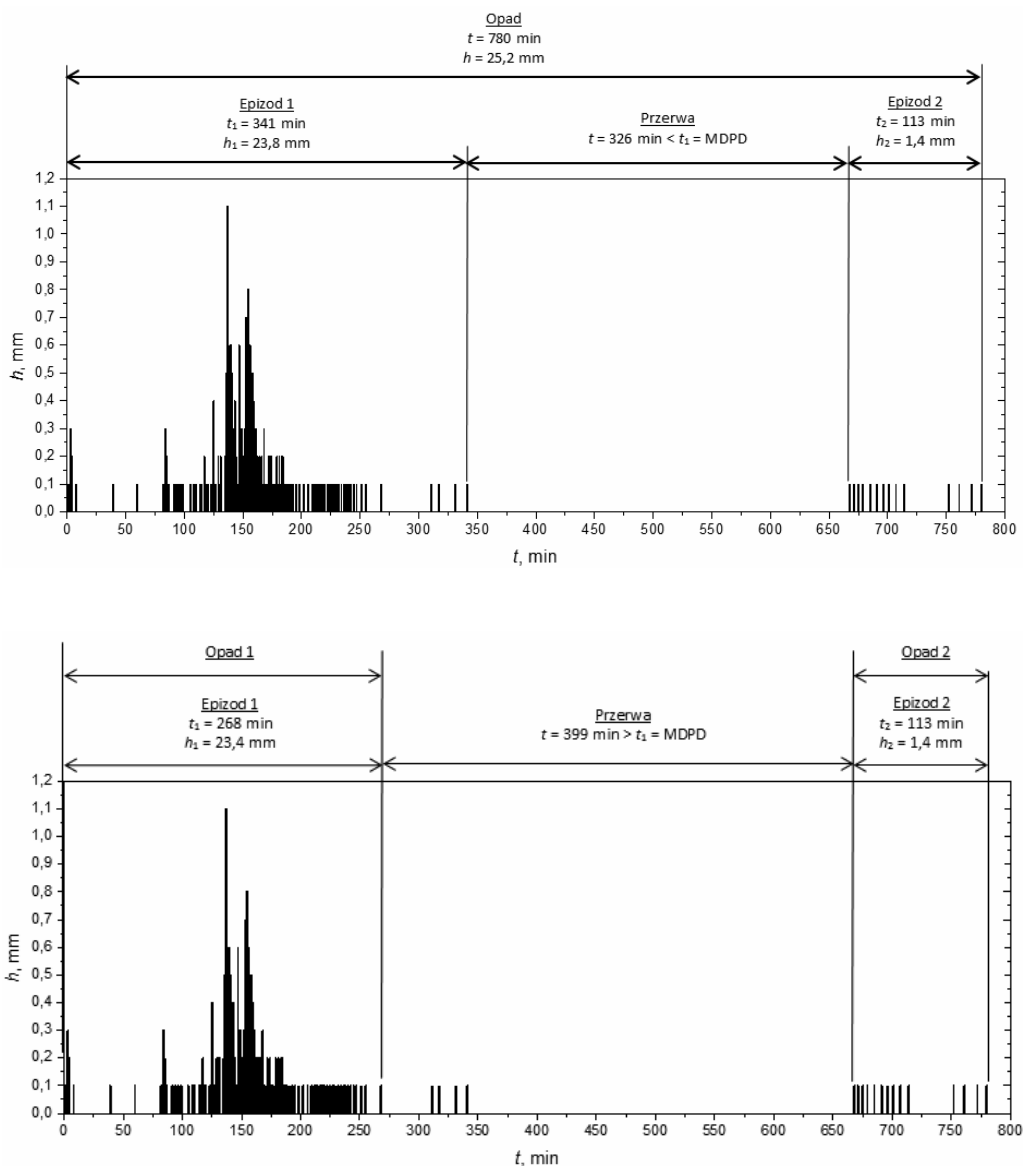
***Brak danych w dn. 7.08.2018–18.10.2018 z powodu awarii deszczomierza.

3.2. Metodyka badań hietogramów

3.2.1. Kryteria dyskretyzacji czasowej niezależności opadów

Do wydzielenia niezależnych zjawisk opadowych na potrzeby badań lokalnych hietogramów właściwe jest kryterium Madsena i in. [67] – odnośnie do minimalnego okresu bezdeszczowego (MDPD), w zapisie zaproponowanym przez Mazurkiewicz [68], a następnie zweryfikowanym przez Wartalską [94], czyli:

- dla opadów o krótkim czasie trwania: $t \leq 1$ h – okres MDPD wynosi 1,0 h, podczas którego nie wystąpi żaden opad lub wystąpi opad o wysokości $h \leq 0,2$ mm, przy czym odstęp czasu między początkowym lub końcowym impulsem opadu deszczu a ewentualnym eliminowanym impulsem powinien przekraczać 15 minut;



Rys. 3.2. Interpretacja kryteriów wyodrębniania zdarzeń opadowych: kryterium Madsena i in. [67] w zapisie Mazurkiewicz [68] (wykres górny) – zweryfikowanym przez Wartalską (wykres dolny) w pracy [94]

- dla opadów o dłuższym czasie trwania: $t > 1 \text{ h}$ – okres MDPD powinien być dłuższy od czasu trwania jednego z sąsiadujących ze sobą zdarzeń opadowych, w którym nie wystąpi żaden deszcz lub wystąpi deszcz o wysokości $h \leq 0,4 \text{ mm}$, przy tym

odstęp czasu między końcowym lub początkowym impulsem opadu deszczu, a ewentualnym eliminowanym impulsem powinien przekraczać 15 min (rys. 3.2).

Wartalska w pracy [94] wykazała, że w przypadku opadów o dłuższym czasie trwania ($t > 1$ h) przerwa między opadami zdefiniowana przez Mazurkiewicz jako [68]: okres, w którym nie wystąpi żaden deszcz „lub wystąpi deszcz o wysokości $h \leq 0,2$ mm”, jest kryterium prowadzącym do wydłużenia czasu trwania „niezależnych zjawisk opadowych”. Dowiodła to na przykładzie opadu z dnia 10.08.2007 r., zarejestrowanego na stacji IMGW-PIB w Jeleniej Górze (rys. 3.2). Na tej podstawie zaproponowała weryfikację podanej definicji na: „lub wystąpi deszcz o wysokości $h \leq 0,4$ mm”. Stosując bowiem definicję Mazurkiewicz, dwa epizody opadowe rozdzielone przerwą $t = 326$ min, czyli krótszą niż MDPD = 341 min (rys. 3.2 – wykres górny), należałoby zaliczyć do jednego zdarzenia opadowego o czasie trwania $t = 780$ min. W przypadku definicji Wartalskiej [94], po wyeliminowaniu 4 impulsów o sumarycznej wysokości opadu 0,4 mm (rys. 3.2 – wykres dolny), dwa epizody opadowe traktowane są już jako odrębne i niezależne opady. Wówczas przerwa pomiędzy nimi: $t = 399$ min jest większa niż MDPD = 268 min.

3.2.2. Kryteria wyboru parametrów opadów do analiz statystycznych

W dostosowaniu do struktury czasowo-przestrzennej opadów występujących w Polsce, w analizie lokalnych hietogramów celowe jest uwzględnianie typów genetycznych: konwekcyjne – o czasie trwania do ok. 2 godzin, frontalne – od 2 do 12 godzin i niżowe – ponad 12 godzin. W proponowanej metodyce badawczej przyjęto dodatkowo:

- dla opadów konwekcyjnych (K) – analizowanie opadów w dwóch podgrupach: $t \in [10; 60]$ min i $t \in (60; 120]$ min;
- dla opadów frontalnych (F) – analizowanie opadów w trzech podgrupach: $t \in (120; 180]$ min, $t \in (180; 360]$ min i $t \in (360; 720]$ min;
- dla opadów niżowych (N) – analizowanie opadów w dwóch podgrupach: $t \in (720; 1440]$ min i $t > 1440$ min.

Do selekcji opadów $h(t, C)$ – ze względu na częstość ich występowania ($C \in \{1, 2, 5, 10\}$ lat) niezbędna jest znajomość szeregów czasowych lokalnych opadów (DDF/IDF). Najczęściej nie dysponuje się aktualnymi krzywymi DDF/IDF i konieczne jest ich opracowanie wg zalecanej metodyki POT, opisanej w podrozdziale 2.2.2.

Dla stacji IMGW-PIB w Jeleniej Górze model opadów maksymalnych ustalono w pracy [94], dla danych z lat 1968–2017, o postaci:

$$h(t, C) = 4,088C^{0,317}t^{0,306} \quad (3.1)$$

Wartość względnego błędu resztkowego $rRMSE$ (wg (2.8)) odwzorowania zmierzonych wysokości opadów i obliczonych z modelu (3.1) wynosi 5,9%, co umożliwia

sklasyfikowanie tego modelu jako dobrego. W tabeli 3.3 przedstawiono ustalone szeregi czasowe opadów typu DDF dla stacji IMGW-PIB Jelenia Góra, które wykorzystane zostaną, jako progowe wartości $h(t, C) \equiv P_c(T, C)$, do selekcji danych opadowych ze względu na częstość przewyższeń $C(T)$.

Tabela 3.3. Progowe wysokości $h(t, C)$ – krzywe DDF do selekcji opadów z Jeleniej Góry

C, lata	Wysokość opadu h (w mm) w przedziałach czasowych t (w min)									
	5	10	30	60	120	180	360	720	1080	1440
10	13,9	17,2	24,0	29,7	36,7	41,6	51,4	63,5	71,9	78,5
5	11,1	13,8	19,3	23,8	29,5	33,4	41,2	51,0	57,7	63,0
2	8,3	10,3	14,4	17,8	22,0	24,9	30,8	38,1	43,2	47,1
1	6,7	8,3	11,6	14,3	17,7	20,0	24,8	30,6	34,7	37,8

Dla stacji IMGW-PIB we Wrocławiu Strachowicach wykorzystano aktualny model opadów maksymalnych (z okresu 1968–2017), postaci [94]:

$$h(t, C) = 5,276C^{0,313}t^{0,281-0,00175C} \quad (3.2)$$

Wartość błędu resztkowego $rRMSE = 8,7\%$ umożliwia sklasyfikowanie tego modelu jako dobrego. W tabeli 3.4 przedstawiono szeregi czasowe opadów dla stacji IMGW-PIB Wrocław jako progowe wartości $h(t, C) \equiv P_c(T, C)$ do selekcji danych opadowych z Wrocławia ze względu na częstość przewyższeń $C(T)$.

Tabela 3.4. Progowe wysokości $h(t, C)$ – krzywe DDF do selekcji opadów we Wrocławiu

C, lata	Wysokość opadu h (w mm) w przedziałach czasowych t (w min)									
	5	10	30	60	120	180	360	720	1080	1440
10	16,6	19,9	26,6	31,9	38,3	42,6	51,2	61,4	68,3	73,7
5	13,5	16,3	22,0	26,6	32,1	35,9	43,4	52,4	58,5	63,2
2	10,2	12,4	16,8	20,4	24,7	27,7	33,6	40,7	45,5	49,3
1	8,3	10,0	13,6	16,6	20,1	22,5	27,3	33,1	37,1	40,2

3.2.3. Metody grupowania opadów do analiz jakościowych hietogramów

Do grupowania opadów ze względu na kształt hietogramów, tj. analiz jakościowych hietogramów, proponuje się do stosowania 3 metody badawcze:

- Metoda Huffa.
- Analiza skupień metodą Warda.
- Analiza skupień metodą k -średnich.

Metoda Huffa polega na podziale opadów na 4 kwartyly, które są zależne od bezwymiarowej części czasu trwania opadu (t_i/T_c), w której wystąpił największy przyrost wysokości opadu (masy). Każdy kwartył określa bezwymiarowo kolejne 25% całkowitego czasu trwania opadu (T). Metoda ta została przedstawiona w rozdz. 2.2.4 pracy.

Analiza skupień metodą Warda służy do wyodrębniania jednorodnych (podobnych) podzbiorów obiektów badanej populacji. Znajdowanie grup (skupień) obiektów odbywa się na bazie zmiennych charakteryzujących analizowane zjawiska. W grupowaniu łączone są obiekty leżące blisko siebie, a równocześnie będące daleko od innych, tworzących inne skupienia. Miarą podobieństwa jest funkcja odległości wiązań par obiektów. Najczęściej wykorzystywana jest odległość euklidesowa, tj. odległość geometryczna w przestrzeni wielowymiarowej o postaci [101]:

$$d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^p (x_i - y_i)^2} \quad (3.3)$$

gdzie: x_i, y_i – wartości cech badanych obiektów x i y , p – liczba badanych obiektów.

Metoda Warda zaliczana jest do tzw. metod hierarchicznych, bazujących na technikach aglomeracyjnych, w których każdy obiekt stanowi osobne skupienie, a następnie obiekty leżące najbliżej siebie są łączone w nowe skupienie, aż do uzyskania jednego skupienia. Metoda Warda wykorzystuje do oszacowania odległości między skupieniami podejście analizy wariancji, zmierzające do minimalizacji sumy kwadratów odchyleń wewnątrz skupień. Miarą zróżnicowania skupienia względem wartości średnich jest suma kwadratów odchyleń (ang. *ESS – Error Sum of Squares*), określona z wzoru:

$$ESS = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.4)$$

gdzie: x_i – wartość zmiennej będącej kryterium segmentacji dla i -tego obiektu, k – liczba obiektów w skupieniu.

W wyniku zastosowania analizy skupień metodą Warda uzyskuje się drzewopodobną strukturę, zwaną dendrogramem, który ilustruje hierarchiczną strukturę zbioru obiektów ze względu na zmniejszające się podobieństwo cech między nimi [72, 101]. Dendrogram służy więc do ustalenia liczby podzbiorów danych – np. ze względu na kształt hietogramów.

Do wyodrębniania podobnych podzbiorów obiektów badanej populacji, w zastoso-waniu do opisu cech hietogramów bezwymiarowych, efektywniejsza może okazać się metoda k -średnich – zaliczana do metod niehierarchicznych [59]. Metoda ta polega na podzieleniu populacji na z góry założoną – przewidywaną liczbę k skupień (np. wstępnie wyznaczoną metodą Warda), a uzyskany podział jest poprawiany w toku wykonywania procedury aglomeracji, przenosząc między nimi obiekty tak, aby uzy-

skąć minimalną wariancję wewnątrz każdej z nich. Dąży się więc do zapewnienia jak największego podobieństwa elementów w ramach każdego ze skupień, z jednoczesnym zachowaniem maksymalnej różnicy pomiędzy samymi skupieniami.

3.2.4. Wskaźniki do analiz ilościowych hietogramów

Nierównomierność w czasie parametrów opadów (h, i, q) może być określana i porównywana w poszczególnych grupach (i podgrupach) czasów ich trwania, z zakresu: $t \in [10; 120]$ min, $t \in (120; 720]$ min i $t > 720$ min (dla opadów typu K, F i N), z uwzględnieniem częstości występowania: $C \in \{1, 2, 5, 10\}$ lat – jakie przyjmuje się najczęściej do wymiarowania i modelowania kanalizacji (wg DWA-A118:2006 i PN-EN 752:2017). Jest to równoznaczne z potrzebą analizowania kształtów lokalnych hietogramów (K, F i N) z uwzględnieniem klas częstości przewyższeń: $C \in \{\geq 1; \geq 2; \geq 5; \geq 10\}$ lat – dla danej stacji pomiarowej.

Do analiz ilościowych podobieństwa kształtów hietogramów ze względu na nierównomierność opadów proponuje się dwa wskaźniki geometryczne:

- r – położenia przedziału Δt z odciętą t_{pik} piku maksymalnej wysokości opadu $h_{max}(\Delta t)$,

- r_{sc} – położenia przedziału Δt z odciętą t_{sc} środka ciężkości hietogramu $P_c/2$, dla zmiennej (układy bezwymiarowe) bądź stałej (układy wymiarowe) dyskretyzacji kroku czasowego Δt , zdefiniowane jako:

$$r = \frac{t_{pik}(h_{max}(\Delta t))}{T} \quad (3.5)$$

$$r_{sc} = \frac{t_{sc}\left(\frac{P_c}{2}\right)}{T} \quad (3.6)$$

gdzie: r – wskaźnik położenia piku maksymalnej przedziałowej wysokości opadu ($h_{max}(\Delta t)$), $t_{pik}(h_{max}(\Delta t))$ – czas wystąpienia piku maksymalnej przedziałowej wysokości, min, T – całkowity czas trwania deszczu, min, r_{sc} – wskaźnik położenia środka ciężkości hietogramu, $t_{sc}(P_c/2)$ – czas wystąpienia środka ciężkości hietogramu (dla $P_c/2$), min, P_c – skumulowana (całkowita) wysokość opadu deszczu (w czasie T), mm.

Do analiz hietogramów w układach bezwymiarowych (dotyczących wzorców Eulera typu II i DVWK) proponuje się przyjęcie stałej liczby 10 przedziałów Δt , które umożliwiają ustalanie położenia piku maksymalnej przedziałowej wysokości (intensywności) opadu z dokładnością $0,1T$. Wymusza to stosowanie różnych, dyskretnie zadawa-

nych wartości przedziałów czasu: $\Delta t \in \{1,0 \text{ min (dla } T = 10 \text{ min)}; 1,5 \text{ min (} T = 15 \text{ min)}; 2,0 \text{ min (} T = 20 \text{ min)}; \dots; 5,0 \text{ min (} T = 50 \text{ min)}; \dots; 144 \text{ min (} T = 1440 \text{ min)}; \dots; 432 \text{ min (} T = 4320 \text{ min)}\}$.

Do analiz hietogramów w układach wymiarowych stosowana być powinna stała wartość przedziału czasu: $\Delta t = 5,0 \text{ min}$ (jak w modelu Eulera typu II), co determinuje zmienną liczbę przedziałów Δt . Na potrzeby porównań hietogramów rzeczywistych opadów z wzorcem Eulera typu II zdefiniowano wskaźnik:

• m_{33} – jako stosunek skumulowanej wysokości (masy) opadu dla czasu od $t = 0$ do $t = 0,33T$, do wysokości całkowitej:

$$m_{33} = \sum_0^{0,33T} \frac{h_i}{P_c(T)} \quad (3.7)$$

gdzie: h_i – chwilowa wysokość opadu deszczu (dla $\Delta t = 1 \text{ min}$), mm, $P_c(T)$ – całkowita wysokość opadu deszczu (w czasie T), mm, $0,33T$ – pierwsza 1/3 część całkowitego czasu trwania opadu deszczu (T), min.

Na potrzeby porównań hietogramów rzeczywistych opadów z bezwymiarowym wzorcem DVWK zdefiniowano 2 wskaźniki (dla $\Delta t = 0,1T$):

• m_{30} – jako stosunek skumulowanej wysokości (masy) opadu dla czasu od $t = 0$ do $t = 0,3T$, do wysokości całkowitej ($P_c(T)$):

$$m_{30} = \sum_0^{0,3T} \frac{h_i}{P_c(T)} \quad (3.8)$$

• m_{50} – jako stosunek skumulowanej wysokości (masy) opadu dla czasu od $t = 0$ do $t = 0,5T$, do wysokości całkowitej ($P_c(T)$):

$$m_{50} = \sum_0^{0,5T} \frac{h_i}{P_c(T)} \quad (3.9)$$

gdzie: $0,3T$ – pierwsze 30% całkowitego czasu trwania opadu deszczu (T), min, $0,5T$ – pierwsze 50% całkowitego czasu trwania opadu deszczu (T), min.

Do opisu nierównomierności w czasie intensywności (tożsamej z nierównomiernością natężenia jednostkowego – q) zdefiniowano wskaźnik:

• n_I – jako stosunek maksymalnej wartości intensywności przedziałowej do wartości średniej – z całego okresu trwania opadu (T):

$$n_I = \frac{I_{\max}(\Delta t)}{I_{sr}(T)} \quad (3.10)$$

gdzie: n_I – wskaźnik nierównomierności intensywności deszczu w czasie, $I_{\max}(\Delta t)$ – maksymalna przedziałowa (Δt) intensywność deszczu, mm/min, $I_{sr}(T)$ – średnia intensywność deszczu (w czasie T), mm/min.

Do analiz ilościowych hietogramów proponuje się wykorzystanie tzw. wykresów pudełkowych, które umożliwiają ujęcie na piktogramie informacji dotyczących położenia, rozproszenia i kształtu rozkładu empirycznego badanej wielkości. O położeniu pudełka (jego rozstępie) świadczy kształt wykresu, obejmujący cały zakres danych – od wartości najniższej do najwyższej. Im dłuższy jest wykres, tym dane są bardziej rozproszone, czyli przyjmują bardziej różniące się wartości wraz z tzw. wąsami. Długość pudełka jest równa rozstępowi ćwiartkowemu (kwartylnemu), czyli różnicy między pierwszym i trzecim kwartylem. Kwartyl jest więc jedną z miar położenia danych wartości obserwacji. Pierwszy kwartyl – dolna krawędź pudełka zawiera 25% obserwacji; drugi kwartyl dzieli zbiór obserwacji na połowę, która odpowiada medianie; natomiast trzeci kwartyl – górna krawędź pudełka dzieli zbiór danych obserwacji na dwie części – odpowiednio 75% położonych poniżej tego kwartyla i 25% położonych powyżej. Zwykle wąsy ogranicza się do 10% i 90% percentyla zbioru danych, które są utożsamiane w literaturze przedmiotu przez Bontę [19], Huffa [39, 40], Huffa i Angela [41], z przedziałami ufności – odpowiednio na poziomach 10% i 90%.

4. Wyniki badań hietogramów ze stacji IMGW-PIB Jelenia Góra

4.1. Charakterystyka materiału badawczego

W celu zbadania kształtów lokalnych hietogramów dla stacji IMGW-PIB Jelenia Góra posłużono się zbiorem danych opadowych zarejestrowanych z krokiem czasowym 1 minuty, w latach 2005–2018. Do wydzielenia niezależnych zjawisk opadowych wykorzystano metodykę opisaną w rozdziale 3.2.1. Dla każdego opadu obliczono skumulowaną wysokość całkowitą (P_c) – w całkowitym czasie jego trwania (T), a następnie przypisano odpowiednią częstość występowania ($C(T)$), z wykorzystaniem szeregów czasowych DDF – obliczonych z modelu (3.1), podanych w tabeli 3.3 w podrozdziale 3.2.2. Na tej podstawie, do analiz statystycznych wyselekcjonowano zdarzenia opadowe o częstościach przewyższeń $C(T) \geq 1$ rok, uzyskując populację 80 niezależnych opadów (z łącznej liczby 331 zarejestrowanych zdarzeń [94]), które następnie pogrupowano względem czasów trwania na 3 grupy: $t \leq 120$ min – opady konwekcyjne, $t \in (120; 720]$ min – opady frontalne i $t > 720$ min – opady niżowe. Wydzielono w tym także 7 podgrup czasów trwania: $t \leq 60$ min, $t \in (60; 120]$ min, $t \in (120; 180]$ min, $t \in (180; 360]$ min, $t \in (360; 720]$ min, $t \in (720; 1440]$ min oraz $t \geq 1440$ min (max 4320 min). Zestawienie liczebności opadów w poszczególnych grupach i podgrupach czasu trwania opadów podano w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Liczebność opadów w wyodrębnionych grupach i podgrupach czasowych dla Jeleniej Góry

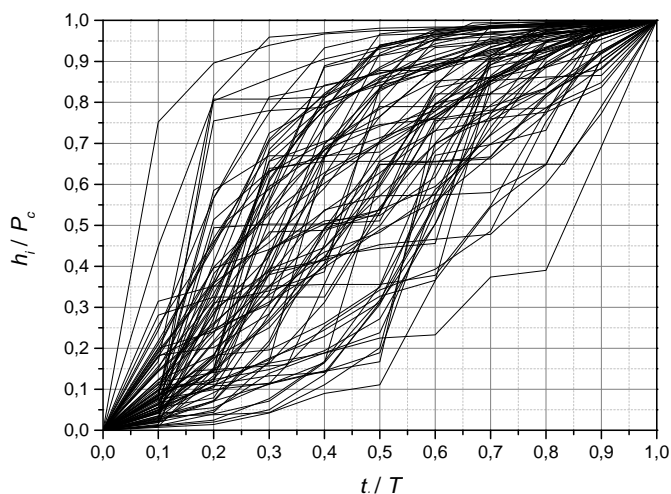
Liczba opadów w (3) grupach/(7) podgrupach czasów trwania (% populacji)						
$t \leq 120$ min – K		$t \in (120; 720]$ min – F			$t > 720$ min – N	
23 (29%)		39 (49%)			18 (22%)	
≤ 60 min	(60; 120] min	(120; 180] min	(180; 360] min	(360; 720] min	(720; 1440] min	> 1440 min
10	13	13	12	14	11	7
Łącznie 80 (100%)						

Ze względu na częstość występowania, opady zaklasyfikowano do 4 klas częstości przewyższeń: $C \in [1; 2)$ lata, $C \in [2; 5)$ lata, $C \in [5; 10)$ lat oraz $C \geq 10$ lat. Liczebność opadów w poszczególnych klasach częstości podano w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Liczebność opadów w klasach częstości przewyższeń dla Jeleniej Góry

Klasa przewyższeń	Liczba opadów (%)
$C \in [1; 2)$ lata	26 (33%)
$C \in [2; 5)$ lat	24 (30%)
$C \in [5; 10)$ lat	9 (11%)
$C \geq 10$ lat	21 (26%)
Łącznie	80 (100%)

Do zbadania kształtów bezwymiarowych hietogramów masowych, tj. krzywych sumowych w układzie bezwymiarowym, dla każdego z opadów wyznaczono dyskretną wartość przedziału czasu $\Delta t(T)$, w którym analizowane będą przyrosty wysokości opadu, spełniającą warunek uzyskania dziesięciu przedziałów: $\Delta t \in \{1,0 \text{ min (dla } T = 10 \text{ min); } 1,5 \text{ min (dla } T = 15 \text{ min); } 2,0 \text{ min (dla } T = 20 \text{ min); } \dots; 144 \text{ (dla } T = 1440 \text{ min); } \dots; 432 \text{ min (dla } T = 4320 \text{ min)}\}$. Następnie dla każdego przedziału czasu Δt , reprezentującego 10% $(0,1T)$ całkowitego czasu trwania opadu, ustalano skumulowane przyrosty wysokości opadu $h_i/P_c \equiv P/P_c$ – dla skumulowanych czasów trwania t_i/T . Na rysunku 4.1 zilustrowano bezwymiarowe krzywe sumowe 80 badanych opadów.



Rys. 4.1. Krzywe sumowe 80 analizowanych opadów dla Jeleniej Góry

4.2. Grupowanie opadów ze względu na kształt hietogramów bezwymiarowych

4.2.1. Analiza grupowań metodą Huffa

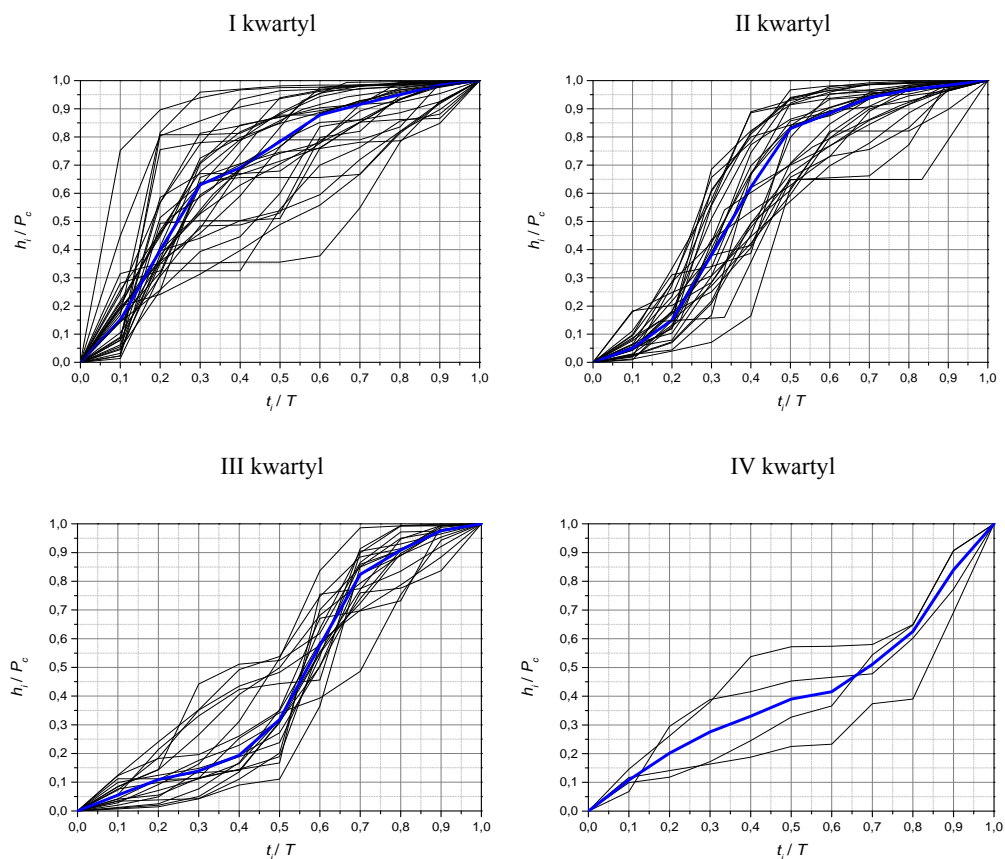
Do analizy podobieństwa kształtów badanych hietogramów w układzie bezwymiarowym (rys. 4.1) w pierwszej kolejności zastosowano metodę grupowań Huffa. Metoda ta bazuje na podziale opadów na 4 grupy kwartylne, które są zależne od części czasu trwania opadu, w której wystąpił największy przyrost masy (wysokości opadu). Zestawienie liczby opadów w grupach kwartylnych Huffa (I–IV) podano w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Liczebność opadów w grupach kwartylnych Huffa dla stacji Jelenia Góra

Grupa kwartylna	Liczba opadów
I	30 (37%)
II	27 (34%)
III	19 (24%)
IV	4 (5%)
Łącznie	80 (100%)

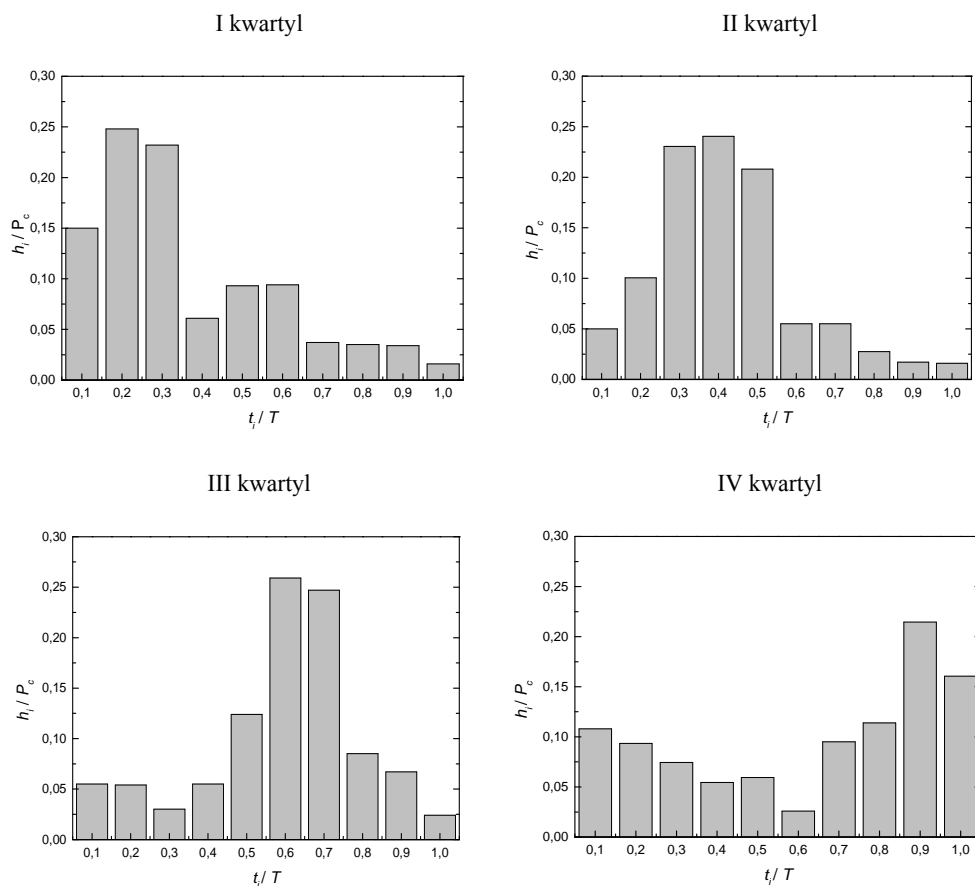
Należy zauważyć (tab. 4.3), iż największą populację analizowanych zjawisk stanowią opady z I i II grupy kwartylnej – łącznie 71% (odpowiednio: 37% w I i 34% w II grupie). Oznacza to, że w zdecydowanej większości, przyrost masy opadu skoncentrowany jest w pierwszej połowie czasu trwania opadów. Pozostałe grupy kwartylne, tj. III i IV stanowią łącznie tylko 29% badanych opadów (odpowiednio: 24% w III i 5% w IV grupie). Dla każdej grupy kwartylnej Huffa zilustrowano na wykresach przynależne krzywe sumowe wraz z obliczoną krzywą mediany – na rysunku 4.2, a następnie opracowano bezwymiarowe hietogramy słupkowe opadów, będące odzwierciedleniem wartości median w każdym kwartylu – na rysunku 4.3.

W każdej z otrzymanych grup kwartylnych Huffa zbadano liczebność opadów w poszczególnych grupach i podgrupach czasu trwania (tab. 4.4). Ogólnie dla opadów o charakterze konwekcyjnym (K – 29% populacji) i frontalnym (F – 49%) zauważalna jest zdecydowana przewaga liczebna ich występowania w I i II grupie kwartylnej (61%), gdzie największy przyrost wysokości opadu następuje w pierwszej połowie czasów trwania (T).



Rys. 4.2. Krzywe sumowe opadów z medianą w 4 grupach kwartylnych Huffa dla Jeleniej Góry

W szczególności z danych zawartych w tabeli 4.4 wynika, że w Jeleniej Górze opady o czasie trwania do 180 min, tj. opady konwekcyjne (K) oraz frontalne (F) – z ich pierwszej podgrupy czasu trwania: $T \in (120; 180]$ min, wykazują tendencję do najczęstsze powiązania z rozkładem wg I i II kwartyła (17 + 14 = 31 opadów). Pozostałe opady frontalne (F), tj. o czasie trwania $T \in (180; 720]$ min, występują w miarę regularnie w I, II i III grupie kwartylnej (łącznie 25 opadów) – z przewagą liczebną w II grupie (10 opadów). Natomiast opady o charakterze niżowym (N – 18 opadów), tj. o czasach trwania $T > 720$ min, występują w miarę równomiernie we wszystkich grupach kwartylnych – nieznaczna przewaga liczebna w III grupie (7). W IV grupie kwartylnej – najmniej licznej (5% populacji), występuje: 1 opad frontalny (F) – z podgrupy $T \in (360; 720]$ min i 3 opady niżowe (N) – z podgrupy $T \in (720; 1440]$ min.



Rys. 4.3. Bezwymiarowe hietogramy słupkowe z median w 4 grupach kwartylnych Huffa dla Jeleniej Góry

Tabela 4.4. Liczebność opadów wg czasów trwania w grupach kwartylnych Huffa dla Jeleniej Góry

Lp.	Rodzaj opadu	Podgrupa czasu trwania opadu T	Grupa kwartylna				Razem
			I	II	III	IV	
1	K	≤ 60 min	4	3	3	0	23 (29%)
2		(60; 120] min	5	6	2	0	
3	F	(120; 180] min	8	5	0	0	39 (49%)
4		(180; 360] min	3	4	5	0	
5		(360; 720] min	5	6	2	1	
6	N	(720; 1440] min	3	2	3	3	18 (22%)
7		>1440 min	2	1	4	0	
Razem			30 (37%)	27 (34%)	19 (24%)	4 (5%)	80 (100%)

Podane wyniki wstępnych badań potwierdzają wnioski Huffa wynikające z badań opadów w USA [39, 40], że największa populacja opadów występuje w I i II grupie kwartylnej (71% w Jeleniej Górze). Stosując podział czasów trwania opadów zaproponowany przez Huffa, potwierdzono na populacji opadów w Jeleniej Górze, że opady o czasie trwania $T \leq 6$ h (tab. 4.4) wykazują tendencję do najczęstszego powiązania z rozkładem wg I kwartyła (42%), natomiast opady o $T \in (6; 12]$ h należą najczęściej do II kwartyła (43%). Dla opadów o dłuższych czasach trwania nie potwierdzono już prawidłowości Huffa, że dla $T \in (12; 24]$ h opady mają najczęściej rozkład charakterystyczny dla III kwartyła, w Jeleniej Górze bowiem rozmieszczone są równomiernie w 4 kwartyłach (tab. 4.4). Podobnie nie potwierdzono, że opady o $T > 24$ h mają najczęściej rozkład IV kwartyła – w Jeleniej Górze przeważają w III kwartyłu (tab. 4.4). Wyniki powyższych analiz wskazują dobitnie na losowość badanych zjawisk opadowych. Dla opadów zarejestrowanych w Jeleniej Górze charakterystyczne zakresy czasów trwania opadów to: $T \leq 3$ h, $T \in (3; 12]$ h, $T \in (12; 24]$ h, $T > 24$ h, co należy uwzględnić podczas wyboru opadów do weryfikacji wzorców Eulera i DVWK.

W każdej z grup kwartylnych Huffa zbadano także liczebność opadów w poszczególnych klasach częstości przewyższeń (tab. 4.5).

Tabela 4.5. Liczebność opadów wg klas częstości przewyższeń w grupach kwartylnych Huffa dla Jeleniej Góry

Lp.	Klasa częstości przewyższeń C	Grupa kwartylna				Razem
		I	II	III	IV	
1	$C \in [1; 2)$ lata	14	5	5	2	26 (33%)
2	$C \in [2; 5)$ lat	8	10	5	1	24 (30%)
3	$C \in [5; 10)$ lat	4	2	2	1	9 (11%)
4	$C \geq 10$ lat	4	10	7	0	21 (26%)
Razem		30 (37%)	27 (34%)	19 (24%)	4 (5%)	80 (100%)

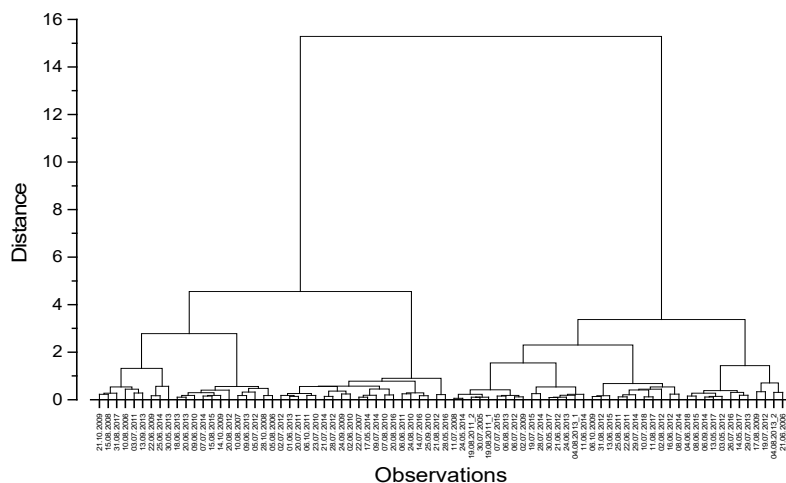
W przypadku analizy opadów w 4 klasach częstości (tab. 4.5) można zauważyć przede wszystkim, że w badanej 1 klasie częstości przewyższeń, tj. dla $C \in [1; 2)$ lata obejmującej 26 opadów (33% wszystkich zdarzeń), przeważają liczebnie opady zaliczone do I grupy kwartylnej – 14 opadów (54%). W wyodrębnionej 2 klasie częstości przewyższeń, tj. dla $C \in [2; 5)$ lat, obejmującej 24 opady (30% populacji), przeważają liczebnie opady zaliczone do I i II grupy kwartylnej, odpowiednio: 8 i 10 opadów, tj.: 33% i 42%. W 3 klasie częstości przewyższeń – dla $C \in [5; 10)$ lat, obejmującej tylko 9 opadów (11% całej populacji), przeważają liczebnie opady zaliczone do I grupy kwartylnej – 4 (44%). W 4 klasie częstości (spośród opadów o $C \geq 10$ lat), obejmującej 21 zdarzeń (26% populacji), przeważają liczebnie opady zaliczone do II i III grupy kwartylnej – odpowiednio: 10 i 7 opadów (48% i 33%).

Podsumowując, grupowanie opadów metodą Huffa, choć umożliwia wykrycie ogólnych zależności hydrologicznych, to nie prowadzi jednak do określenia wyraź-

nych wzorców badanych hietogramów masowych, zarówno w zależności od czasów trwania opadów (K , F i N), jak i od częstości występowania (C). Kształty bezwymiarowych hietogramów w postaci krzywych sumowych wysokości opadów (rys. 4.2), jak i kształty bezwymiarowych hietogramów słupkowych z median (rys. 4.3), są w grupach kwartylnych Huffa dość nieregularne, a występujące piki są na podobnym poziomie median, ok. $0,25 h_i/P_c$. Jednakże rozkład masy w I grupie kwartylnej jest najbardziej zbliżony do wzorca Eulera typu II, gdzie w $1/3$ początkowego czasu trwania opadu deponuje się ok. $2/3$ jego masy. Natomiast II grupa kwartylna odzwierciedla w przybliżeniu rozkład masy wg wzorca DVWK, gdzie w 30% początkowego czasu trwania opadu znajduje się 20% jego masy, a w 50% czasu opadu 70% masy deszczu.

4.2.2. Analiza skupień metodą Warda

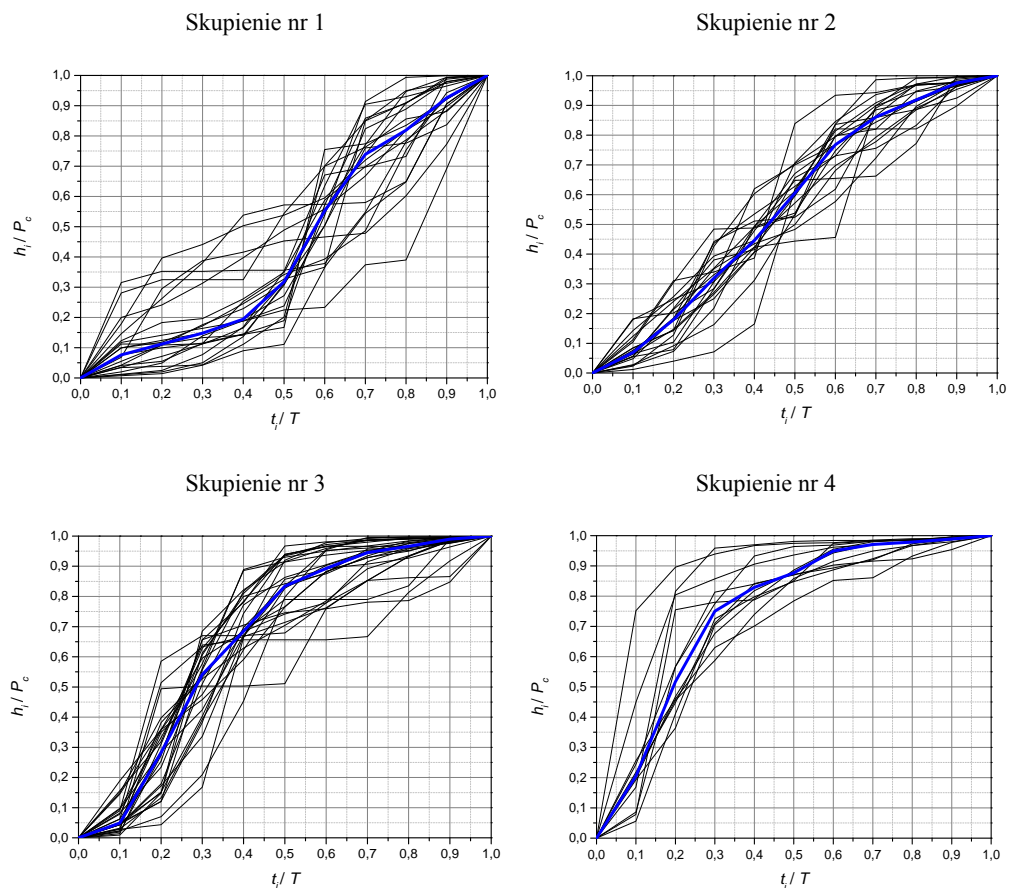
W analizie skupień metodą Warda uzyskuje się drzewopodobną strukturę, zwaną dendrogramem, który ilustruje hierarchiczną strukturę zbioru obiektów ze względu na zmniejszające się podobieństwo cech między nimi. Dendrogram przedstawiony na rysunku 4.4 jest rezultatem grupowań 80 opadów pochodzących ze stacji IMGW-PIB Jelenia Góra ze względu na podobieństwo kształtów bezwymiarowych hietogramów. Analiza rysunku 4.4 umożliwiła ustalenie odległości wiązań na poziomie odcięcia o wartości ok. 3, co prowadzi do podziału opadów na 4 skupienia, z wyraźnie różniącymi się przebiegami zmian intensywności w czasie.



Rys. 4.4. Dendrogram grupowania 80 opadów metodą Warda dla Jeleniej Góry

Na rysunku 4.5 zobrazowano krzywe sumowe 80 opadów, ze stacji IMGW-PIB w Jeleniej Górze, w 4 skupieniach utworzonych metodą Warda, z naniesionymi krzy-

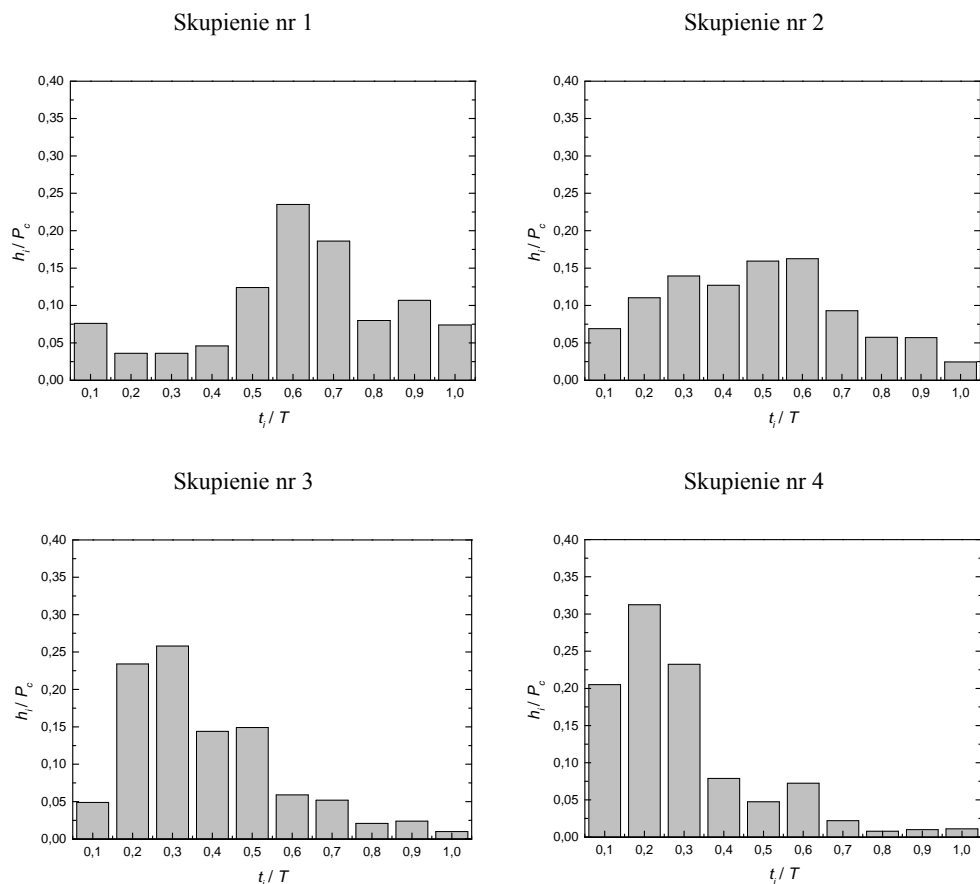
wymi z median. Numery grup skupień 1–4 nadano z dendrogramu – w kolejności od lewej do prawej.



Rys. 4.5. Krzywe sumowe opadów z medianą w 4 skupieniach wg metody Warda dla Jeleniej Góry

Dla podziału opadów na $k = 4$ skupienia najbardziej liczne jest skupienie nr 3. Obejmuje 34% analizowanych zjawisk opadowych. Opady należące do tego skupienia cechują się maksymalnymi przyrostami wysokości występującymi w pierwszej połowie czasu ich trwania. Drugie pod względem liczebności jest skupienie nr 1 obejmujące 26% obserwacji, w którym maksymalne przyrosty wysokości występują w drugiej połowie czasu trwania. Skupienie nr 2 cechuje się podobną liczebnością (25%), jednak opady należące do tego skupienia mają przebieg zbliżony do równomiernego – bez wyraźnych zmian intensywności w czasie. Skupienie nr 4 cechuje się natomiast największymi pikami przedziałowej wysokości w pierwszej 1/3 czasu trwania, co pomi-

mo małego udziału tego skupienia w całości zbioru (15%) jest istotne ze względów praktycznych – tworzenia wzorców opadów modelowych.



Rys. 4.6. Bezwymiarowe hietogramy słupkowe z median w 4 skupieniach wg metody Warda dla Jeleniej Góry

Powyższe spostrzeżenia znajdują potwierdzenie na rysunku 4.6, który przedstawia bezwymiarowe hietogramy słupkowe – z krzywych median dla każdego z 4 skupień Warda. W porównaniu z 4 kwartylami Huffa, gdzie występujące maksymalne piki na hietogramach słupkowych były na podobnym poziomie wartości – ok. $0,25 h_i/P_c$ (rys. 4.3), to w przypadku 4 skupień wg metody Warda daje się zauważyć większe zróżnicowanie wartości pików – od $0,17 h_i/P_c$ (skupienie nr 2) do $0,33 h_i/P_c$ (skupienie nr 4 – rys. 4.6). Rozkłady masy i kształt hietogramów słupkowych wg mediany w skupieniach nr 3 i nr 4 są zbliżone do postaci wzorca Eulera typu II. Piki bowiem największych przyrostów wysokości znajdują się odpowiednio w przedzia-

łach: 3 (skupienie nr 3) i 2 (skupienie nr 3). Wzorzec DVWK nie jest natomiast wyraźnie odwzorowany w skupieniach nr 1 i nr 2.

W każdym skupieniu otrzymanym metodą Warda zbadano liczebność opadów w poszczególnych grupach i podgrupach czasu trwania. Z analizy danych przedstawionych w tabeli 4.6 wynika, że w Jeleniej Górze opady o czasie trwania do 180 min, tj. opady konwekcyjne (K) oraz frontalne (F) – z ich pierwszej podgrupy czasu trwania: $T \in (120; 180]$ min, wykazują tendencję do najczęstszego powiązania ze skupieniem nr 3 (18 opadów), a następnie ze skupieniem nr 4 (8 opadów). Pozostałe opady frontalne (F), tj. o czasie trwania $T \in (180; 720]$ min, występują w miarę równomiernie w 3 skupieniach: nr 1, nr 2 i nr 3 ($8 + 8 + 7 = 23$ opady). Opady niżowe (N), tj. o czasach trwania $T > 720$ min (22% populacji), występują głównie w skupieniach nr 1 i nr 2 ($9 + 6 = 15$ opadów).

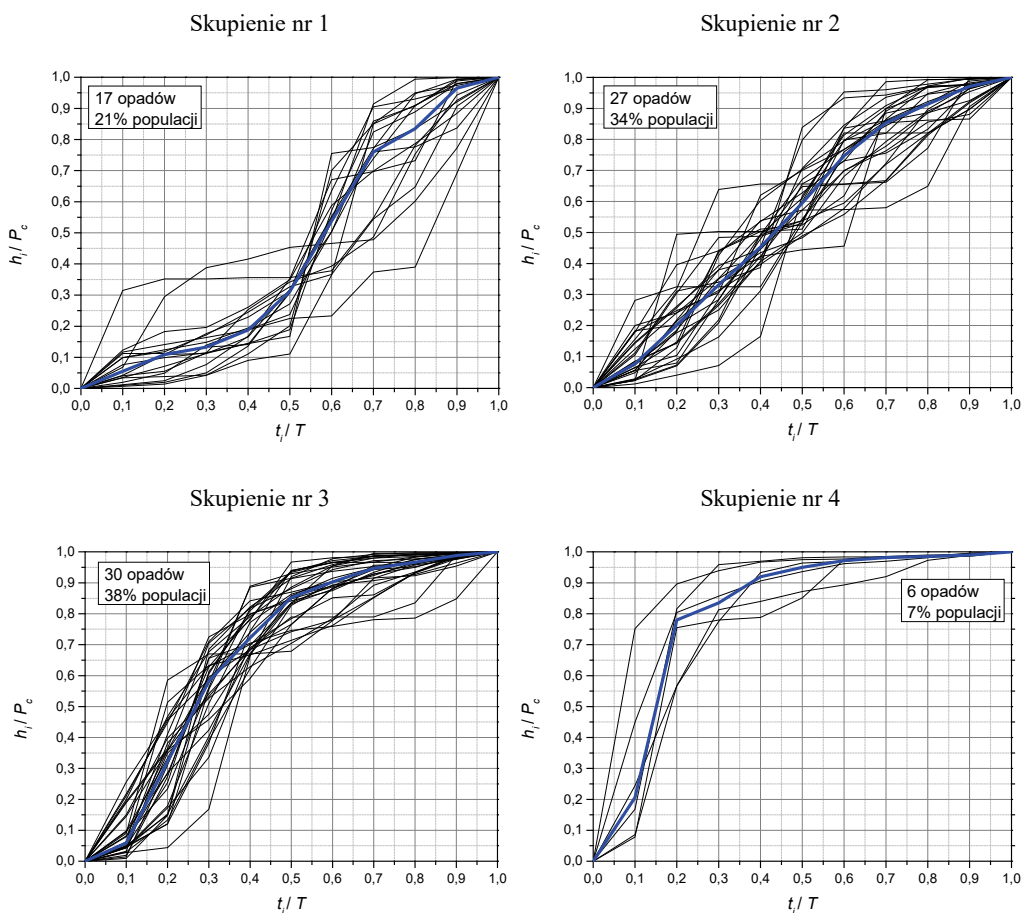
Tabela 4.6. Liczebność opadów wg czasów trwania w 4 skupieniach wydzielonych metodą Warda dla Jeleniej Góry

Lp.	Rodzaj opadu	Podgrupa czasu trwania opadu T	Numer skupienia				Razem
			1	2	3	4	
1	K	≤ 60 min	2	2	5	1	23 (29%)
2		(60; 120] min	2	2	5	4	
3	F	(120; 180] min	0	2	8	3	39 (49%)
4		(180; 360] min	4	2	4	2	
5		(360; 720] min	4	6	3	1	
6	N	(720; 1440] min	6	3	1	1	18 (22%)
7		> 1440 min	3	3	1	0	
Razem			21 (26%)	20 (25%)	27 (34%)	12 (15%)	80 (100%)

4.2.3. Analiza skupień metodą k -średnich

Wyniki aglomeracji opadów metodą Warda wykazały istnienie 4 skupień opadów o zbliżonych wzajemnie przebiegach krzywych sumowych w obrębie wyodrębnionych grup. Umożliwia to zastosowanie kolejnej metody grupowania opadów, tj. metody k -średnich. Do grupowania opadów tą metodą przyjęto liczbę skupień $k = 4$ (rys. 4.7).

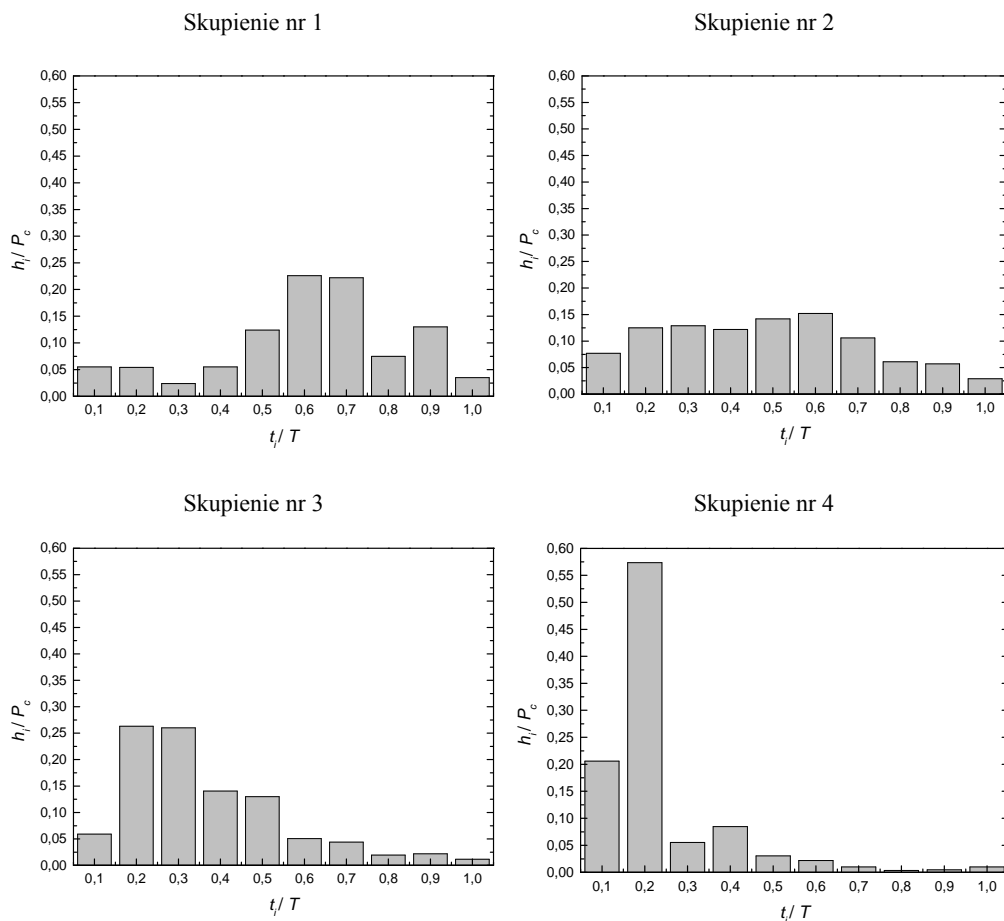
Na rysunku 4.7 zilustrowano na wykresach krzywe sumowe opadów w 4 skupieniach wydzielonych metodą k -średnich, wraz z naniesionymi krzywymi median, a na rysunku 4.8 przedstawiono uśrednione hietogramy słupkowe z median. W wyniku grupowania opadów tą metodą uzyskano bardziej wyraziste 4 skupienia (rys. 4.7), w porównaniu do grupowania metodą Warda (por. z rys. 4.5). Pęki większości krzywych sumowych są położone bliżej odpowiednich median. Ogólnie najbardziej liczne jest skupienie nr 3, obejmujące 38% analizowanej populacji (30 opadów) – o 4% więcej niż w przypadku grupy nr 3 wg metody Warda. Drugie liczebnie jest skupienie nr 2 obejmujące 34% populacji (27 opadów). Opady cechują się tutaj w miarę równomiernym



Rys. 4.7. Krzywe sumowe opadów z medianą w 4 skupieniach wydzielonych metodą k -średnich dla Jeleniej Góry

przebiegiem w czasie – bardziej wyrównanym niż w przypadku grupowania metodą Warda, gdzie skupienie nr 2 obejmowało 25% populacji (por. rys. 4.7 z rys. 4.5). Opady należące do skupienia nr 1, w liczbie 17 (21% populacji), mają piki zdecydowanie przesunięte do drugiej połowy czasów trwania (rys. 4.7). W grupowaniu metodą Warda, skupienie nr 1 obejmowało 26% populacji, lecz pęki krzywych sumowych opadów były bardziej rozrzucone względem median (por. z rys. 4.5). Opady należące do skupienia nr 4, o najmniejszej liczbie 6 (7% populacji), mają piki zlokalizowane w pierwszej 1/5 części czasu trwania (rys. 4.7). Skupienie to cechuje się największą wartością względnej przedziałowej wysokości mediany ($h_i/P_c = 0,575$ – prawie 6-krotnie większej względem średniej $h_i/P_c = 0,1$), co upodabnia go pod tym względem do opadu modelowego Eulera. W grupowaniu metodą Warda skupienie nr 4 obejmowało bardziej liczną, lecz mniej wyrazistą, grupę

(15% populacji). Metoda k -średnich daje więc jakościowo lepsze wyniki grupowania opadów w porównaniu z metodą Warda.



Rys. 4.8. Bezwymiarowe histogramy słupkowe z median w 4 skupieniach wydzielonych metodą k -średnich dla Jeleniej Góry

W każdym ze skupień utworzonych metodą k -średnich przeanalizowano także liczebność opadów K, F i N – w poszczególnych grupach czasów trwania, z uwzględnieniem klas częstości przewyższeń (tab. 4.7). Pod tym względem w 4 skupieniach opadów brak jest wyraźnych zależności liczebności opadów K, F, N od t i C . Najwięcej opadów jest w klasie przewyższeń $C \in [1; 2)$ lata (26 opadów), w drugiej kolejności w klasie $C \in [2; 5)$ lat (24 opadów), ale już w trzeciej kolejności w klasie $C \geq 10$ lat (21 opadów), a dopiero w czwartej kolejności w klasie $C \in [5; 10)$ lat (9 opadów), co podkreśla losowy charakter występowania analizowanego zjawiska.

Tabela 4.7. Liczebność opadów K, F i N w klasach czasu trwania i częstości występowania w skupieniach wydzielonych metodą k -średnich dla Jeleniej Góry

Klasa częstości	Liczba opadów w skupieniach								Razem
	Skupienie nr 1		Skupienie nr 2		Skupienie nr 3		Skupienie nr 4		
$C \in [1; 2)$ lata	$t \leq 120$ min	0	$t \leq 120$ min	3	$t \leq 120$ min	8	$t \leq 120$ min	0	11 K
	$t \in (120; 720]$ min	3	$t \in (120; 720]$ min	0	$t \in (120; 720]$ min	7	$t \in (120; 720]$ min	0	10 F
	$t > 720$ min	3	$t > 720$ min	2	$t > 720$ min	0	$t > 720$ min	0	5 N
	razem	6	razem	5	razem	15	razem	0	26
$C \in [2; 5)$ lat	$t \leq 120$ min	2	$t \leq 120$ min	1	$t \leq 120$ min	2	$t \leq 120$ min	1	6 K
	$t \in (120; 720]$ min	1	$t \in (120; 720]$ min	5	$t \in (120; 720]$ min	5	$t \in (120; 720]$ min	1	12 F
	$t > 720$ min	2	$t > 720$ min	3	$t > 720$ min	1	$t > 720$ min	0	6 N
	razem	5	razem	9	razem	8	razem	2	24
$C \in [5; 10)$ lat	$t \leq 120$ min	0	$t \leq 120$ min	1	$t \leq 120$ min	1	$t \leq 120$ min	0	2 K
	$t \in (120; 720]$ min	1	$t \in (120; 720]$ min	1	$t \in (120; 720]$ min	0	$t \in (120; 720]$ min	3	5 F
	$t > 720$ min	0	$t > 720$ min	2	$t > 720$ min	0	$t > 720$ min	0	2 N
	razem	1	razem	4	razem	1	razem	3	9
$C \geq 10$ lat	$t \leq 120$ min	1	$t \leq 120$ min	0	$t \leq 120$ min	2	$t \leq 120$ min	1	4 K
	$t \in (120; 720]$ min	3	$t \in (120; 720]$ min	6	$t \in (120; 720]$ min	3	$t \in (120; 720]$ min	0	12 F
	$t > 720$ min	1	$t > 720$ min	3	$t > 720$ min	1	$t > 720$ min	0	5 N
	razem	5	razem	9	razem	6	razem	1	21
Razem	17 (21%)	27 (34%)	30 (38%)	6 (7%)	80 (100%)				
Łącznie	80 (100%)								

W każdym skupieniu zbadano dodatkowo liczebność opadów w poszczególnych podgrupach czasu trwania opadów (tab. 4.8).

Tabela 4.8. Liczebność opadów w podgrupach czasu trwania w skupieniach wydzielonych metodą k -średnich dla Jeleniej Góry

Lp.	Rodzaj opadu	Podgrupa czasu trwania opadu T	Numer skupienia				Razem
			1	2	3	4	
1	K	≤ 60 min	1	3	6	0	23 (29%)
2		(60; 120] min	2	2	7	2	
3	F	(120; 180] min	0	3	8	2	39 (49%)
4		(180; 360] min	4	2	4	2	
5		(360; 720] min	4	7	3	0	
6	N	(720; 1440] min	4	6	1	0	18 (22%)
7		> 1440 min	2	4	1	0	
Razem			17 (21%)	27 (34%)	30 (38%)	6 (7%)	80 (100%)

Z danych przedstawionych w tabeli 4.8 wynika, że w Jeleniej Górze opady o czasie trwania do 180 min (tj. konwekcyjne (K) oraz frontalne (F) – z ich pierwszej podgrupy czasu trwania: $T \in (120; 180]$ min) wykazują tendencję do najczęstszego powiązania ze skupieniem nr 3 (21 opadów). Pozostałe opady frontalne (tj. F o czasie $T \in (180; 720]$ min) występują w miarę równomiernie w 3 skupieniach: nr 1, nr 2 i nr 3 ($8 + 9 + 7 = 24$ opady). Opady niżowe (N) – 18 występują głównie w skupieniu nr 2 (10 opadów), a następnie w skupieniu nr 1 (6 opadów). Ze względu na podobieństwo kształtu hietogramów daje się więc zauważyć przesunięcie granicy konwekcyjnego i frontalnego charakteru opadów w Jeleniej Górze z ok. 120 min na ok. 180 min. Wykazano to także w metodach grupowań Huffa (tab. 4.4) i Warda (tab. 4.6). Z grupowania Huffa wynika, że opady o czasie trwania do 180 min wykazują tendencję do najczęstszego powiązania z rozkładem wg I i II kwartyła.

4.2.4. Wybór opadów do weryfikacji hietogramów wzorcowych

Wyniki analiz jakościowych, tj. grupowania 80 opadów o częstościach występowania $C(T) \geq 1$ rok za pomocą metod: Huffa, analizy skupień Warda i analizy skupień metodą k -średnich, umożliwiły wstępny podział opadów ze względu na kształt bezwymiarowych hietogramów, a w tym na określenie położenia pików – największych, przedziałowych przyrostów wysokości, co jest istotne z perspektywy tworzenia wzorców do modelowania systemów odwodnień terenów. Analiza skupień metodą k -średnich wykazała, że prawie połowa analizowanych opadów – 36 (45% populacji) ma pik (r) skumulowanej przedziałowej wysokości zlokalizowany w 1/3 początkowego czasu trwania (skupienia nr 3 i 4), w którym deponowane jest ok. 2/3 całkowitej wysokości opadu. W skupieniu nr 3 (38% badanej populacji opadów) wartość względnego położenia piku wynosi $r \approx (0,2-0,3)$, a w skupieniu nr 4 (7% populacji) $r \approx 0,2$ (rys. 4.8). Ponadto wykazano, że w skupieniu nr 4 opady cechują się największą (wg mediany) wartością piku przedziałowej, względnej wysokości ($h_i/P_c = 0,575$). Cechy rozkładów masy na bezwymiarowych hietogramach należących do skupień nr 3 i 4 są więc zbliżone do wzorca Eulera. Podane spostrzeżenia i wnioski wymagają jednak potwierdzenia w bardziej szczegółowej ocenie ilościowej podobieństwa kształtów hietogramów badanych opadów w układach wymiarowych. W skupieniach nr 3 i nr 4 znajduje się odpowiednio: 13 i 2 – razem 15 opadów konwekcyjnych (K), z łącznej liczby 23, co stanowi 65% całej populacji opadów konwekcyjnych (tab. 4.8). Spośród opadów frontalnych (F) – z pogranicza opadów konwekcyjnych i frontalnych, tj. o czasie trwania $t \in (120; 180]$ min, w skupieniach nr 3 i 4 znajduje się odpowiednio: 8 i 2 – razem 10 opadów, co stanowi 77% populacji (obejmującej 13 opadów z tego zakresu czasu trwania – tab. 4.8). Wskazanych fizycznie 25 opadów o charakterze konwekcyjnym, w tym orograficznym (z których 16 pochodziło z I grupy kwartylniej Huffa, a 9 z II grupy), poddanych zostanie szczegółowej analizie ilościowej podobieństwa kształtów hietogramów (bez-

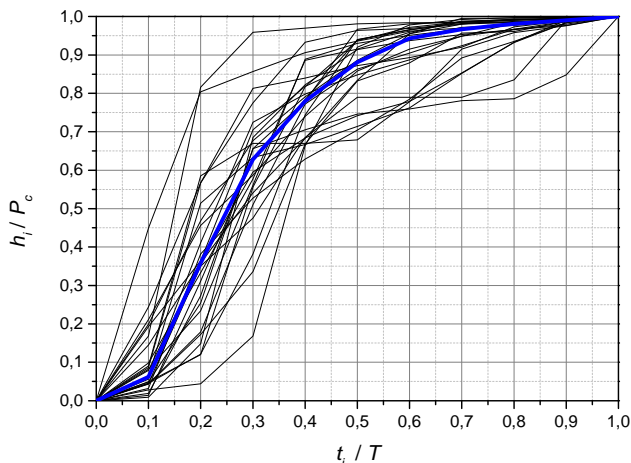
wymiarowych i wymiarowych) do wzorca Eulera typu II. W załączniku nr 1 zestawiono hietogramy bezwymiarowe, a w załączniku nr 2 hietogramy wymiarowe analizowanych 25 opadów dla stacji IMGW-PIB Jelenia Góra. Zróżnicowane kształty hietogramów świadczą o losowości badanego zjawiska.

Do weryfikacji bezwymiarowego wzorca DVWK wykorzystane mogą być natomiast opady o dłuższych czasach trwania, tj. frontalne (F) – o $T \in (180; 720]$ oraz niżowe (N) – o $T > 720$ min, które zostaną poddane analizie ilościowej podobieństwa kształtów hietogramów do bezwymiarowego wzorca literaturowego, gdzie przez pierwsze 30% czasu trwania opadu występuje 20% jego wysokości całkowitej, w połowie czasu trwania pojawia się 70% wysokości, a pozostałe 30% całkowitej wysokości występuje w drugiej połowie czasu trwania (tj. na 50% T). Dla 80 analizowanych opadów ze stacji IMGW-PIB Jelenia Góra ani analiza skupień metodą Warda, ani analiza k -średnich nie odzworowały w wyraźny sposób tak specyficznych cech rozkładu masy na bezwymiarowych hietogramach słupkowych (rys. 4.6 i rys. 4.8). Natomiast podział opadów metodą Huffa wskazał na II grupę kwartylną (wg rys. 4.3) jako zbliżoną kształtem do wzorca DVWK. W grupie tej występuje 13 opadów, tj.: 10 frontalnych o $T > 180$ min i 3 niżowe (wg tab. 4.4). W szczególności 8 opadów pochodzi ze skupienia nr 2, a 5 opadów ze skupienia nr 3 – wg metody k -średnich. W załączniku nr 3 zestawiono hietogramy bezwymiarowe 13 opadów: 10 F o $T > 180$ min i 3 N dla stacji IMGW-PIB Jelenia Góra, w celu unaocznienia ich losowego charakteru. Wskazanych fizycznie 13 opadów zostanie poddanych szczegółowej analizie ilościowej podobieństwa do bezwymiarowego wzorca DVWK.

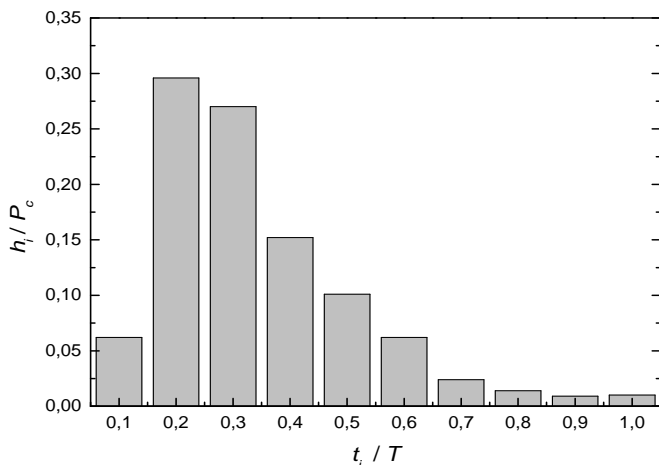
4.3. Analiza ilościowa kształtów hietogramów wzorcowych

4.3.1. Weryfikacja wzorca Eulera typu II w układzie bezwymiarowym

Szczegółowej analizie ilościowej podobieństwa kształtów bezwymiarowych hietogramów do wzorca Eulera typu II poddano 25 opadów o charakterze konwekcyjnym, wytypowanych fizycznie ze skupień nr 3 i 4, gdzie należy większość (15) opadów konwekcyjnych (K) oraz większość (10) opadów frontalnych (F) – z pogranicza K i F, tj. o $T \leq 180$ min (wg tab. 4.8). Na rysunku 4.9 przedstawiono bezwymiarowe krzywe sumowe 25 analizowanych opadów wraz z krzywą mediany, z której wynika, że w 1/3 początkowego czasu ich trwania masa opadów sięga ok. 67%. Na rysunku 4.10 zilustrowano natomiast zbiorczy bezwymiarowy hietogram słupkowy badanych opadów (z mediany wg rys. 4.9).



Rys. 4.9. Krzywe sumowe z medianą dla 15 opadów konwekcyjnych (K) i 10 frontalnych (F o $T \leq 180$ min) ze skupień nr 3 i 4 dla Jeleniej Góry



Rys. 4.10. Bezwymiarowy histogram słupkowy z mediany dla 15 opadów konwekcyjnych i 10 frontalnych (o $T \leq 180$ min) ze skupień nr 3 i 4 dla Jeleniej Góry

Z rysunku 4.10 wynika, że położenie pików przedziałowej wysokości ma wartość $r = 0,2$. Natomiast wartość liczbowa przedziałowej ($\Delta t = 0,1T$) względnej wysokości: $h_i/P_c = 0,29$ jest prawie trzykrotnie większa względem średniej: $h_i/P_c = 0,10$. Należy jednak pamiętać, że wzorzec Eulera typu II jest histogramem wymiarowym, tworzonym z krzywych DDF/IDF, dla stałej wartości $\Delta t = 5$ min. Wykres słupkowy z mediany (rys. 4.10) nie jest więc rzeczywistym obrazem przedziałowych wysokości, a jedynie trendem uśrednianych wartości $h_i(\Delta t)$ w przedziałach czasowych o stałej proporcji $\Delta t = 0,1T$ – w układzie bezwymiarowym.

Hietogramy bezwymiarowe, dla zmiennej dyskretyzacji kroku czasowego Δt , mogą być scharakteryzowane ilościowo ze względu na położenie pików i środka ciężkości hietogramu przez 2 wskaźniki geometryczne: r i r_{sc} zdefiniowane w rozdziale 3.2.4 – wg przyjętej metodyki badań. Do opisu i analizy rozkładów wysokości opadów w czasie dedykowany jest wskaźnik m_{33} , natomiast do oceny nierównomierności intensywności wskaźnik n_I . W tabeli 4.9 zestawiono parametry 25 badanych opadów oraz obliczone wartości wskaźników do ocen ilościowych podobieństwa kształtu bezwymiarowych hietogramów do wzorca Eulera.

Tabela 4.9. Parametry opadów i wskaźniki podobieństwa 25 bezwymiarowych hietogramów (15 opadów konwekcyjnych i 10 frontalnych o $T \leq 180$ min) ze skupień nr 3 i 4 dla Jeleniej Góry

Nr	P_c	T	C	I_{max}	I_{sr}	q_{max}	q_{sr}	r	r_{sc}	m_{33}	n_I	Nr skupienia/ Kwartył
	mm	min	lata	mm/min		$dm^3/(s \cdot ha)$		(3.5)	(3.6)	(3.7)	(3.10)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	14,8	38	1,7	1,18	0,39	196,71	65,01	0,26	0,27	0,675	3,03	3/I
2	49,1	44	> 50	2,42	1,12	403,41	186,70	0,17	0,28	0,584	2,16	3/I
3	13,7	44	1,2	0,76	0,31	126,69	51,68	0,17	0,22	0,633	2,45	3/I
4	14,2	47	1,2	1,24	0,30	206,71	50,01	0,27	0,3	0,634	4,13	3/II
5	24,6	57	5,8	1,27	0,43	211,71	71,68	0,37	0,28	0,670	2,95	3/II
6	36,3	58	19,0	3,00	0,63	500,10	105,02	0,36	0,38	0,317	4,76	3/II
7	38,6	70	20,0	1,79	0,55	298,39	91,69	0,15	0,18	0,822	3,25	4/I
8	18,7	70	2,0	1,29	0,27	215,04	45,01	0,15	0,19	0,821	4,78	4/I
9	23,2	83	3,3	0,96	0,28	160,45	46,68	0,38	0,38	0,436	3,44	3/II
10	24,4	97	3,4	0,80	0,25	133,36	41,68	0,26	0,29	0,659	3,20	3/II
11	19,9	104	1,7	0,65	0,19	108,36	31,67	0,37	0,35	0,491	3,42	3/II
12	20,9	106	1,9	0,73	0,20	121,69	33,34	0,26	0,27	0,693	3,65	3/II
13	17,6	110	1,1	0,55	0,16	91,69	26,67	0,25	0,24	0,739	3,44	3/I
14	19,0	110	1,4	0,48	0,17	80,02	28,34	0,15	0,26	0,622	2,82	3/I
15	20,1	111	1,6	0,49	0,18	81,68	30,01	0,16	0,23	0,711	2,72	3/I
16	26,5	122	3,5	0,92	0,22	153,36	36,67	0,05	0,12	0,872	4,18	4/I
17	20,0	124	1,4	0,47	0,16	78,35	26,67	0,16	0,33	0,538	2,94	3/I
18	18,6	125	1,1	0,50	0,15	83,35	25,01	0,16	0,29	0,558	3,33	3/I
19	72,5	134	> 50	1,71	0,54	285,06	90,02	0,26	0,31	0,589	3,17	3/II
20	21,0	135	1,5	0,68	0,16	113,36	26,67	0,16	0,20	0,643	4,25	3/I
21	36,9	147	8,3	1,59	0,25	265,05	41,68	0,15	0,15	0,962	6,36	4/I
22	55,5	150	30	1,99	0,37	331,73	61,68	0,25	0,27	0,726	5,38	3/I
23	22,4	150	1,7	0,60	0,15	100,02	25,01	0,25	0,26	0,671	4,00	3/I
24	30,2	150	4,3	0,71	0,20	118,36	33,34	0,15	0,23	0,747	3,55	3/II
25	21,2	180	1,2	0,58	0,12	96,69	20,00	0,15	0,18	0,670	4,83	3/I
Średnia				1,09	0,31	182,45	51,68	0,22	0,26	0,66	3,69	–
Mediana				0,80	0,25	133,36	41,68	0,17	0,27	0,67	3,44	–

Obliczone wartości (tab. 4.9) analizowanych wskaźników wynoszą:

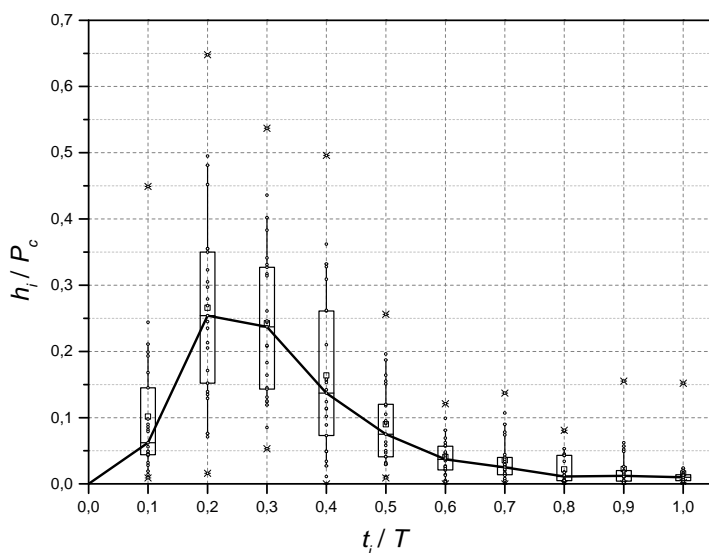
$r \in [0,05; 0,38]$; wartość średnia: 0,22; mediana: 0,17;

$r_{sc} \in [0,12; 0,38]$; wartość średnia: 0,26; mediana: 0,27;

$m_{33} \in [0,32; 0,96]$; wartość średnia: 0,66; mediana: 0,67;

$n_l \in [2,16; 6,36]$; wartość średnia: 3,69; mediana: 3,44.

W szczególności położenie przedziałów $\Delta t = 0,1T$ z odciętą piku (t_{pik}) maksymalnej wysokości $h_{max}(\Delta t)$ nie przekracza wartości $r = 0,38$ (czyli nieznacznie przekracza wartość 0,33 – charakterystyczną dla modelu Eulera). Podobnie położenie przedziałów $\Delta t = 0,1T$ z odciętą (t_{sc}) środka ciężkości hietogramu ($P_c/2$) nie przekracza również wartości $r_{sc} = 0,38$. Szczególnie interesujące w interpretacji wyników analiz nierównomierności opadów są wartości wskaźnika m_{33} – jako stosunku skumulowanej masy opadu na 1/3 początkowego czasu ($0,33T$) do masy całkowitej (P_c). Mianowicie wartości wskaźnika m_{33} zmieniają się w zakresie: od 0,32 – opad równomierny, do nawet 0,96 – opad bardzo nierównomierny (tylko 4% masy występuje na pozostałych 2/3 czasu T). Podobnie charakterystyczne są wartości wskaźnika n_l – jako stosunku maksymalnych przedziałowych intensywności (liczone z $h_{max}(\Delta t = 0,1T)$), do wartości średnich z całego okresu trwania opadów (liczone z $P_c(T)$). Wynoszą one od $n_l = 2,16$ – mała nierównomierność opadu, do nawet $n_l = 6,36$ – duża nierównomierność (maksymalne wartości przedziałowe są przeszło sześciokrotnie większe od średniej). Na rysunku 4.11 dla badanych 25 opadów sporządzono bezwymiarowy hietogram, na którym zakresy zmian zmierzonych wartości względnych przedziałowych ($\Delta t = 0,1T$) wysokości opadów (h_i/P_c) zobrazowano za pomocą tzw. wykresów pudełkowych (opisanych w metodyce badań w podrozdz. 3.2.4).

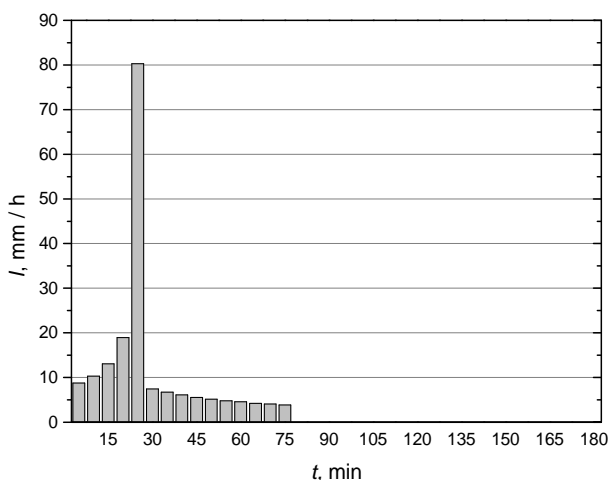


Rys. 4.11. Bezwymiarowy hietogram przedziałowych przyrostów wysokości 25 opadów z wykresami pudełkowymi wyników pomiarów dla Jeleniej Góry

Wykresy pudełkowe umożliwiają zobrazowanie informacji dotyczących położenia, rozproszenia i kształtu rozkładu empirycznego przedziałowych przyrostów wysokości opadów. Pierwszy kwartył (dolna krawędź pudełka) zawiera 25% pomiarów, drugi kwartył odpowiada medianie, natomiast trzeci (górną krawędź pudełka) odcina zbiór 25% pomiarów położonych powyżej. Na rysunku 4.11 wąsy ograniczono do 10% i 90% percentyla zbioru danych, które utożsamiane są z przedziałami ufności na poziomach 10% i 90%. Na przykład dla $t_i/T = 0,2$ maksymalna wartość piku – na poziomie 90% percentyla zbioru zmierzonych wysokości wynosi $h_i/P_c = 0,65$. Należy jednak zaznaczyć, że dyskretne wartości mediany na rysunku 4.11 wyznaczone zostały dla przedziałowych przyrostów wysokości opadów, w przeciwieństwie do mediany zilustrowanej na rysunku 4.10, gdzie wartości te zostały wyznaczone na podstawie sumowych krzywych masowych. Prowadzi to do pewnych różnic względnych wartości pików, mianowicie wartość piku h_i/P_c – wg wykresu słupkowego wynosząca ok. 0,29, spada do wartości ok. 0,25 – wg przedziałowych przyrostów wysokości. Nie ma natomiast różnic w samym położeniu piku: $r = 0,2 t_i/T$, tj. w 1/5 czasu trwania opadów. Ponieważ model Eulera typu II jest hietogramem wymiarowym, bazującym na całych krzywych (wymiarowych) IDF/DDF, toteż jego bezwymiarowe postacie (rys. 4.9–4.11) służyć mogą jedynie do weryfikacji położenia piku maksymalnej wysokości – intensywności opadu – z dokładnością $1/10 T$.

4.3.2. Weryfikacja wzorca Eulera typu II w układzie wymiarowym

Model Eulera typu II należy do hietogramów wzorcowych bazujących na całej krzywej DDF/IDF. Ma postać wymiarową (wartości h , I , q) i dyskretną ($\Delta t = \text{idem} =$



Rys. 4.12. Przykładowy wzorec Eulera typu II dla $T = 75$ min i $C = 1$ rok dla Jeleniej Góry

5 min). Do celów porównawczych kształtów 25 rzeczywistych hietogramów (wymiarowych) ze stacji IMGW-PIB w Jeleniej Górze niezbędne było opracowanie wzorcowych opadów Eulera typu II – z krzywych DDF/IDF dla tej stacji. Do utworzenia krzywych typu DDF wykorzystano model maksymalnych wysokości opadów (3.1), z którego obliczono wysokości opadów dla $t \in [5; 180]$ min oraz $C = 1, 2, 5$ i 10 lat, niezbędne do konstrukcji 28 modeli Eulera – dla 7 czasów trwania: $T = 30, 45, 60, 75, 90, 120$ i 180 min (przyjęte wartości T z zakresu czasów trwania rzeczywistych opadów, spełniają kryterium podziału na 3 równe części) i dla 4 klas częstości przewyższeń: $C = 1, 2, 5$ i 10 lat. Na rysunku 4.12 zobrazowano przykładowy wzorzec opadów Eulera typu II dla $T = 75$ minut i $C = 1$ rok ($P_c = 15,3$ mm) dla Jeleniej Góry.

W opracowanych wzorcach Eulera typu II zbadano rozkłady masy wg wskaźnika m_{33} . Wyniki obliczeń podano w tabeli 4.10. Są one niemal identyczne – niezależnie od T i C . Średnia wartość wskaźnika: $m_{33} = 0,714$.

Tabela 4.10. Stosunki skumulowanych wysokości opadów wg wskaźnika m_{33} we wzorcach Eulera typu II dla Jeleniej Góry

Częstość opadu	Czas trwania opadu T , min							Średnia
	30	45	60	75	90	120	180	
$C = 1$ rok	0,716	0,718	0,713	0,712	0,716	0,712	0,715	0,714
$C = 2$ lata	0,715	0,718	0,713	0,712	0,713	0,714	0,715	0,714
$C = 5$ lat	0,715	0,716	0,714	0,714	0,715	0,715	0,713	0,714
$C = 10$ lat	0,717	0,713	0,714	0,714	0,714	0,714	0,714	0,715
Średnia	0,716	0,716	0,714	0,713	0,715	0,714	0,714	0,714

Analizie poddano również zróżnicowanie nierównomierności w czasie intensywności opadów modelowych Eulera wg wskaźnika n_I . Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 4.11.

Tabela 4.11. Stosunki maksymalnych przedziałowych ($\Delta t = 5$ min) intensywności opadów (w mm/min) do ich średnich wartości w czasie T we wzorcach Eulera typu II dla Jeleniej Góry

Częstość opadu	Czas trwania opadu T , min							Średnia
	30	45	60	75	90	120	180	
$C = 1$ rok	3,47	4,60	5,60	6,56	7,43	9,10	12,05	6,97
$C = 2$ lata	3,46	4,59	5,61	6,53	7,44	9,05	11,99	6,95
$C = 5$ lat	3,47	4,59	5,61	6,55	7,43	9,06	12,04	6,96
$C = 10$ lat	3,47	4,60	5,61	6,55	7,44	9,07	12,02	6,97
Średnia	3,47	4,60	5,61	6,55	7,43	9,07	12,03	6,96

W opracowanych wzorcach Eulera typu II dla stacji Jelenia Góra nierównomierność intensywności wg wskaźnika n_I jest różna, od 3,47 do 12,05 (średnia 6,96) w poszczególnych czasach trwania – $T = 30$ –180 min, lecz niezależna od częstości wystę-

powania (C) opadów. Wartość wskaźnika położenia piku, tj. przedziału Δt z odciętą piku (t_{pik}) maksymalnej wysokości $h_{max}(\Delta t)$, wynosi średnio $r = 0,285$ – zmiany w zakresie od 0,25 dla $T = 30$ min do 0,32 dla $T = 180$ min, niezależnie od C .

Tabela 4.12. Parametry i wskaźniki opisu 25 rzeczywistych opadów (15 K i 10 F o $T \leq 180$ min) dla Jeleniej Góry

Nr	P_c	T	C	I_{sr}	q_{sr}	r	m_{33}	n_l	T'	r'	m_{33}'	n_l'
	mm	min	lata	mm/min	dm ³ /(s·ha)	–	–	–	min	–	–	–
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	14,8	38	1,7	0,389	64,8	0,20	0,63	3,50	45	0,17	0,73	4,14
2	49,1	44	>50	1,120	187,0	0,17	0,60	2,16	45	0,17	0,60	2,22
3	13,7	44	1,2	0,311	51,8	0,17	0,62	2,44	45	0,17	0,62	2,50
4	14,2	47	1,2	0,302	50,3	0,27	0,61	4,11	60	0,21	0,82	5,24
5	24,6	57	5,8	0,432	72,0	0,31	0,73	3,66	60	0,29	0,80	3,85
6	36,3	58	19,0	0,626	104,0	0,39	0,30	4,19	60	0,38	0,36	4,33
7	38,6	70	20,0	0,551	91,9	0,11	0,84	2,87	75	0,10	0,90	3,61
8	18,7	70	2,0	0,267	44,5	0,18	0,82	6,07	75	0,17	0,83	6,50
9	23,2	83	3,3	0,280	46,7	0,39	0,35	3,64	90	0,36	0,41	3,96
10	24,4	97	3,4	0,252	42,0	0,34	0,67	5,32	105	0,31	0,84	5,77
11	19,9	104	1,7	0,191	31,8	0,36	0,41	4,08	105	0,36	0,42	4,11
12	20,9	106	1,9	0,197	32,8	0,21	0,67	6,40	120	0,19	0,72	7,23
13	17,6	110	1,1	0,160	26,7	0,30	0,76	3,88	120	0,27	0,79	4,23
14	19,0	110	1,4	0,173	28,8	0,16	0,62	4,05	120	0,15	0,66	4,42
15	20,1	111	1,6	0,181	30,2	0,07	0,69	2,98	120	0,06	0,73	3,22
16	26,5	122	3,5	0,217	36,2	0,10	0,86	7,47	135	0,09	0,88	8,26
17	20,0	124	1,4	0,161	26,8	0,18	0,48	5,71	135	0,17	0,52	6,21
18	18,6	125	1,1	0,149	24,8	0,18	0,55	6,17	135	0,17	0,60	6,68
19	72,5	134	>50	0,541	90,2	0,32	0,57	3,36	135	0,31	0,59	3,39
20	21,0	135	1,5	0,156	26,0	0,17	0,64	7,18	135	0,17	0,64	7,20
21	36,9	147	8,3	0,251	41,8	0,15	0,96	6,93	150	0,15	0,97	7,07
22	55,5	150	30	0,370	61,7	0,22	0,79	5,62	150	0,22	0,79	5,62
23	22,4	150	1,7	0,149	24,8	0,28	0,67	5,64	150	0,28	0,67	5,62
24	30,2	150	4,3	0,201	33,5	0,18	0,76	5,97	150	0,18	0,76	5,96
25	21,2	180	1,2	0,118	19,7	0,18	0,67	9,49	180	0,18	0,67	9,51
Średnia				0,310	51,6	0,22	0,65	4,92	–	0,21	0,69	5,23
Mediana				0,251	41,8	0,18	0,67	4,19	–	0,18	0,72	5,24

Określone wcześniej parametry wzorcowych hietogramów wymiarowych Eulera porównano następnie z parametrami rzeczywistych opadów odnośnie do położenia piku, rozkładu masy i nierównomierności w czasie. W tabeli 4.12 zestawiono wartości liczbowe wskaźników r , m_{33} i n_l obliczone dla 25 badanych opadów w odniesieniu do rzeczywistego czasu ich trwania T (kolumny 7, 8 i 9). Dla zachowania poprawności porównań niezbędne jednak było zastosowanie odmiennej interpretacji parametru cza-

su trwania (T) rzeczywistych opadów. Dla zachowania zasady tworzenia opadów modelowych Eulera, tj. spełnienia warunku podzielności czasu trwania opadu na 3 równe części, a jednocześnie jego podzielności na przedziały – z krokiem czasowym $\Delta t = 5$ min, należy dokonać korekty rzeczywistego czasu trwania opadów T – do modelowego czasu ich trwania T' . W grę wchodzi tutaj jedynie jego wydłużenie, aby nie stracić masy rzeczywistego opadu. Przykładowo: opad nr 8 w tabeli 4.12 ($P_c = 18,7$ mm, $T = 70$ min i $C = 2$ lata) wymaga wydłużenia rzeczywistego czasu trwania $T = 70$ min do modelowego $T' = 75$ min (ostatni przedział Δt , między 70. i 75. minutą będzie pusty). Na tej podstawie, dokonano ponownych obliczeń – już dla modelowego czasu T' . Do analiz ilościowych zastosowano ponownie 3 wskaźniki: r , m_{33} , i n_I , przy czym interpretowano je, przykładowo: r' – jako stosunek położenia przedziału $\Delta t = 5$ min z odcięcią piku (t_{pik}) maksymalnej wysokości $h_{max}(\Delta t)$ do modelowego czasu T' . Analogicznie zmodyfikowano definicje pozostałych wskaźników. W drugiej części tabeli 4.12 (kolumny 11, 12 i 13) zestawiono wartości zmodyfikowanych wskaźników (oznaczonych z „prim” dla czasu T'), obliczone dla populacji 25 badanych opadów.

Odniesione do rzeczywistego czasu trwania opadów (T) wartości wskaźników wynoszą:

$r \in [0,07; 0,39]$; wartość średnia: 0,22; mediana: 0,18;

$m_{33} \in [0,30; 0,96]$; wartość średnia: 0,65; mediana: 0,67;

$n_I \in [2,16; 9,49]$; wartość średnia: 4,92; mediana: 4,19;

Natomiast odniesione do modelowego czasu trwania opadów (T') wynoszą:

$r' \in [0,06; 0,38]$; wartość średnia: 0,21; mediana: 0,18;

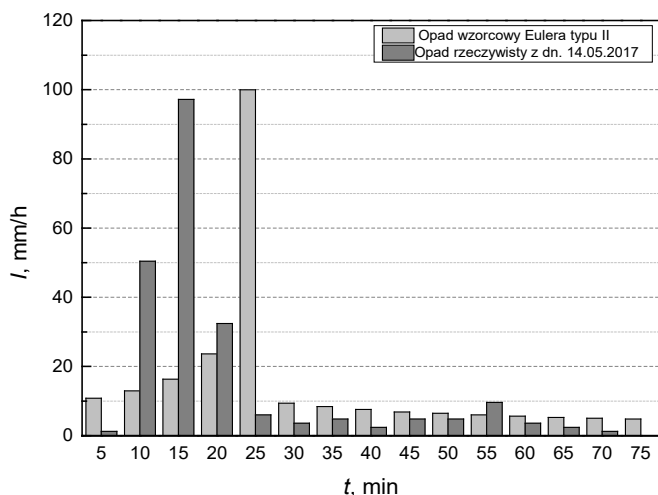
$m'_{33} \in [0,36; 0,97]$; wartość średnia: 0,69; mediana: 0,72;

$n'_I \in [2,22; 9,51]$; wartość średnia: 5,23; mediana: 5,24.

Średnie wartości tych wskaźników – dla modelowego czasu T' są nieznacznie niższe o 0,01 dla r' , natomiast wyższe o 0,04 dla m'_{33} oraz o 0,31 dla n'_I – w porównaniu z obliczonymi dla rzeczywistego czasu trwania opadów T . Wyniki analiz dla czasu T' umożliwiają jednak wyciągnięcie poprawnych metodycznie wniosków, dotyczących porównania 25 hietogramów rzeczywistych opadów z Jeleniej Góry z 28 wzorcami Eulera typu II dla tej stacji, a mianowicie: wartości wskaźnika r położenia piku maksymalnej wysokości $h_{max}(\Delta t)$ względem czasu T' na 25 hietogramach rzeczywistych opadów obejmują swoim zakresem: $r' \in [0,06; 0,38]$, z wartością średnią $r' = 0,21$ (mediana 0,18). Wartości tego wskaźnika we wzorcach Eulera typu II zmieniają się w zakresie: $r \in [0,25; 0,32]$, średnio $r = 0,285$ – dla $T = T' \in [30; 180]$ min. Oba piki różnią się przedziałowym położeniem, lecz występują w pierwszej 1/3 części czasu trwania opadów $T = T'$ (jak we wzorcu Eulera typu II). Rozkłady masy na 25 hietogramach były zmienne: $m'_{33} \in [0,36; 0,97]$, jednakże wartość średnia: $m'_{33} = 0,69$ (mediana 0,72) jest prawie równa wartości $m_{33} = 0,714$ – dla 28 modeli Eulera typu II. W obu przypadkach, główna masa opadu zlokalizowana jest więc w pierwszej 1/3 części czasu trwania $T = T'$. Nierównomierność opadów w czasie na 25 hietogramach

była znaczna, w granicach $n'_i \in [2,22; 9,51]$, średnio $n'_i = 5,23$ (mediana 5,24). W opadach wzorcowych Eulera typu II nierównomierność była podobna – w granicach $n_i \in [3,47; 12,03]$, średnio $n_i = 6,96$. Wartości te należy uznać również za zbliżone.

Na rysunku 4.13 przedstawiono przykładowe hietogramy słupkowe: wzorca Eulera typu II o $C = 2$ lata i $T = 75$ min (dla $P_c = 19,1$ mm wg modelu (3.1)) i rzeczywistego opadu ze stacji IMGW-PIB Jelenia Góra (z dnia 14.05.2017 r.) o $C = 2$ lata i $T = 70$ min – przekształconym na $T' = 75$ min ($P_c = 18,7$ mm). Widoczna jest zgodność wartości pików intensywności przedziałowej opadów, a także lokalizacji głównej masy opadu – ok. 70% P_c w pierwszej 1/3 części czasu trwania ($T = T'$). W szczególności położenie pików przesunięte jest z przedziału czasu 20–25 min ($1/3T$) do przedziału 10–15 minut ($1/5T$).



Rys. 4.13. Zestawienie hietogramów: wzorcowego Eulera typu II o $t = 75$ min i $C = 2$ lata z rzeczywistym opadem o $T = 70$ min ($T' = 75$ min) i $C = 2$ lata dla Jeleniej Góry

Podsumowując, należy stwierdzić, że wzorec Eulera typu II opisuje w przybliżeniu opady ze stacji górskiej – IMGW-PIB w Jeleniej Górze. W obu przypadkach zarówno główna masa opadu, jak i piki maksymalnej przedziałowej intensywności występują w pierwszej 1/3 części czasu trwania opadów. Średnia wartość głównego wskaźnika rozkładu masy opadu $m_{33} = 0,69$ na 25 histogramach wymiarowych jest niemal równa stałej wartości $m_{33} = 0,71$ – w modelach Eulera typu II. Jednakże położenie pików maksymalnej intensywności opadów (dla $\Delta t = 5$ min) znacznie się różni – dla badanych opadów występuje na końcu 1/5 części czasu trwania opadów, a w modelach Eulera typu II – na końcu 1/3. Wykazane rozbieżności mieszczą się ogólnie w klasie dokładności pomiarów i obliczeń hydrologicznych, dotyczących zjawisk o charakterze losowym. To znaczy, że idea tworzenia wzorców Eulera typu II z krzywych

IDF może zostać uznana za pozytywnie zweryfikowaną na opadach ze stacji górskiej. W tym przypadku należy dokonać jedynie korekty położenia przedziałowego piku maksymalnej intensywności – z 1/3 do 1/5 czasu trwania opadu modelowego.

4.3.3. Weryfikacja wzorca DVWK w układzie bezwymiarowym

Do ilościowej weryfikacji podobieństwa kształtów hietogramów bezwymiarowych ze stacji IMGW-PIB w Jeleniej Górze do wzorca DVWK wykorzystano 13 opadów frontalnych oraz niżowych, wskazanych fizycznie z II grupy kwartylnego Huffa (8 opadów pochodzi ze skupienia nr 2 oraz 5 ze skupienia nr 3 – wg metody k -średnich). Szczegółowej analizie poddano: 10 opadów frontalnych (o $T > 180$ min) i 3 niżowe. W tabeli 4.13 zestawiono wartości parametrów opadów i wskaźników (r , r_{sc} , m_{30} , m_{50} , n_I) do szczegółowej oceny podobieństwa badanej populacji opadów do wzorca DVWK.

Tabela 4.13. Parametry opadów i wskaźniki podobieństwa 13 bezwymiarowych hietogramów (10 F i 3 N) z II grupy kwartylnego Huffa dla Jeleniej Góry

Nr	P_c	T	C	I_{sr}	q_{sr}	r	r_{sc}	m_{30}	m_{50}	n_I	Nr skupienia/Kwartyl
	mm	min	lata	mm/min	dm ³ /(s·ha)	–	–	–	–	–	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	58,1	184	28	0,3158	52,6	0,46	0,49	0,07	0,62	4,38	2/II
2	21,0	187	1,1	0,1123	18,7	0,36	0,34	0,42	0,86	2,44	3/II
3	83,2	197	>50	0,4223	70,4	0,25	0,35	0,39	0,83	2,55	3/II
4	33,5	229	4	0,1463	24,4	0,25	0,28	0,61	0,84	4,61	3/II
5	78,8	448	31	0,1759	29,3	0,45	0,43	0,34	0,84	4,50	2/II
6	124,9	520	>50	0,2402	40,0	0,35	0,36	0,31	0,70	3,14	2/II
7	38,8	560	2,7	0,0693	11,6	0,55	0,44	0,27	0,60	2,01	2/II
8	37,8	609	2,3	0,0621	10,4	0,27	0,27	0,61	0,93	3,22	3/II
9	37,6	650	2,1	0,0578	9,64	0,45	0,43	0,38	0,71	2,83	2/II
10	49,5	696	4,7	0,0711	11,9	0,35	0,41	0,22	0,67	2,71	2/II
11	46,0	920	2,9	0,0500	8,34	0,05	0,44	0,31	0,57	1,80	2/II
12	48,4	1437	2,2	0,0337	5,62	0,25	0,36	0,44	0,63	2,53	2/II
13	99,5	2920	11	0,0341	5,68	0,35	0,33	0,40	0,84	2,95	3/II
Średnia				0,1378	22,97	0,34	0,38	0,37	0,74	3,05	–
Mediana				0,0711	11,90	0,35	0,36	0,38	0,71	2,83	–

Dla badanych 13 opadów charakterystyczne wartości wskaźników wynoszą (tab. 4.13):

$r \in [0,05; 0,55]$; wartość średnia: 0,34; mediana 0,35;

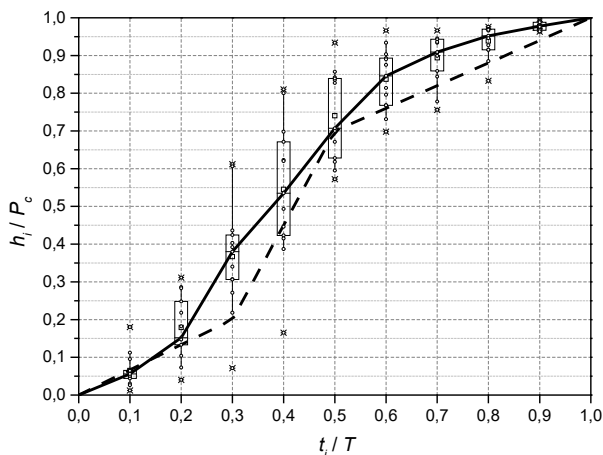
$r_{sc} \in [0,27; 0,49]$; wartość średnia: 0,38; mediana 0,36;

$m_{30} \in [0,07; 0,61]$; wartość średnia: 0,37; mediana 0,38;

$m_{50} \in [0,57; 0,93]$; wartość średnia: 0,74; mediana 0,71;

$n_I \in [1,80; 4,61]$; wartość średnia: 3,05; mediana 2,83.

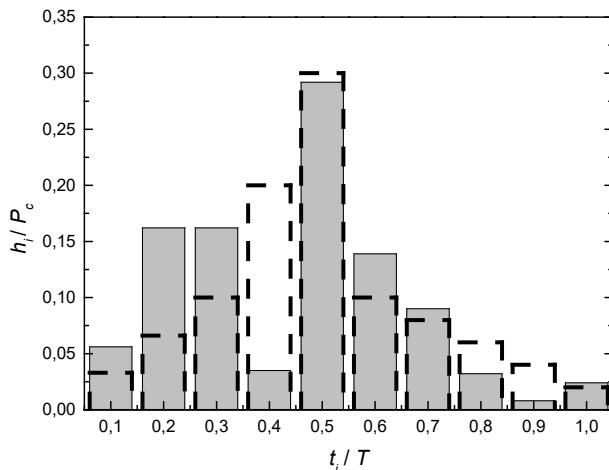
Dla zmierzonych i obliczonych parametrów badanych opadów (tab. 4.13) opracowano wzorcową krzywą sumową – z median przedziałowych wysokości, z podaniem wyników pomiarów w tzw. pudełkach, którą przedstawiono na rysunku 4.14, wraz z naniesioną krzywą łamaną wg wzorca DVWK.



Rys. 4.14. Bezwymiarowy hietogram 13 opadów (linia ciągła) z wykresami pudełkowymi wyników pomiarów z Jeleniej Góry wraz z naniesionym wzorcem DVWK (linia przerywana)

Z rysunku 4.14 wynika, że wzorcowa krzywa sumowa wg pudełek z 50% percentylami przedstawia bezwymiarowy opad o kształcie zbliżonym do wzorca DVWK. Zgodność obu modeli występuje dla głównego wskaźnika rozkładu masy m_{50} , tj. dla $t_i/T = 0,50$ – wartość średnia $h_i/P_c = 0,74$ (mediana 0,71) dla badanych opadów i stała wartość $h_i/P_c = 0,70$ dla wzorca DVWK. Natomiast dla wskaźnika m_{30} , tj. dla $t_i/T = 0,30$ występują już znaczne rozbieżności – wartość średnia $h_i/P_c = 0,37$ (mediana 0,38), dla badanych opadów wobec stałej wartości $h_i/P_c = 0,20$ dla wzorca DVWK. Średnia wartość nierównomierności w czasie intensywności badanych opadów: $n_I = 3,05$ (mediana 2,83) jest zbliżona do stałej wartości $n_I = 3,00$ dla wzorca DVWK. Dla badanych opadów, zgodnie z przebiegiem krzywej sumowej (rys. 4.14), po pierwszych 20% czasu trwania (T) wystąpi ok. 15% jego całkowitej wysokości (P_c), po czasie równym 60% T pojawi się ok. 85% P_c , a pozostałe około 15% P_c wystąpi na 40% T .

Na rysunku 4.15 zobrazowano dwa bezwymiarowe hietogramy słupkowe, odpowiednio: przykładowego opadu frontalnego (z dnia 20.08.2016 r.) o $P_c = 37,6$ mm, $T = 650$ min i $C = 2,1$ lat, pochodzącego ze stacji IMGW-PIB Jelenia Góra oraz wzorzec słupkowy opadu modelowego DVWK.



Rys. 4.15. Przykładowy bezwymiarowy hietogram słupkowy opadu frontalnego z Jeleniej Góry (linia ciągła) z naniesionym wzorcem słupkowym opadu modelowego DVWK (linia przerywana)

Analizowany opad frontalny charakteryzuje się następującymi wskaźnikami: $r = 0,45$, $r_{sc} = 0,43$, $m_{30} = 0,38$ i $m_{50} = 0,71$ oraz $n_I = 2,83$ (tab. 4.13). Z porównania (na rys. 4.15) dwóch bezwymiarowych hietogramów, tj. przykładowego opadu frontalnego z wzorcem DVWK wynika praktycznie zgodność położenia piku (dla $0,5T$), jak i bezwymiarowych wartości pików maksymalnej przedziałowej wysokości (dla $\Delta t = T/10$), czyli zgodność nierównomierności przedziałowej intensywności opadu w czasie $n_I = 2,83$ – dla rzeczywistego opadu frontalnego, z $n_I = 3,00$ – dla wzorca DVWK. Z porównania tego wynika też zgodność rozkładu sumowych wysokości wg wskaźnika $m_{50} = 0,71$ – dla badanego opadu frontalnego, z $m_{50} = 0,70$ – dla wzorca DVWK. Natomiast występują duże rozbieżności dla wskaźnika $m_{30} = 0,38$ – dla badanego opadu i $m_{30} = 0,20$ – dla wzorca DVWK.

Podsumowując, należy stwierdzić, że wzorzec DVWK nie może być uznany za pozytywnie zweryfikowany na 13 opadach pochodzących ze stacji górskiej – IMGW-PIB Jelenia Góra jako mieszczący się w klasie dokładności pomiarów i obliczeń hydrologicznych dotyczących zjawisk o charakterze losowym. Występują bowiem istotne różnice w rozkładzie masy opadów.

5. Wyniki badań hietogramów ze stacji IMGW-PIB i MPWiK we Wrocławiu

5.1. Charakterystyka materiału badawczego

Do zbadania kształtów hietogramów lokalnych deszczów we Wrocławiu posłużono się wyodrębnionym zbiorem danych opadowych ze stacji IMGW-PIB Wrocław Strachowice – zarejestrowanych w okresie 2007–2018 (12 lat zapisów elektronicznych – wg tab. 3.1) oraz zbiorem danych z 11 deszczomierzy należących do sieci pomiarowej MPWiK we Wrocławiu (z okresów rejestracji od 1 do 7 lat – wg tab. 3.2). Zarówno w przypadku stacji IMGW-PIB, jak i sieci MPWiK dane opadowe rejestrowane były z 1-minutowym krokiem czasowym. Dla każdego niezależnego opadu obliczono skumulowaną wysokość całkowitą (P_c) – w całkowitym czasie jego trwania (T), a następnie przypisano odpowiednią częstość występowania z przewyższeniem (C) z wykorzystaniem szeregów czasowych DDF, podanych w tabeli 3.4 w rozdziale 3.2.2, obliczonych z aktualnego modelu opadów maksymalnych (3.2) dla Wrocławia. Do analiz statystycznych wyselekcjonowano opady o częstościach przewyższeń $C(T) \geq 1$ rok, uzyskując populację 126 opadów (z łącznej liczby 951 [94]), które następnie pogrupowano względem czasów trwania na 3 grupy: $t \leq 120$ min (opady konwekcyjne), $t \in (120; 720]$ min (opady frontalne) i $t > 720$ min (opady niżowe). Wydzielono w tym także 7 podgrup czasów trwania: $t \leq 60$ min, $t \in (60; 120]$ min, $t \in (120; 180]$ min, $t \in (180; 360]$ min, $t \in (360; 720]$ min, $t \in (720; 1440]$ min i $t \geq 1440$ min. W tabeli 5.1 zestawiono liczebność opadów w poszczególnych grupach i podgrupach czasów trwania.

We Wrocławiu najwięcej analizowanych opadów ma charakter konwekcyjny – 59% (z czego 80% należy do podgrupy $t \leq 60$ min). Opady frontalne i niżowe mają znacznie mniejszy udział, odpowiednio 21% i 20%. Ze względu na częstość występowania, opady zaklasyfikowano do 4 klas przewyższeń: $C \in [1; 2)$ lata, $C \in [2; 5)$ lat, $C \in [5; 10)$ lat oraz $C \geq 10$ lat. Liczebność opadów w klasach częstości przewyższeń zestawiono w tabeli 5.2.

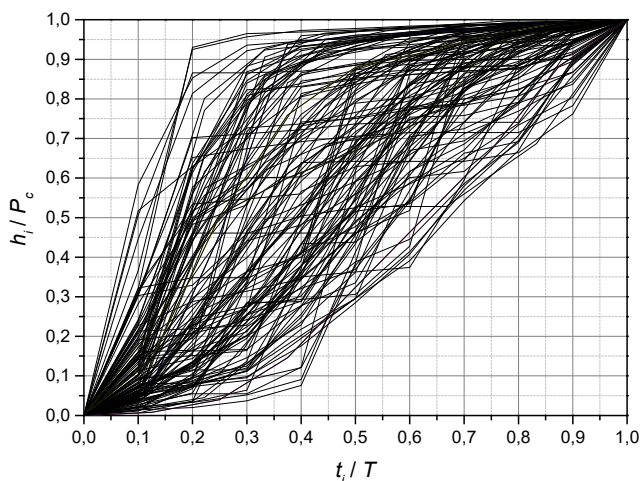
Tabela 5.1. Liczebność opadów w wyodrębnionych grupach i podgrupach czasowych dla Wrocławia

Liczba opadów w (3) grupach/(7) podgrupach czasów trwania (% populacji)						
$t \leq 120$ min – K		$t \in (120; 720]$ min – F			$t > 720$ min – N	
75 (59%)		26 (21%)			25 (20%)	
≤ 60 min	(60; 120] min	(120; 180] min	(180; 360] min	(360; 720] min	(720; 1440] min	> 1440 min
60	15	9	3	14	13	12
Łącznie 126 (100%)						

Tabela 5.2. Liczebność opadów w klasach częstości przewyższeń dla Wrocławia

Klasa przewyższeń	Liczba opadów (%)
$C \in [1; 2)$ lat	56 (45%)
$C \in [2; 5)$ lat	37 (29%)
$C \in [5; 10)$ lat	18 (14%)
$C \geq 10$ lat	15 (12%)
Łącznie	126 (100%)

Do zbadania kształtów bezwymiarowych hietogramów masowych dla każdego z opadów wyznaczono dyskretną wartość przedziału czasu $\Delta t(T)$, w którym analizowano przyrosty wysokości w 10 przedziałach. Następnie dla każdego przedziału $\Delta t(T) = 0,1T$ ustalano skumulowane przyrosty wysokości opadów $h_i/P_c \equiv P/P_c$ – dla skumulowanych czasów trwania t_i/T . Na rysunku 5.1 zilustrowano przebiegi kształtów 126 badanych opadów w postaci bezwymiarowych krzywych sumowych.



Rys. 5.1. Krzywe sumowe 126 analizowanych opadów dla Wrocławia

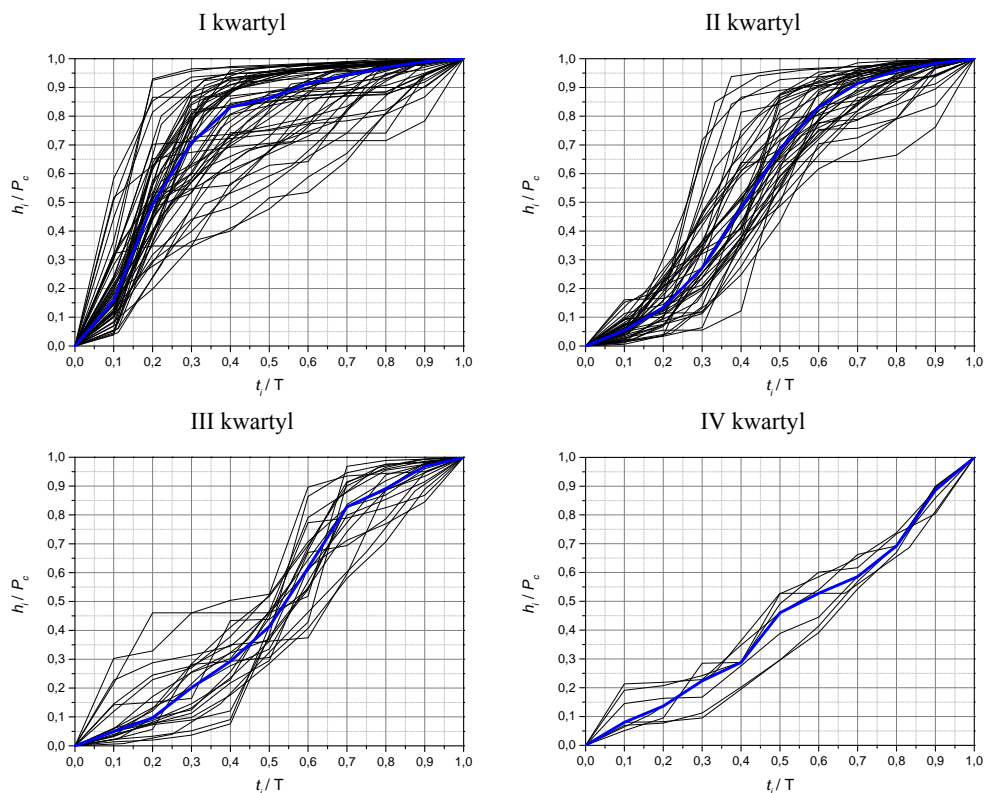
5.2. Grupowanie opadów ze względu na kształt hietogramów bezwymiarowych

5.2.1. Analiza grupowań metodą Huffa

W pierwszej kolejności, do analizy podobieństwa kształtów hietogramów zastosowano metodykę Huffa. Dla każdego z analizowanych opadów wyznaczono przyrosty wysokości

Tabela 5.3. Liczebność opadów w grupach kwartylnych Huffa dla Wrocławia

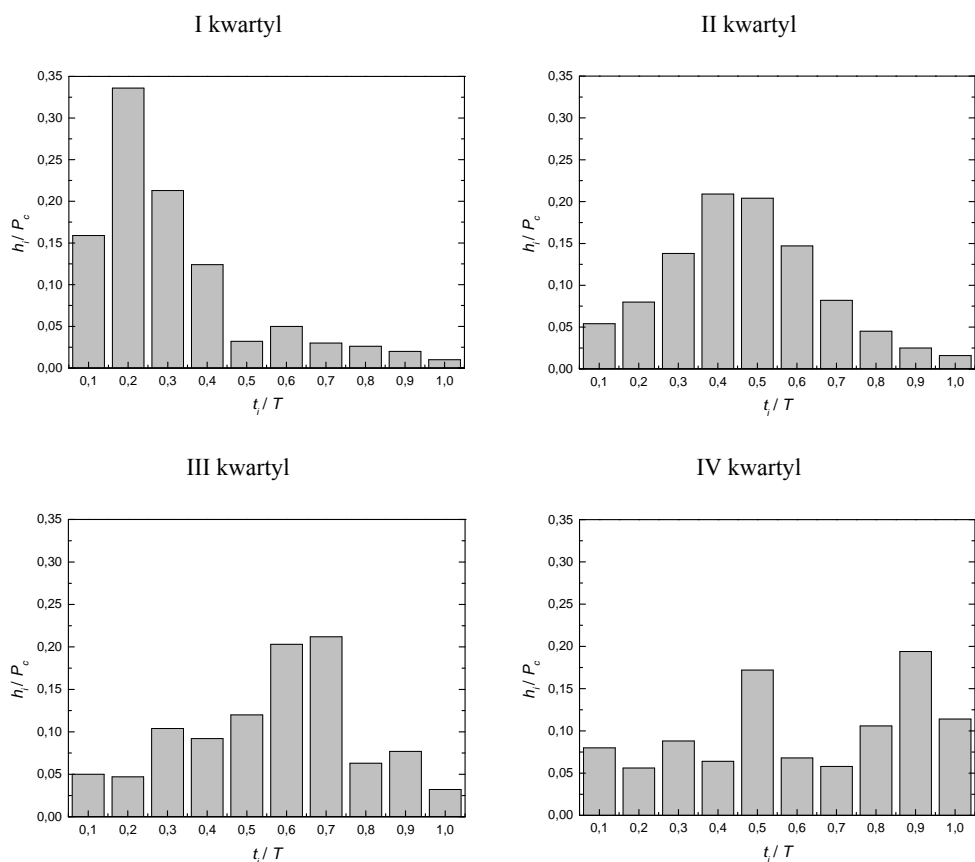
Grupa kwartylna	Liczba opadów (%)
I	55 (44%)
II	43 (34%)
III	21 (17%)
IV	7 (5%)
Łącznie	126 (100%)



Rys. 5.2. Krzywe sumowe opadów z medianą w 4 grupach kwartylnych Huffa dla Wrocławia

w kolejnych 25% czasu jego trwania i na tej podstawie przypisano opady do 4 grup kwartylnych. Zestawienie liczby opadów w grupach kwartylnych Huffa, tj. z odpowiednio umiejscowionym największym przyrostem wysokości opadu, przedstawiono w tabeli 5.3.

Największą populację analizowanych zjawisk stanowią opady z I i II grupy kwartylnej – 78% (odpowiednio 44% i 34%), co oznacza, że w zdecydowanej większości przyrost masy skoncentrowany jest w pierwszej połowie czasu ich trwania. Pozostałe grupy kwartylne – III i IV stanowią liczebnie 22% badanych opadów (odpowiednio 17% i 5%). Liczebność opadów w podziale Huffa we Wrocławiu jest zbliżona do uzyskanej dla Jeleniej Góry (I i II grupa – 71% oraz III i IV grupa – 29%). Dla każdej grupy kwartylnej zilustrowano przynależne krzywe sumowe wraz z obliczoną krzywą mediany (rys. 5.2), na podstawie której opracowano bezwymiarowe hietogramy słupkowe, będące odzwierciedleniem wartości median w każdym kwartylu (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Bezwymiarowe hietogramy słupkowe z median w 4 grupach kwartylnych Huffa dla Wrocławia

W każdej z otrzymanych grup kwartylnych Huffa zbadano liczebność opadów w poszczególnych grupach i podgrupach czasu trwania, którą zestawiono w tabeli 5.4. Ogólnie dla opadów o charakterze konwekcyjnym (K) – 59% „populacji” zauważalna jest zdecydowana przewaga ich występowania w I i II grupie kwartylnej (92%). W Jeleniej Górze było to 78%. Opady frontalne (F) – 21% „populacji” przeważają w II i III grupie (81%). Natomiast w Jeleniej Górze opady frontalne przeważały w I i II grupie – 79%. Opady o charakterze niżowym we Wrocławiu (N) – 20% „populacji” występują w miarę równomiernie we wszystkich grupach kwartylnych – nieznaczna przewaga w I grupie – 40%. W Jeleniej Górze opadów niżowych było natomiast 22% – z nieznaczną przewagą w III grupie (39%). W IV grupie kwartylnej najmniej licznej – 5% „populacji” (identycznie jak w Jeleniej Górze), występuje: 1 opad K, 1 opad F i 5 opadów N (tab. 5.4).

Tabela 5.4. Liczebność opadów wg czasów trwania w grupach kwartylnych Huffa dla Wrocławia

Lp.	Rodzaj opadu	Podgrupa czasu trwania opadu T	Grupa kwartylna				Razem
			I	II	III	IV	
1	K	≤ 60 min	30	25	4	1	75 (59%)
2		(60; 120] min	11	3	1	0	
3	F	(120; 180] min	3	3	3	0	26 (21%)
4		(180; 360] min	1	0	2	0	
5		(360; 720] min	0	8	5	1	
6	N	(720; 1440] min	3	2	4	4	25 (20%)
7		> 1440 min	7	2	2	1	
Razem			55 (44%)	43 (34%)	21 (17%)	7 (5%)	126 (100%)

Szczegółowa analiza danych zawartych w tabeli 5.4 prowadzi do wniosku, że we Wrocławiu (podobnie jak i w Jeleniej Górze) opady o czasie trwania do 180 min, tj. opady konwekcyjne (K) oraz frontalne (F) – z ich pierwszej podgrupy czasu trwania: $T \in (120; 180]$ min, wykazują tendencję do najczęstszego powiązania z rozkładem wg I i II kwartyli (44 + 31 = 75 opadów). Pozostałe opady frontalne (F), tj. o czasie trwania $T \in (180; 720]$ min, występują w przewadze w II i III grupie – łącznie 15 opadów (w Jeleniej Górze występują w I, II i III grupie kwartylnej – z nieznaczną przewagą w II grupie – 10 opadów). Natomiast we Wrocławiu opady o charakterze niżowym (25 opadów), tj. o czasach trwania $T > 720$ min, występują w miarę równomiernie we wszystkich grupach kwartylnych – z przewagą liczebną występowania w I grupie (10). W Jeleniej Górze było podobnie – z nieznaczną przewagą w III grupie.

Wyniki analiz opadów dla Wrocławia potwierdzają ogólne wnioski wynikające z badań Huffa opadów w USA, że największa ich „populacja” występuje w I i II grupie kwartylnej – 78% (w Jeleniej Górze opadów z I i II grupy było 71%). W szczególności potwierdzono, że opady o czasie trwania $T \leq 6$ h (tab. 5.4) wykazują tendencję do częstszego powiązania z rozkładem wg I kwartyli (52%), natomiast opady o $T \in$

(6; 12] h należą najczęściej do drugiego kwartyla (57%). Dla opadów o dłuższych czasach trwania nie potwierdzono już prawidłowości Huffa, że dla $T \in (12; 24]$ h opady mają rozkład charakterystyczny dla III kwartyla, ponieważ we Wrocławiu (podobnie jak i w Jeleniej Górze) rozmieszczone są równomiernie w 4 kwartyłach (tab. 5.4). Podobnie opady o $T > 24$ h nie mają najczęściej rozkładu IV kwartyla, gdyż we Wrocławiu przeważają w I kwartylu (a w Jeleniej Górze w III kwartylu). Wyniki podanych analiz wskazują więc dobitnie na losowość badanych zjawisk hydrologicznych. Dla opadów zarejestrowanych we Wrocławiu charakterystyczne zakresy czasów ich trwania to: $T \leq 3$ h, $T \in (3; 12]$ h, $T \in (12; 24]$ h, $T > 24$ h (identycznie jak dla Jeleniej Góry), co należy uwzględnić przy wyborze opadów do weryfikacji wzorców Eulera i DVWK.

W każdej z grup kwartylnych Huffa zbadano także liczebność opadów w poszczególnych klasach częstości przewyższeń – zestawienie wyników w tabeli 5.5. W przypadku tej analizy można zauważyć, że w 1 klasie częstości przewyższeń, tj. dla $C \in [1; 2)$ lata, obejmującej 56 opadów – 44% zdarzeń, przeważają liczebnie opady zaliczone do I grupy kwartylnej – 23 opady, tj. 41% (w Jeleniej Górze było 54%). W 2 klasie częstości przewyższeń, tj. dla $C \in [2; 5)$ lat, obejmującej 37 opadów – 30% „populacji”, przeważają liczebnie opady zaliczone do I i II grupy kwartylnej, odpowiednio 11 i 19 opadów, tj. 30% i 51% (w Jeleniej Górze było 33% i 42%). W 3 klasie – dla $C \in [5; 10)$ lat, obejmującej 18 opadów – 14% „populacji”, przeważają liczebnie opady zaliczone do I grupy kwartylnej – 13, tj. 72% (w Jeleniej Górze było 44%). W 4. klasie częstości przewyższeń, spośród opadów o $C \geq 10$ lat, obejmującej 15 zdarzeń – 12% „populacji”, również przeważają liczebnie opady zaliczone do I grupy kwartylnej – 8 opadów, tj. 53% (w Jeleniej Górze przeważały opady zaliczane do II grupy – 48%).

Tabela 5.5. Liczebność opadów wg klas częstości przewyższeń w grupach kwartylnych Huffa dla Wrocławia

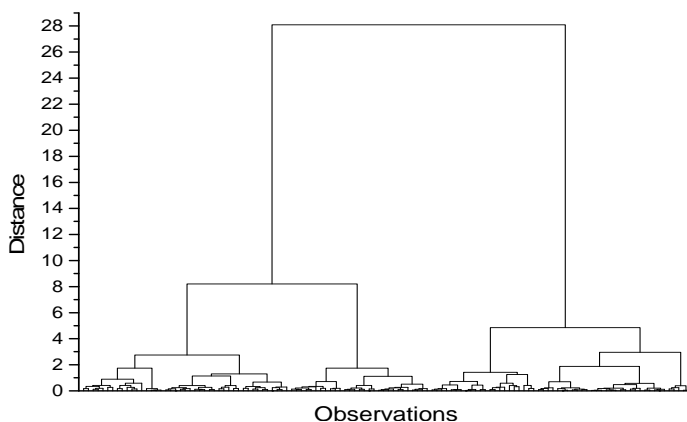
Lp.	Klasa przewyższeń C	Grupa kwartylna				Razem
		I	II	III	IV	
1	$C \in [1; 2)$ lata	23	19	10	4	56 (44%)
2	$C \in [2; 5)$ lat	11	19	5	2	37 (30%)
3	$C \in [5; 10)$ lat	13	1	4	0	18 (14%)
4	$C \geq 10$ lat	8	4	2	1	15 (12%)
Razem		55 (44%)	43 (34%)	21 (17%)	7 (5%)	126 (100%)

Podsumowując, grupowanie opadów metodą Huffa nie prowadzi do określenia wyraźnych różnic kształtu badanych hietogramów masowych w zależności od typów genetycznych K, F i N, jak i częstości ich występowania. Kształty bezwymiarowych hietogramów jako krzywych sumowych wysokości opadów (rys. 5.2), jak i kształty bezwymiarowych hietogramów słupkowych z median, są w grupach kwartylnych

Huffa dość nieregularne, a występujące piki na hietogramach słupkowych (rys. 5.3) są na podobnym poziomie median – ok. $0,20 h_i/P_c$, z wyjątkiem I grupy kwartylnej, w której pik wynosi ok. $0,33 h_i/P_c$. W I grupie kwartylnej rozkład masy i kształt hietogramu wg mediany jest najbardziej zbliżony do wzorca Eulera typu II. Natomiast II grupa kwartylna odzwierciedla w przybliżeniu wzorec DVWK. Podobne wnioski sformułowano dla opadów z Jeleniej Góry.

5.2.2. Analiza skupień metodą Warda

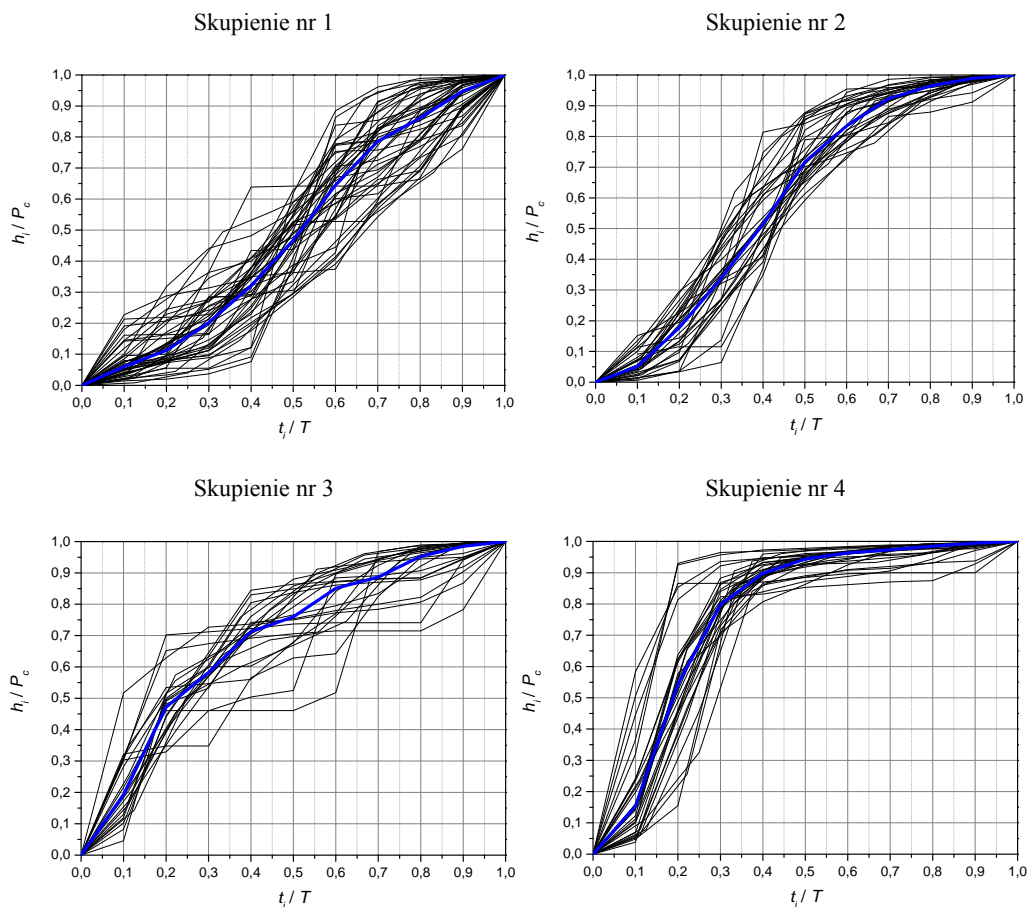
W celu szczegółowego zbadania cech podobieństwa kształtów hietogramów badanych opadów K, F i N z Wrocławia zastosowano analizę skupień metodą Warda. Na rysunku 5.4 przedstawiono dendrogram będący rezultatem grupowania 126 opadów pochodzących ze stacji meteorologicznej IMGW-PIB i sieci deszczomierzy MPWiK we Wrocławiu.



Rys. 5.4. Dendrogram grupowania 126 opadów metodą Warda dla Wrocławia

Analiza dendrogramu umożliwia ustalenie odległości wiązań na poziomie odcięcia o wartości ok. 3 (identycznie jak w przypadku opadów w Jeleniej Górze), co prowadzi do podziału opadów na 4 skupienia, z wyraźnie różniącymi się przebiegami zmian intensywności w czasie. Na rysunku 5.5 zobrazowano krzywe sumowe opadów przynależne do czterech skupień z naniesionymi krzywymi median.

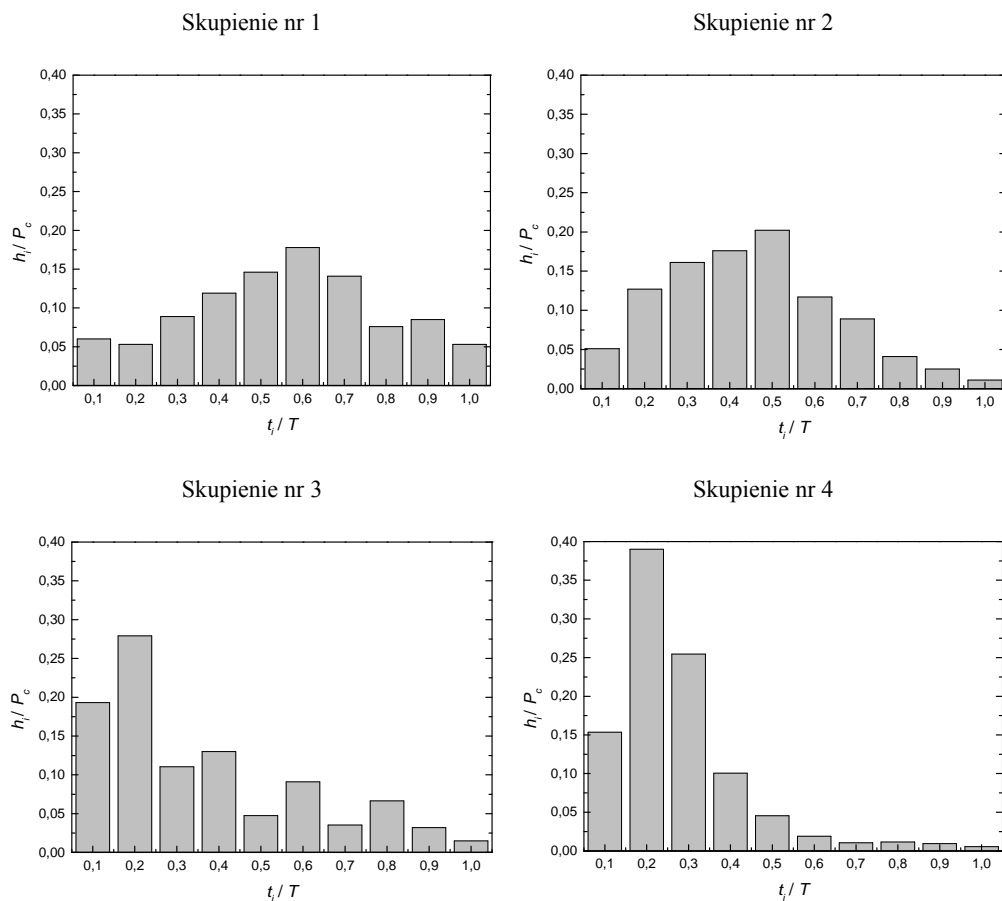
Najbardziej liczne jest skupienie nr 1, obejmuje 34% analizowanych zjawisk opadowych. Opady należące do tego skupienia cechują się maksymalnymi przyrostami wysokości występującymi na początku drugiej połowy czasu ich trwania. Drugie pod względem liczebności jest skupienie nr 4 – 25% populacji, które cechuje się największymi przyrostami przedziałowej wysokości w 1/3 czasu trwania opadów, co czyni je istotnym do porównań z wzorcem Eulera. Skupienie nr 2 cechuje się podobną liczebnością (23%). Opady należące do tego skupienia mają przebieg zbliżony do wzorca



Rys. 5.5. Krzywe sumowe opadów z medianą w 4 skupieniach wg metody Warda dla Wrocławia

DVWK – z największym przyrostem masy w środku czasu trwania. Najmniej liczne jest skupienie nr 3, obejmujące 18% analizowanych zjawisk opadowych, dla którego największe przyrosty wysokości występują na pierwszych 20% czasu trwania – zbliżone do skupienia nr 4. Spostrzeżenia te znajdują potwierdzenie na rysunku 5.6, który przedstawia bezwymiarowe histogramy opadów jako odzwierciedlenie median w każdym z 4 skupień. W porównaniu z 4 kwartylami Huffa, gdzie piki na histogramach słupkowych były na poziomie $0,20\text{--}0,33 h_i/P_c$, to w przypadku 4 skupień wg metody Warda zauważa się większe zróżnicowanie wartości pików, w zakresie $0,18\text{--}0,39 h_i/P_c$ (rys. 5.6). Pod względem kształtów rozkładów masy wg median, skupienia nr 3 i 4 są najbardziej zbliżone do wzorca Eulera typu II, a skupienie nr 2 – do wzorca DVWK.

W każdym skupieniu Warda zbadano liczebność opadów w poszczególnych grupach i podgrupach czasu trwania. Z analizy danych przedstawionych w tabeli 5.6



Rys. 5.6. Bezwymiarowe hietogramy słupkowe z median w 4 skupieniach wg metody Warda dla Wrocławia

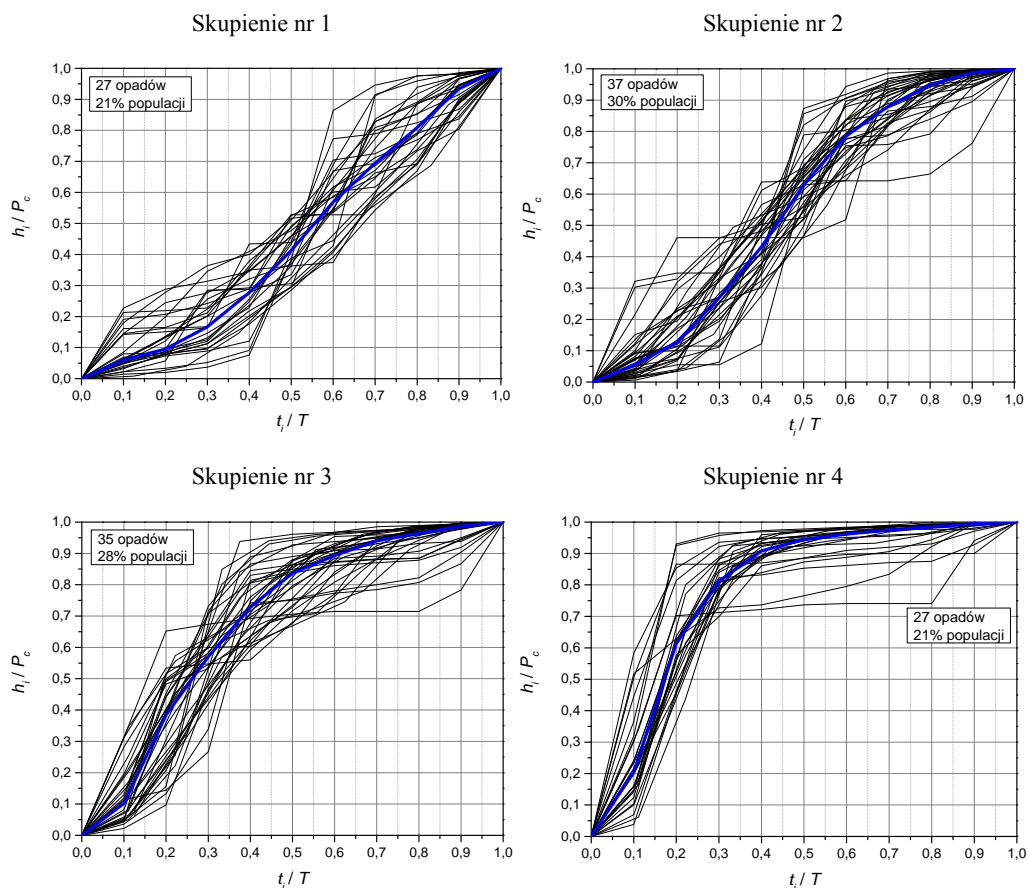
Tabela 5.6. Liczebność opadów wg czasów trwania w 4 skupieniach wydzielonych metodą Warda dla Wrocławia

Lp.	Rodzaj opadu	Podgrupa czasu trwania opadu T	Numer skupienia				Razem
			1	2	3	4	
1	K	≤ 60 min	12	20	7	21	75 (59%)
2		(60; 120] min	2	2	6	5	
3	F	(120; 180] min	3	3	1	2	26 (21%)
4		(180; 360] min	0	0	2	0	
5		(360; 720] min	10	3	0	2	
6	N	(720; 1440] min	11	1	1	0	25 (20%)
7		>1440 min	5	0	5	2	
Razem			43 (34%)	29 (23%)	27 (34%)	32 (25%)	126 (100%)

wynika, że we Wrocławiu opady o czasie trwania do ok. 180 min, tj. opady konwekcyjne (K) oraz frontalne (F) – z ich pierwszej podgrupy czasu trwania: $T \in (120; 180]$ min, łącznie 84 analizowanych opadów jest prawie równomiernie rozmieszczonych w 4 skupieniach, z przewagą występowania w skupieniu nr 4 – 28, a następnie nr 2 – 25 opadów. Pozostałe opady frontalne (17), tj. o czasie trwania $T \in (180; 720]$ min, występują głównie w skupieniu nr 1 (10). Opady niżowe, tj. o czasach trwania $T > 720$ min, tj. 25 opadów (20% całej populacji), występują głównie w skupieniach nr 1 i nr 3 (16 + 6 = 21 opadów).

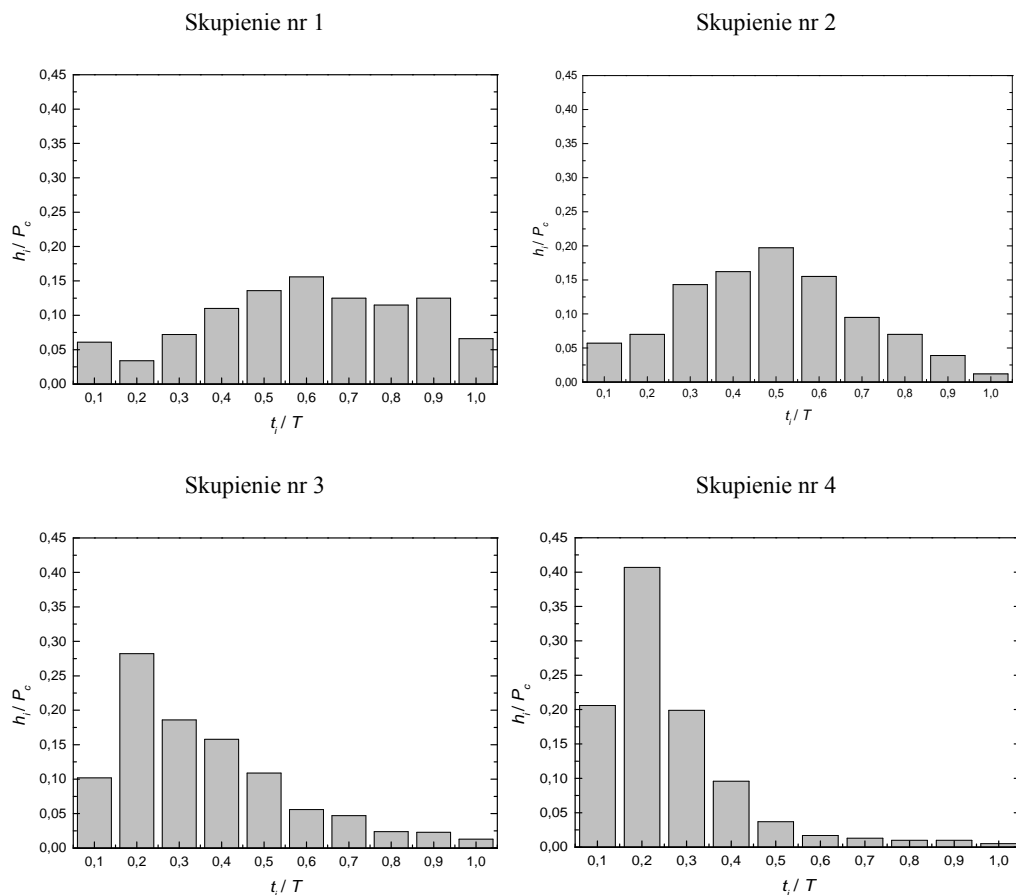
5.2.3. Analiza skupień metodą k -średnich

Wyniki aglomeracji opadów metodą Warda wskazały na istnienie 4 skupień opadów o zbliżonych przebiegach krzywych sumowych. Umożliwia to zastosowanie



Rys. 5.7. Krzywe sumowe opadów z medianą w 4 skupieniach wydzielonych metodą k -średnich dla Wrocławia

dokładniejszej metody grupowania opadów, a mianowicie metody k -średnich dla liczby skupień $k = 4$. Na rysunku 5.7 zilustrowano krzywe sumowe opadów w 4 skupieniach wydzielonych metodą k -średnich z naniesionymi krzywymi median.



Rys. 5.8. Bezwymiarowe hietogramy słupkowe z median w 4 skupieniach wydzielonych metodą k -średnich dla Wrocławia

W wyniku grupowania opadów metodą k -średnich uzyskano bardziej wyraziste skupienia, w porównaniu do wyników grupowania metodą Warda (por. rys. 5.7 z rys. 5.5). Większość krzywych sumowych jest położona bliżej odpowiednich median. Bezwymiarowe hietogramy słupkowe z median zobrazowano natomiast na rysunku 5.8. Najbardziej liczny skupieniem jest skupienie nr 2 obejmujące 37 opadów (30% analizowanej „populacji”). Rozkład masy na hietogramach należących do tego skupienia zbliżony jest do wzorca DVWK. Drugie pod względem liczebności jest skupienie nr 3 obejmujące 35 opadów (28% „populacji”). Opady należące do skupienia nr 1, w liczbie 27 (21% „popula-

cji”), mają piki przyrostu intensywności zdecydowanie przesunięte do drugiej połowy czasów trwania. Opady należące do skupienia nr 4 o liczbie 27 (21% „populacji”), mają piki przyrostu intensywności zlokalizowane w pierwszej 1/5 części czasu trwania (rys. 5.7). Skupienia nr 3 i 4 cechują się największymi przyrostami względnej, przedziałowej wysokości w 1/3 czasu trwania opadów, co upodabnia je do opadu modelowego Eulera.

Dzięki tej metodzie uzyskano bardziej wyraziste piki względnych, przedziałowych przyrostów wysokości opadów w skupieniach nr 3 i 4 – o względnym położeniu $r = t_i/T \approx 0,2$. Natomiast w skupieniu nr 1 uzyskano w miarę wyrównany przebieg względnych wysokości opadów względem średniego: $h_i/P_c = 0,10$. Metoda k -średnich daje więc jakościowo lepsze wyniki grupowania opadów w porównaniu z metodą Warda – podobnie jak i w przypadku analizy opadów z Jeleniej Góry.

Tabela 5.7. Liczebność opadów w 4 skupieniach wydzielonych metodą k -średnich dla Wrocławia

Klasa przewyższeń	Liczba opadów w skupieniach								Razem
	Skupienie nr 1		Skupienie nr 2		Skupienie nr 3		Skupienie nr 4		
$C \in [1; 2)$ lata	$t \leq 120$ min	2	$t \leq 120$ min	9	$t \leq 120$ min	14	$t \leq 120$ min	6	31 K
	$t \in (120; 720]$ min	2	$t \in (120; 720]$ min	2	$t \in (120; 720]$ min	1	$t \in (120; 720]$ min	4	9 F
	$t > 720$ min	11	$t > 720$ min	5	$t > 720$ min	0	$t > 720$ min	0	16 N
	razem	15	razem	16	razem	15	razem	10	56
$C \in [2; 5)$ lat	$t \leq 120$ min	0	$t \leq 120$ min	10	$t \leq 120$ min	6	$t \leq 120$ min	5	21 K
	$t \in (120; 720]$ min	4	$t \in (120; 720]$ min	6	$t \in (120; 720]$ min	2	$t \in (120; 720]$ min	0	12 F
	$t > 720$ min	2	$t > 720$ min	0	$t > 720$ min	1	$t > 720$ min	1	4 N
	razem	6	razem	16	razem	9	razem	6	37
$C \in [5; 10)$ lat	$t \leq 120$ min	0	$t \leq 120$ min	2	$t \leq 120$ min	4	$t \leq 120$ min	5	11 K
	$t \in (120; 720]$ min	3	$t \in (120; 720]$ min	0	$t \in (120; 720]$ min	0	$t \in (120; 720]$ min	0	3 F
	$t > 720$ min	0	$t > 720$ min	0	$t > 720$ min	3	$t > 720$ min	1	4 N
	razem	3	razem	2	razem	7	razem	6	18
$C \geq 10$ lat	$t \leq 120$ min	2	$t \leq 120$ min	2	$t \leq 120$ min	3	$t \leq 120$ min	5	12 K
	$t \in (120; 720]$ min	1	$t \in (120; 720]$ min	1	$t \in (120; 720]$ min	0	$t \in (120; 720]$ min	0	2 F
	$t > 720$ min	0	$t > 720$ min	0	$t > 720$ min	1	$t > 720$ min	0	1 N
	razem	3	razem	3	razem	4	razem	5	15
Razem	27 (21%)		37(30%)		35 (28%)		27 (21%)		126 (100%)
Łącznie	126 (100%)								

W każdym ze skupień utworzonych metodą k -średnich przeanalizowano liczebność opadów w poszczególnych grupach czasów trwania z uwzględnieniem klas częstości przewyższeń (tab. 5.7). Pod tym względem dla analizowanych skupień brak jest

wyraźnych zależności, co jedynie podkreśla losowość badanych zjawisk opadowych we Wrocławiu, podobnie jak i w Jeleniej Górze.

W każdym skupieniu zbadano dodatkowo liczebność opadów w poszczególnych podgrupach czasu trwania opadów, a wyniki zamieszczono w tabeli 5.8.

Tabela 5.8. Liczebność opadów w podgrupach czasu trwania w skupieniach wydzielonych metodą k -średnich dla Wrocławia

Lp.	Rodzaj opadu	Podgrupa czasu trwania opadu T	Numer skupienia				Razem
			1	2	3	4	
1	K	≤ 60 min	3	20	22	15	75 (59%)
2		(60; 120] min	1	3	5	6	
3	F	(120; 180] min	3	3	0	3	26 (21%)
4		(180; 360] min	0	2	0	1	
5		(360; 720] min	7	4	3	0	
6	N	(720; 1440] min	10	3	0	0	25 (20%)
7		> 1440 min	3	2	5	2	
Razem			27 (21%)	37 (30%)	35 (28%)	27 (21%)	126 (100%)

Z danych przedstawionych w tabeli 5.8 wynika, że we Wrocławiu opady o czasie trwania do 180 min (tj. konwekcyjne (K) oraz frontalne (F) – z ich pierwszej podgrupy czasu trwania: $T \in (120; 180]$ min) – łącznie 84, wykazują tendencję do najczęstszego powiązania ze skupieniami nr 2, 3 i 4 (77 opadów). Pozostałe opady frontalne (o czasie $T \in (180; 720]$ min), tj. 17 występuje przeważnie w 2 skupieniach: nr 1 i 2 (odpowiednio $7 + 6 = 13$ F). Opady niżowe – łącznie 25 występują głównie w skupieniu nr 1 (13 opadów), a następnie w skupieniu nr 2 (5 opadów) oraz nr 3 (5 opadów).

Ze względu na podobieństwo kształtu hietogramów, zauważa się więc przesunięcie granicy konwekcyjnego i frontального charakteru opadów we Wrocławiu – ze 120 min do 180 min (ściślej do ok. 150 min). Wykazano to też uprzednio – w metodach grupowań Huffa i Warda. W szczególności, z grupowania Huffa wynika, że opady o czasie trwania do 180 min wykazują tendencję do najczęstszego powiązania z rozkładem według I i II kwartyła. Podobne było w przypadku opadów z Jeleniej Góry.

5.2.4. Wybór opadów do weryfikacji hietogramów wzorcowych

Odnośnie do wzorca Eulera typu II, wyniki grupowania 126 opadów pochodzących z Wrocławia za pomocą analizy skupień wg metody k -średnich pokazują, że prawie połowa – 62 opady (49% „populacji”) ma pik skumulowanej wysokości zlokalizowany w 1/3 początkowego czasu trwania – w skupieniach nr 3 i 4, w którym to czasie deponowana jest większość całkowitej masy opadu. W obu tych skupieniach wartość względnego położenia piku wynosi $r \approx 0,2$. Do skupień nr 3 i 4 należy większość – 48 (z 75) opadów konwekcyjnych (K) oraz 3 opady frontalne (F) – z pograni-

cza K i F, tj. o $T \leq 180$ min (tab. 5.8), ściślej o $T < 150$ min. Wskazanych fizykalnie 51 opadów o charakterze konwekcyjnym, z których 41 pochodzi z I grupy kwartylniej Huffa, a 10 z II grupy, poddanych zostanie szczegółowej analizie ilościowej podobieństwa kształtów hietogramów (bezwymiarowych i wymiarowych) do wzorca Eulera typu II. W załączniku nr 4 zestawiono hietogramy bezwymiarowe, a w załączniku nr 5 hietogramy wymiarowe analizowanych 51 opadów (48 K i 3 F o $T < 150$ min) pochodzących ze stacji IMGW-PIB Wrocław i sieci deszczomierzy MPWiK we Wrocławiu. Zróżnicowane kształty zestawionych hietogramów świadczą o losowości badanego zjawiska.

Odnosnie do wzorca DVWK wyniki grupowania jakościowego opadów metodami Huffa i Warda, a zwłaszcza metodą k -średnich, wskazały, że do weryfikacji tego bezwymiarowego wzorca wykorzystane mogą być opady o dłuższych czasach trwania, tj. frontalne (F) o $T \in (150; 720]$ oraz niżowe (N) o $T > 720$ min. Wyniki grupowania opadów wg metody k -średnich wskazały fizykalnie na skupienie nr 2 jako najbardziej zbliżone kształtem do bezwymiarowego wzorca DVWK, w którym przez pierwsze 30% czasu trwania opadu występuje 20% jego wysokości całkowitej, w połowie czasu trwania pojawia się 70% wysokości, a pozostałe 30% całkowitej wysokości występuje w drugiej połowie czasu trwania (50% T). Występuje tutaj 14 opadów nadających się do weryfikacji wzorca DVWK, a zwłaszcza 3 opady frontalne o $T \in (150; 180]$ min i 6 opadów frontalnych o $T > 180$ min oraz 5 opadów niżowych. Wskazane fizykalnie opady pochodzą w szczególności: 9 – z I pierwszej grupy kwartylniej Huffa, 4 – z II oraz 1 – z III grupy. Uzasadnienie znajduje więc genetyczne grupowanie opadów na potrzeby analiz ich wzorców. Wybrane opady zostaną poddane szczegółowej analizie ilościowej podobieństwa kształtów hietogramów bezwymiarowych do wzorca DVWK. W załączniku 6 zamieszczono hietogramy bezwymiarowe 14 opadów: 9 F o $T > 150$ min i 5 N pochodzących z Wrocławia.

5.3. Analiza ilościowa kształtów hietogramów wzorcowych

5.3.1. Weryfikacja wzorca Eulera typu II w układzie bezwymiarowym

Do szczegółowej analizy ilościowej podobieństwa kształtów hietogramów rzeczywistych deszczów z Wrocławia do wzorca Eulera typu II wykorzystano 51 opadów: 48 konwekcyjnych i 3 frontalne (o $T < 150$ min) – ze skupień nr 3 i 4 (tab. 5.9).

W tabeli 5.9 zestawiono parametry i wskaźniki do analiz statystycznych podobieństwa kształtu bezwymiarowych hietogramów badanych opadów. Znajduje się tam 28 wyselekcjonowanych opadów ze skupienia nr 3 oraz 23 opady ze skupienia nr 4.

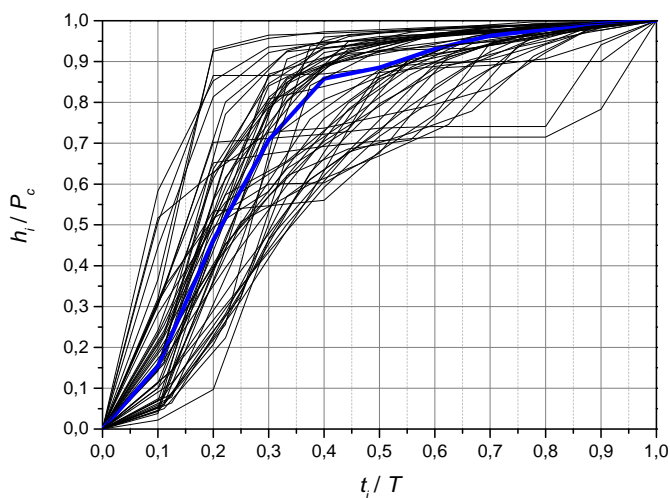
Tabela 5.9. Parametry opadów i wskaźniki podobieństwa 51 bezwymiarowych hietogramów (48 opadów konwekcyjnych i 3 frontalnych o $T < 150$ min) ze skupień nr 3 i 4 dla Wrocławia

Nr	P_c	T	C	I_{max}	I_{sr}	q_{max}	q_{sr}	r	r_{sc}	m_{33}	n_l	Nr skupienia/ Kwartył
	mm	min	lata	mm/min		dm ³ /(s·ha)		–	–	–	–	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	14,0	15	2,0	2,40	0,93	400,08	155,03	0,25	0,32	0,511	2,58	3/II
2	12,9	18	1,3	1,45	0,72	241,72	120,02	0,17	0,28	0,589	2,01	3/I
3	12,0	19	1,0	1,00	0,63	166,70	105,02	0,26	0,36	0,481	1,59	3/II
4	13,3	23	1,2	1,60	0,58	266,72	96,69	0,20	0,26	0,659	2,76	3/I
5	13,0	24	1,0	1,27	0,54	211,71	90,02	0,19	0,25	0,566	2,35	3/I
6	12,9	24	1,0	2,07	0,54	345,07	90,02	0,31	0,26	0,737	3,83	3/II
7	14,7	24	1,6	1,20	0,61	200,04	101,69	0,19	0,25	0,525	1,97	3/I
8	17,2	24	2,6	1,67	0,72	278,39	120,02	0,31	0,32	0,516	2,32	3/II
9	14,9	25	1,6	1,43	0,60	238,38	100,02	0,30	0,33	0,529	2,38	3/I
10	13,7	27	1,1	1,13	0,51	188,37	85,02	0,17	0,25	0,597	2,22	3/I
11	23,8	27	7,3	3,90	0,88	650,13	146,70	0,17	0,18	0,819	4,43	4/I
12	25,5	27	9,5	3,73	0,94	621,79	156,70	0,17	0,19	0,791	3,97	4/I
13	29,2	28	16	4,77	1,04	795,16	173,37	0,16	0,18	0,872	4,59	4/I
14	23,1	29	6,1	3,43	0,80	571,78	133,36	0,05	0,12	0,93	4,29	4/I
15	16,1	30	1,7	1,83	0,54	305,06	90,02	0,15	0,22	0,738	3,39	3/I
16	25,8	30	8,9	1,80	0,86	300,06	143,36	0,15	0,26	0,611	2,09	3/I
17	26,9	30	10	3,33	0,90	555,11	150,03	0,15	0,17	0,883	3,70	4/I
18	15,1	31	1,3	1,95	0,49	325,07	81,68	0,32	0,30	0,629	3,98	3/II
19	16,2	32	1,7	1,18	0,51	196,71	85,02	0,44	0,34	0,483	2,31	3/II
20	14,4	35	1,0	1,25	0,41	208,38	68,35	0,06	0,20	0,652	3,05	3/I
21	20,7	36	3,4	1,10	0,58	183,37	96,69	0,17	0,33	0,49	1,90	3/II
22	31,6	36	17	3,65	0,88	608,46	146,70	0,17	0,15	0,901	4,15	4/I
23	33,7	37	23	2,68	0,91	446,76	151,70	0,27	0,21	0,86	2,95	4/I
24	40,7	39	>50	4,08	1,04	680,14	173,37	0,15	0,19	0,823	3,92	4/I
25	26,6	42	7,1	1,78	0,63	296,73	105,02	0,18	0,21	0,808	2,83	4/I
26	20,9	45	2,8	1,34	0,46	223,38	76,68	0,17	0,20	0,662	2,91	3/I
27	24,4	45	4,8	1,54	0,54	256,72	90,02	0,17	0,20	0,78	2,85	4/I
28	20,4	49	2,4	2,38	0,42	396,75	70,01	0,05	0,09	0,939	5,67	4/I
29	15,9	50	1,0	1,32	0,32	220,04	53,34	0,15	0,21	0,818	4,13	4/I
30	27,1	50	6,4	1,88	0,54	313,40	90,02	0,25	0,23	0,778	3,48	3/I
31	19,9	52	2,1	1,97	0,38	328,40	63,35	0,29	0,28	0,742	5,18	3/II
32	16,4	54	1,1	1,32	0,30	220,04	50,01	0,17	0,19	0,828	4,40	4/I
33	17,9	54	1,4	1,18	0,33	196,71	55,01	0,28	0,30	0,57	3,58	3/II
34	18,0	54	1,4	1,40	0,33	233,38	55,01	0,17	0,24	0,819	4,24	4/I
35	24,3	54	4,0	1,58	0,45	263,39	75,02	0,17	0,23	0,756	3,51	3/I
36	21,8	56	2,6	1,43	0,39	238,38	65,01	0,16	0,23	0,845	3,67	4/I
37	32,0	59	10	1,97	0,54	328,40	90,02	0,25	0,32	0,53	3,65	3/II
38	17,5	63	1,1	1,36	0,28	226,71	46,68	0,17	0,17	0,901	4,86	4/I
39	30,0	68	6,9	1,47	0,44	245,05	73,35	0,26	0,22	0,834	3,34	4/I
40	37,6	71	17	1,38	0,53	230,05	88,35	0,17	0,25	0,617	2,60	3/I

cd. tabeli 5.9

41	30,9	85	6,1	1,07	0,36	178,37	60,01	0,05	0,19	0,551	2,97	3/1
42	18,6	90	1,0	1,16	0,21	193,37	35,01	0,15	0,12	0,962	5,52	4/1
43	26,1	109	2,6	1,20	0,24	200,04	40,01	0,05	0,10	0,867	5,00	4/1
44	26,7	109	2,8	1,17	0,24	195,04	40,01	0,15	0,18	0,818	4,88	4/1
45	37,0	110	9,5	1,58	0,34	263,39	56,68	0,15	0,20	0,601	4,65	3/1
46	20,5	114	1,1	0,88	0,18	146,70	30,01	0,05	0,10	0,73	4,89	4/1
47	38,0	116	10	0,89	0,33	148,36	55,01	0,05	0,21	0,636	2,70	3/1
48	22,1	118	1,4	0,63	0,19	105,02	31,67	0,15	0,15	0,679	3,32	3/1
49	20,5	124	1,0	0,63	0,17	105,02	28,34	0,16	0,15	0,715	3,71	4/1
50	22,2	134	1,3	0,66	0,17	110,02	28,34	0,26	0,22	0,881	3,88	3/1
51	22,8	139	1,3	0,99	0,16	165,03	26,67	0,15	0,13	0,966	6,19	4/1
Średnia				1,77	0,52	294,37	87,04	0,18	0,22	0,72	3,56	–
Mediana				1,43	0,51	238,38	85,02	0,17	0,21	0,738	3,58	–

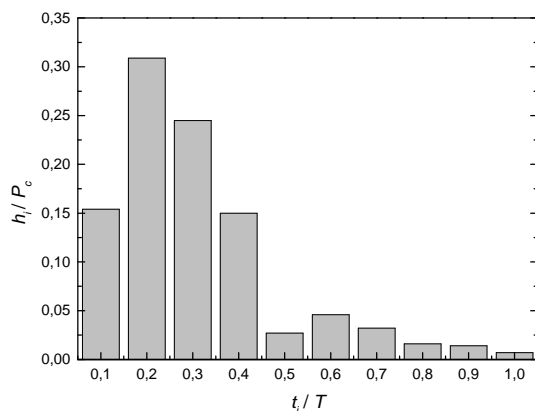
Uwzględniając grupowanie opadów wg Huffa: z I kwartyla pochodzi 41 opadów, a z II kwartyla 10. Na rysunku 5.9 przedstawiono krzywe sumowe analizowanych opadów z obliczoną krzywą mediany, z której wynika, że w 1/3 początkowego czasu ich trwania masa opadów sięga ok. 75%.



Rys. 5.9. Krzywe sumowe wraz z medianą dla 48 opadów konwekcyjnych (K) i 3 frontalnych (F o $T < 150$ min) ze skupień nr 3 i 4 dla Wrocławia

Dla bezwymiarowej mediany z rysunku 5.9 opracowano zbiorczy bezwymiarowy hietogram dla 48 opadów konwekcyjnych i 3 opadów frontalnych, przedstawiony na rysunku 5.10, z którego wynika, że główna masa skumulowanego opadu (ok. 3/4) znajduje się w 1/3 początkowego czasu ich trwania, a położenie piku przedziałowej wysokości ma wartość $r = 0,2$. Natomiast wartość liczbową piku przedziałowej (0,1T) względnej wysokości $h_i/P_c = 0,31$ jest ponad 3-krotnie większa względem średniej:

$h_i/P_c = 0,10$. Należy jednak zauważyć, że wzorzec Eulera jest wymiarowy, w którym przedziały czasu mają stałą wartość $\Delta t = 5$ min, a ich liczba jest zmienna, zależna od T . Wykres z mediany na rys. 5.10 nie jest więc rzeczywistym obrazem przedziałowych wysokości, lecz jedynie trendem uśrednianych wartości $h_i(\Delta t = 0,1T)$.



Rys. 5.10. Bezwymiarowy hietogram słupkowy z mediany dla 48 opadów konwekcyjnych i 3 frontalnych (o $T < 150$ min) ze skupień nr 3 i 4 dla Wrocławia

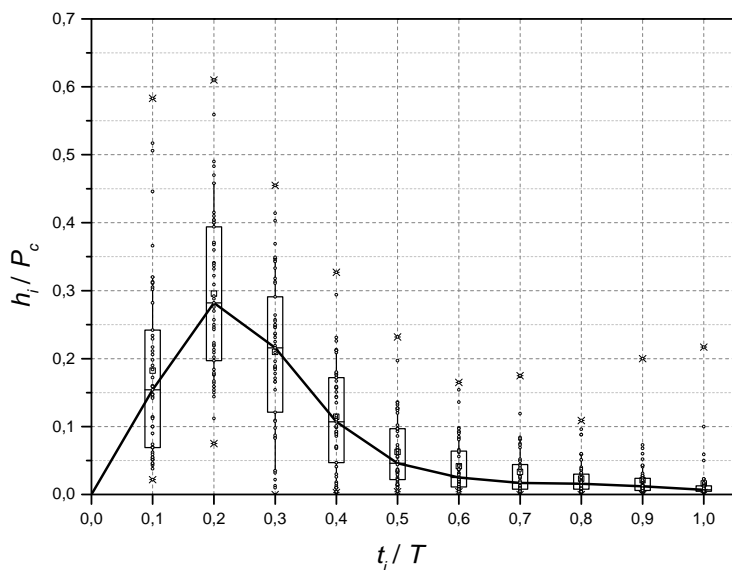
Analizowane, bezwymiarowe hietogramy dla dyskretyzacji kroku czasowego $\Delta t = 0,1T$ mogą być scharakteryzowane przez dwa wskaźniki geometryczne: r i r_{sc} , wskaźnik masy: m_{33} oraz wskaźnik nierównomierności w czasie: n_t – wg metodyki badań opisaney w rozdziale 3.2.4. Zestawione w tabeli 5.9 wartości liczbowe wskaźników do analiz statystycznych podobieństwa kształtu bezwymiarowych hietogramów dotyczą 51 wybranych fizykalnie opadów (48 K i 3 F o $T < 150$ min), o zakresie częstotliwości przewyższeń $C \in [1; >50]$ lat. Obliczone, charakterystyczne wartości wskaźników wynoszą:

- $r \in [0,05; 0,44]$; wartość średnia: 0,18; mediana: 0,17;
- $r_{sc} \in [0,09; 0,36]$; wartość średnia: 0,22; mediana: 0,21;
- $m_{33} \in [0,48; 0,97]$; wartość średnia: 0,72; mediana: 0,738;
- $n_t \in [1,59; 6,19]$; wartość średnia: 3,56; mediana: 3,58.

Położenie przedziałów $\Delta t = 0,1T$ z odcięcią piku (t_{pik}) maksymalnej wysokości $h_{max}(\Delta t)$ nie przekracza wartości $r = 0,44$, a położenie przedziałów $\Delta t = 0,1T$ z odcięcią środka ciężkości (t_{sc}) hietogramu ($P_c/2$) nie przekracza wartości $r_{sc} = 0,36$. Interesujące w interpretacji są wartości wskaźnika m_{33} – jako stosunku skumulowanej wysokości (masy) opadu na 1/3 początkowego czasu do wysokości (masy) całkowitej. Wartości tego wskaźnika zmieniają się w zakresie od 0,48 do nawet 0,97, gdzie tylko 3% masy występuje na pozostałych 2/3 czasu T . Podobnie charakterystyczne są wartości wskaźnika n_t – jako stosunku maksymalnych wartości przedziałowych intensywności (liczone z $h_{max}(\Delta t = 0,1T)$) do wartości średnich z całego okresu trwania opadów. Wynoszą

one: od $n_I = 1,59$ – mała nierównomierność opadu – maksymalne wartości przedziałowe są ok. 1,6 raza większe od średniej, do nawet $n_I = 6,19$ – duża nierównomierność opadu – maksymalne wartości przedziałowe są przeszło sześciokrotnie większe od średniej. Podobne rezultaty badań ilościowych osiągnięto w analizie opadów z Jeleniej Góry.

Na rysunku 5.11 dla badanych 51 opadów sporządzono bezwymiarowy hietogram obrazujący krzywą 50% percentyli (median), na którym zakresy zmian zmierzonych wartości względnych przedziałowych wysokości opadów zobrazowano za pomocą tzw. wykresów pudełkowych (wg metodyki badań z podrozdz. 3.2.4). Wąsy ograniczono do 10% i 90% percentyla zbioru danych jako przedziałów ufności – odpowiednio na poziomach 10% i 90%.



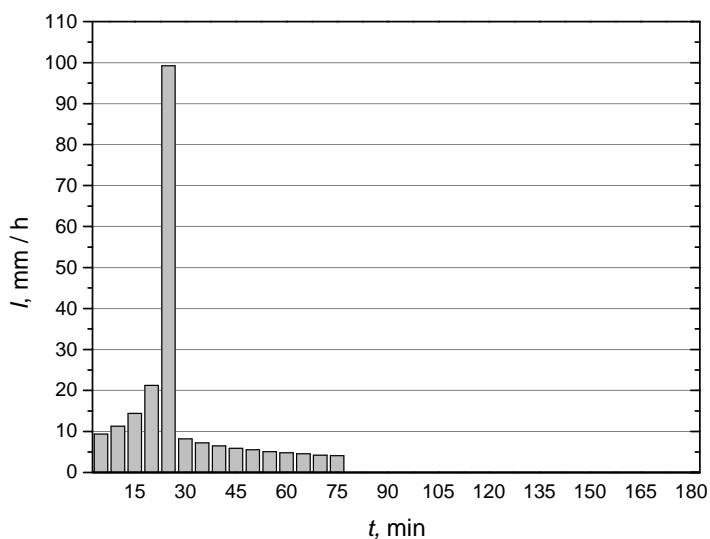
Rys. 5.11. Bezwymiarowy hietogram przedziałowych przyrostów wysokości 51 opadów wraz z wykresami pudełkowymi wyników pomiarów dla Wrocławia

Należy jednak zaznaczyć, że dyskretne wartości median na rysunku 5.11 wyznaczono dla przedziałowych przyrostów wysokości opadów. Prowadzi to do pewnych różnic wartości pików względnych przedziałowych wysokości. Wartość pików h_i/P_c wg hietogramu słupkowego (rys. 5.10) wynosi ok. 0,32, a wg przedziałowych przyrostów ok. 0,28 (rys. 5.11). Nie ma natomiast różnic w samym położeniu pików $r = 0,2t_i/T$, tj. w 1/5 czasu trwania opadów (identycznie jak w przypadku opadów z Jeleniej Góry). Należy też pamiętać, że model Eulera typu II jest hietogramem wymiarowym bazującym na (wymiarowych) krzywych IDF/DDF, toteż jego bezwymiarowe postacie (wg rys. 5.9–5.11) mogą służyć jedynie do ustalenia położenia pików

maksymalnej wysokości – intensywności opadu, a ściślej przedziału zawierającego pik – z dokładnością $1/10 T$.

5.3.2. Weryfikacja wzorca Eulera typu II w układzie wymiarowym

Jak wcześniej wykazano, cechy rozkładów masy na bezwymiarowych hietogramach 51 badanych opadów ze stacji IMGW-PIB i MPWiK we Wrocławiu są zbliżone do wzorca Eulera typu II. Spostrzeżenie to wymaga jednak potwierdzenia w szczegółowej ocenie ilościowej podobieństwa kształtów hietogramów wymiarowych tych opadów. Do analiz porównawczych niezbędne było opracowanie wzorcowych opadów Eulera typu II – z krzywych DDF/IDF dla Wrocławia. Do utworzenia krzywych typu DDF wykorzystano aktualny model maksymalnych wysokości opadów dla Wrocławia (3.2). Ponieważ granica podziału opadów konwekcyjnych (K) i frontalnych (F) jest przesunięta we Wrocławiu ze 120 min na ok. 150 min, z modelu (3.2) obliczono wysokości opadów dla $t \in \{5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 60, 75, 90, 120, 150\}$ min i $C \in \{1, 2, 5, 10\}$ lat. Na tej podstawie utworzono 28 modeli Eulera dla Wrocławia – dla 7 czasów trwania: $T \in \{30, 45, 60, 75, 90, 120, 150\}$ min i 4 klas częstości występowania: $C \in \{1, 2, 5, 10\}$ lat. Opracowane opady modelowe Eulera typu II dla Wrocławia charakteryzują się takimi samymi maksymalnymi intensywnościami w interwałach $\Delta t = 5$ min – dla danej częstości przewyższeń (C), występującymi na końcu pierwszej 1/3 części czasu ich trwania (rys. 5.12).



Rys. 5.12. Przykładowy wzorzec Eulera typu II dla $T = 75$ min i $C = 1$ rok dla Wrocławia

Zobrazowany dla przykładu na rysunku 5.12 wzorzec opadów Eulera typu II – dla $T = 75$ min i $C = 1$ rok ($P_c = 17,6$ mm), ma pik maksymalnej intensywności przedziałowej o wartości 99 mm/h dla $\Delta t = 5$ min (w przypadku Jeleniej Góry pik ten był na poziomie 80 mm/h – por. z rys. 4.12).

W utworzonych 28 wzorcach Eulera typu II dla Wrocławia zbadano rozkłady masy wg wskaźnika m_{33} – jako stosunku skumulowanej wysokości opadu dla czasu od $t = 0$ do $t = 0,33T$, do wysokości całkowitej w czasie $t = T$. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 5.10. W opracowanych wzorcach rozkłady masy wg m_{33} są niemal identyczne – niezależne od T i C . Średnia wartość wskaźnika m_{33} wynosi 0,741 (w przypadku Jeleniej Góry było to 0,714).

Tabela 5.10. Stosunki skumulowanych wysokości opadów wg wskaźnika m_{33} we wzorcach Eulera typu II dla Wrocławia

Częstość opadu	Czas trwania opadu T , min							Średnia
	30	45	60	75	90	120	150	
$C = 1$ rok	0,736	0,736	0,736	0,736	0,736	0,736	0,736	0,736
$C = 2$ lata	0,738	0,737	0,737	0,737	0,737	0,737	0,737	0,737
$C = 5$ lat	0,741	0,742	0,742	0,741	0,741	0,742	0,742	0,742
$C = 10$ lat	0,749	0,748	0,749	0,749	0,749	0,749	0,748	0,749
Średnia	0,741	0,741	0,741	0,741	0,741	0,741	0,741	0,741

Analizie poddano również zróżnicowanie nierównomierności w czasie intensywności we wzorcach Eulera wg wskaźnika n_I . Wyniki obliczeń podano w tabeli 5.11.

Tabela 5.11. Stosunki maksymalnych przedziałowych ($\Delta t = 5$ min) intensywności opadów (w mm/min) do ich średnich wartości w czasie T we wzorcach Eulera typu II dla Wrocławia

Częstość opadu	Czas trwania opadu T , min							Średnia
	30	45	60	75	90	120	150	
$C = 1$ rok	3,64	4,88	5,99	7,04	8,03	9,90	11,57	7,29
$C = 2$ lata	3,65	4,89	6,02	7,06	8,06	9,94	11,64	7,32
$C = 5$ lat	3,68	4,95	6,09	7,17	8,20	10,10	11,87	7,44
$C = 10$ lat	3,74	5,05	6,23	7,35	8,42	10,39	12,24	7,63
Średnia	3,68	4,94	6,08	7,16	8,18	10,08	11,83	7,42

W opracowanych wzorcach Eulera typu II dla Wrocławia nierównomierność intensywności wg wskaźnika n_I zmienia się: od 3,64 do 12,24 – zależnie od czasów trwania opadów ($T = 30$ –150 min), lecz jest niezależna od częstości ich występowania (C). Średnia wartość wskaźnika $n_I = 7,42$ (tab. 5.11).

Ustalone dla danych z Wrocławia parametry 28 modeli opadów Eulera typu II odnośnie do rozkładu masy i nierównomierności w czasie porównano następnie z parametrami hietogramów rzeczywistych opadów zestawionych w tabeli 5.12, gdzie poda-

no wartości liczbowe wskaźników r , m_{33} i n_I obliczone dla 51 badanych opadów – w odniesieniu do rzeczywistego czasu ich trwania T (kolumny 7, 8 i 9). Wskaźniki te przeznaczone są do ocen ilościowych podobieństwa kształtu hietogramów rzeczywistych opadów do wzorca Eulera typu II. Dla zachowania poprawności porównań, tj. dla spełnienia warunku podzielności czasu trwania opadu na 3 równe części, a jednocześnie jego podzielności na przedziały – z krokiem czasowym $\Delta t = 5$ min, dokonano korekty rzeczywistego czasu trwania opadów T – do modelowego czasu ich trwania T' (wg metodyki opisanej w rozdziale 4.3.2 w analizie opadów z Jeleniej Góry). Do ocen ilościowych zastosowano ponownie wskaźniki: r , m_{33} i n_I – w odniesieniu do czasu T' (kolumny 11, 12 i 13 w tab. 5.12). Wyjściowe wartości wskaźników – w odniesieniu do rzeczywistego czasu T wynoszą:

- $r \in [0,02; 0,39]$, wartość średnia: 0,17; mediana 0,16;
- $m_{33} \in [0,43; 0,97]$, wartość średnia: 0,72; mediana 0,76;
- $n_I \in [1,36; 9,51]$, wartość średnia: 3,70; mediana 3,11.

Tabela 5.12. Parametry i wskaźniki opisu 51 rzeczywistych opadów (48 K i 3 F o $T < 150$ min) dla Wrocławia

Nr	P_c	T	C	I_{sr}	q_{sr}	r	m_{33}	n_I	T'	r'	m'_{33}	n'_I
	mm	min	lata	mm/min	dm ³ /(s·ha)	(3.5)	(3.7)	(3.10)	min	(3.5)	(3.7)	(3.10)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	14,0	15	2,0	0,933	155,5	0,17	0,53	1,59	15	0,17	0,53	1,59
2	12,9	18	1,3	0,717	119,5	0,14	0,58	1,79	30	0,08	0,90	2,98
3	12,0	19	1,0	0,632	105,4	0,39	0,43	1,36	30	0,25	0,72	2,15
4	13,3	23	1,2	0,578	96,4	0,33	0,65	2,01	30	0,25	0,82	2,62
5	13,0	24	1,0	0,542	90,4	0,10	0,55	1,96	30	0,08	0,64	2,45
6	12,9	24	1,0	0,538	89,7	0,31	0,70	3,09	30	0,25	0,95	3,86
7	14,7	24	1,6	0,613	102,2	0,31	0,51	1,79	30	0,25	0,66	2,24
8	17,2	24	2,6	0,717	119,5	0,31	0,52	2,23	30	0,25	0,70	2,79
9	14,9	25	1,6	0,596	99,4	0,30	0,44	2,11	30	0,25	0,61	2,54
10	13,7	27	1,1	0,507	84,5	0,09	0,60	2,01	30	0,08	0,66	2,23
11	23,8	27	7,3	0,881	146,9	0,09	0,82	2,79	30	0,08	0,89	3,10
12	25,5	27	9,5	0,944	157,4	0,09	0,80	2,50	30	0,08	0,89	2,78
13	29,2	28	16	1,043	173,9	0,09	0,80	2,67	30	0,08	0,88	2,86
14	23,1	29	6,1	0,797	132,9	0,09	0,94	4,27	30	0,08	0,94	4,42
15	16,1	30	1,7	0,537	89,5	0,25	0,76	2,50	30	0,25	0,76	2,50
16	25,8	30	8,9	0,860	143,4	0,08	0,64	2,14	30	0,08	0,64	2,14
17	26,9	30	10	0,897	149,5	0,08	0,90	3,03	30	0,08	0,90	3,03
18	15,1	31	1,3	0,487	81,2	0,24	0,54	2,38	45	0,17	0,92	3,45
19	16,2	32	1,7	0,506	84,4	0,23	0,54	2,29	45	0,17	0,82	3,22
20	14,4	35	1,0	0,411	68,5	0,07	0,66	3,11	45	0,06	0,73	4,00
21	20,7	36	3,4	0,575	95,9	0,21	0,49	1,88	45	0,17	0,64	2,35

cd. tabeli 5.12

22	31,6	36	17	0,878	146,4	0,07	0,91	3,85	45	0,06	0,94	4,81
23	33,7	37	23	0,911	151,9	0,20	0,77	2,81	45	0,17	0,90	3,42
24	40,7	39	> 50	1,044	174,0	0,19	0,80	3,37	45	0,17	0,87	3,89
25	26,6	42	7,1	0,633	105,5	0,18	0,80	2,81	45	0,17	0,86	3,01
26	20,9	45	2,8	0,464	77,3	0,17	0,66	2,89	45	0,17	0,66	2,89
27	24,4	45	4,8	0,542	90,4	0,17	0,82	2,84	45	0,17	0,82	2,84
28	20,4	49	2,4	0,416	69,3	0,05	0,94	5,72	60	0,04	0,95	7,00
29	15,9	50	1,0	0,318	53,0	0,25	0,79	5,91	60	0,21	0,89	4,16
30	27,1	50	6,4	0,542	90,4	0,15	0,83	2,44	60	0,13	0,89	4,98
31	19,9	52	2,1	0,383	63,8	0,24	0,76	5,01	60	0,21	0,91	5,78
32	16,4	54	1,1	0,304	50,7	0,23	0,58	3,68	60	0,21	0,66	3,76
33	17,9	54	1,4	0,331	55,2	0,14	0,77	4,71	60	0,13	0,86	3,85
34	18,0	54	1,4	0,333	55,5	0,14	0,85	3,30	60	0,13	0,89	4,03
35	24,3	54	4,0	0,450	75,0	0,23	0,86	4,62	60	0,21	0,93	6,93
36	21,8	56	2,6	0,389	64,8	0,22	0,79	3,55	60	0,21	0,87	3,80
37	32,0	59	10	0,542	90,4	0,30	0,51	4,35	60	0,29	0,59	4,43
38	17,5	63	1,1	0,278	46,3	0,12	0,93	4,24	75	0,10	0,96	5,06
39	30,0	68	6,9	0,441	73,5	0,18	0,81	4,35	75	0,17	0,91	4,80
40	37,6	71	17	0,530	88,4	0,25	0,62	2,64	75	0,23	0,65	2,79
41	30,9	85	6,1	0,364	60,7	0,09	0,55	3,96	75	0,10	0,55	3,50
42	18,6	90	1,0	0,207	34,5	0,08	0,96	7,05	90	0,08	0,96	7,05
43	26,1	109	2,6	0,239	39,8	0,11	0,87	7,95	90	0,14	0,87	6,55
44	26,7	109	2,8	0,245	40,8	0,16	0,82	4,98	120	0,15	0,84	5,47
45	37,0	110	9,5	0,336	56,0	0,16	0,60	6,19	120	0,15	0,61	6,75
46	20,5	114	1,1	0,180	30,0	0,02	0,74	5,11	120	0,02	0,74	5,38
47	38,0	116	10	0,328	54,7	0,06	0,60	4,02	120	0,06	0,60	4,16
48	22,1	118	1,4	0,187	31,2	0,06	0,68	5,03	120	0,06	0,68	5,11
49	20,5	124	1,0	0,165	27,5	0,10	0,71	6,67	135	0,09	0,72	7,24
50	22,2	134	1,3	0,166	27,7	0,24	0,89	5,42	135	0,24	0,89	5,49
51	22,8	139	1,3	0,164	27,3	0,13	0,97	9,51	150	0,12	0,96	10,26
Średnia				0,522	87,0	0,17	0,72	3,70	–	0,15	0,80	4,09
Mediana				0,507	84,5	0,16	0,76	3,11	–	0,15	0,86	3,80

Wynikowe wartości wskaźników – w odniesieniu do modelowego czasu T' :

$r' \in [0,02; 0,29]$, wartość średnia: 0,15; mediana 0,15;

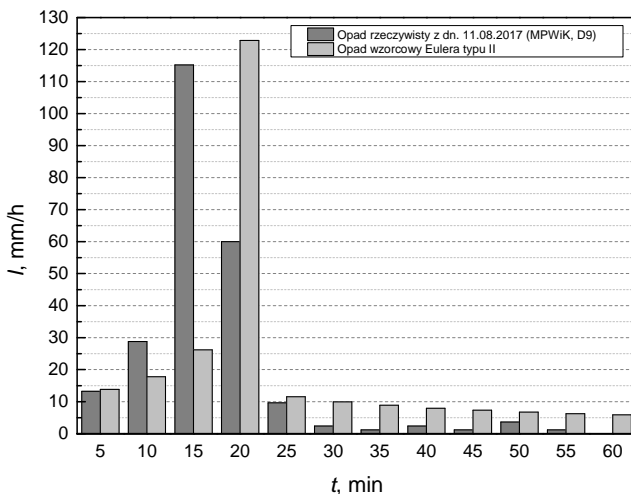
$m'_{33} \in [0,53; 0,96]$, wartość średnia: 0,80; mediana 0,86;

$n'_i \in [1,59; 10,26]$, wartość średnia: 4,09; mediana 3,80.

Zestawione wartości zmodyfikowanych wskaźników dla czasu T' różnią się maksymalnie do $\pm 12\%$ z rezultatami – dla czasu T , umożliwiają jednak wyciągnięcie poprawnych metodycznie wniosków, dotyczących porównań hietogramów opadów z Wrocławia z wzorcami Eulera typu II. W szczególności: wartości wskaźnika r położenia piku maksymalnej wysokości $h_{\max}(\Delta t)$ względem czasu T' na 51 hietogramach rzeczywistych opadów obejmują swoim zakresem: $r' \in [0,02; 0,29]$, z wartością średnią i me-

dianą $r' = 0,15$. Wartość tego wskaźnika we wzorcach Eulera typu II zmieniają się w zakresie: $r \in [0,25; 0,32]$, średnio $r = 0,285$ – dla zakresu $T = T' \in [30; 150]$ min. Oba piki różnią się przedziałowym położeniem, lecz występują w pierwszej 1/3 części czasu trwania opadów $T = T'$ (jak w modelu Eulera typu II). Rozkłady masy na 51 hietogramach wymiarowych są zmienne w granicach $m'_{33} \in [0,53; 0,96]$, jednakże wartość średnia $m'_{33} = 0,80$ (mediana 0,86) jest wyższa od stałej wartości $m_{33} = 0,741$ – dla 28 modeli Eulera typu II. W obu przypadkach główna masa opadu zlokalizowana jest jednak w pierwszej 1/3 części czasu trwania $T = T'$. Nierównomierność opadów w czasie na 51 hietogramach była znaczna: $n'_i \in [1,59; 10,26]$, średnio $n'_i = 4,09$ (mediana 3,80); W opadach wzorcowych Eulera typu II nierównomierność jest na podobnym poziomie $n_i \in [3,64; 12,24]$, średnio $n_i = 7,42$. Wartości te należy uznać za zbliżone.

Na rysunku 5.13 przedstawiono przykładowe porównanie hietogramów słupkowych: wzorca Eulera typu II dla $C = 2$ lata, $T = 60$ min i $P_c = 20,4$ mm, z opadem rzeczywistym (zarejestrowanym przez deszczomierz D9 w sieci MPWiK we Wrocławiu w dn. 11.08.2017 r.), o parametrach: $C = 2,1$ roku, $T = 52$ min i $P_c = 19,9$ mm – przekształconym na $T' = 60$ min. Na wykresach widoczna jest zgodność wartości pików przedziałowej intensywności I , a także lokalizacji głównej masy opadów – w pierwszej 1/3 części czasu ich trwania ($T = T'$). Ściślej, pik w analizowanym opadzie występuje na końcu 1/4 części czasu jego trwania.



Rys. 5.13. Zestawienie hietogramów: wzorcowego Eulera typu II o $t = 60$ min i $C = 2$ lata z opadem rzeczywistym o $T = 52$ min ($T' = 60$ min) i $C = 2,1$ lat dla Wrocławia

Podsumowując należy stwierdzić, że wzorzec Eulera typu II nadaje się w przybliżeniu do opisu opadów ze stacji nizinnych – sieci IMGW-PIB i MPWiK we Wrocławiu. Rozkłady masy na 51 hietogramach wymiarowych, z wartością średnią wg wskaźnika

$m'_{33} = 0,80$, były zbliżone do stałej wartości $m_{33} = 0,741$ – w modelach Eulera typu II. W obu przypadkach główna masa opadu występuje w pierwszej 1/3 części czasu trwania opadów. Jednakże położenie pików maksymalnej intensywności opadów (dla $\Delta t = 5$ min) znacznie się różni – dla badanych opadów występuje w 1/5 części czasu ich trwania, a w modelach Eulera typu II w 1/3. Nierównomierność opadów w czasie była natomiast podobna. Zbadane rozbieżności mieszczą się ogólnie w klasie dokładności pomiarów i obliczeń hydrologicznych, dotyczących zjawisk o charakterze losowym. Wyniki badań opadów z Wrocławia potwierdzają rezultaty badań dla opadów z Jeleniej Góry. To znaczy, że wzorzec Eulera typu II, po korekcie przedziałowego położenia pików maksymalnej intensywności z 1/3 do 1/5 czasu trwania opadów, może zostać uznany za pozytywnie zweryfikowany na opadach ze stacji nizinnych i górskiej.

5.3.3. Weryfikacja wzorca DVWK w układzie bezwymiarowym

Do ilościowej weryfikacji podobieństwa kształtów hietogramów bezwymiarowych rzeczywistych opadów z Wrocławia do wzorca DVWK wykorzystano opady frontalne oraz niżowe, wskazane fizykalnie ze skupienia nr 2, wg analizy skupień metodą k -średnich. Grupa ta wykazuje specyficzne cechy rozkładu masy wg wzorca DVWK. Szczegółowej

Tabela 5.13. Parametry opadów i wskaźniki podobieństwa 14 bezwymiarowych hietogramów (9 F i 5 N) ze skupienia nr 2 wg metody k -średnich dla Wrocławia

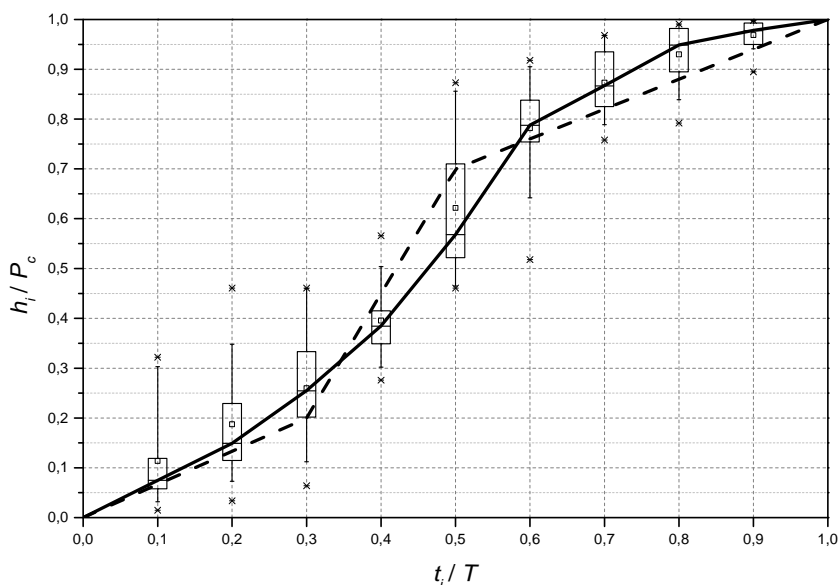
Nr	P_c	T	C	I_{sr}	q_{sr}	r (3.5)	r_{sc} (3.6)	m_{30} (3.8)	m_{50} (3.9)	n_I (3.10)	Nr skupienia /Kwartyl
	mm	min	lata	mm/min	dm ³ /(s·ha)	–	–	–	–	–	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	50,5	148	> 50	0,3412	56,9	0,46	0,45	0,12	0,69	3,40	2/I
2	22,0	160	1,0	0,1375	22,9	0,45	0,42	0,26	0,87	5,82	2/I
3	26,4	177	1,7	0,1492	24,9	0,46	0,43	0,06	0,86	3,95	2/I
4	28,2	187	2,0	0,1508	25,1	0,66	0,58	0,46	0,46	4,43	2/II
5	33,7	359	2,0	0,0939	15,7	0,55	0,39	0,46	0,53	3,70	2/II
6	44,6	562	3,5	0,0794	13,2	0,56	0,48	0,20	0,55	2,28	2/I
7	47,2	587	4,2	0,0804	13,4	0,45	0,47	0,24	0,57	2,11	2/I
8	43,8	598	3,1	0,0732	12,2	0,55	0,50	0,11	0,50	3,39	2/I
9	48,4	677	3,9	0,0715	11,9	0,45	0,42	0,25	0,79	3,72	2/I
10	39,4	763	1,7	0,0516	8,60	0,05	0,37	0,35	0,63	3,20	2/III
11	39,8	1060	1,3	0,0375	6,25	0,55	0,51	0,25	0,47	3,27	2/II
12	40,0	1166	1,2	0,0343	5,72	0,45	0,43	0,33	0,71	3,01	2/I
13	48,1	2189	1,2	0,0220	3,67	0,55	0,48	0,27	0,52	1,85	2/II
14	47,7	2472	1,1	0,0193	3,22	0,55	0,46	0,27	0,56	2,11	2/I
Średnia				0,0958	15,98	0,48	0,46	0,26	0,62	3,30	–
Mediana				0,0763	12,70	0,50	0,46	0,26	0,57	3,33	–

analizie ilościowej poddano 14 opadów: 3 F o $T > 150$ min i 6 F o $T > 180$ min oraz 5 N (opady te pochodzą w szczególności: 9 – z I kwartyła Huffa, 4 – z II oraz z 1 – z III). Na potrzeby porównań zastosowano dedykowane do tego celu 2 wskaźniki rozkładu masy (dla $\Delta t = 1/10T$): m_{30} i m_{50} , zdefiniowane w podrozdziale 3.2.4. W tabeli 5.13 zestawiono wartości liczbowe parametrów i wskaźników obliczone dla 14 badanych opadów (9 F i 5 N).

Dla analizowanych opadów, o częstościach przewyższeń $C \in [1,1; 4,2]$ lat, charakterystyczne wartości wskaźników wynoszą:

- $r \in [0,05; 0,66]$; wartość średnia: 0,48; mediana 0,50;
- $r_{sc} \in [0,37; 0,58]$; wartość średnia: 0,46; mediana 0,46;
- $m_{30} \in [0,11; 0,46]$; wartość średnia: 0,26; mediana 0,26;
- $m_{50} \in [0,46; 0,87]$; wartość średnia: 0,62; mediana 0,57;
- $n_l \in [1,85; 5,82]$; wartość średnia: 3,30; mediana 3,33.

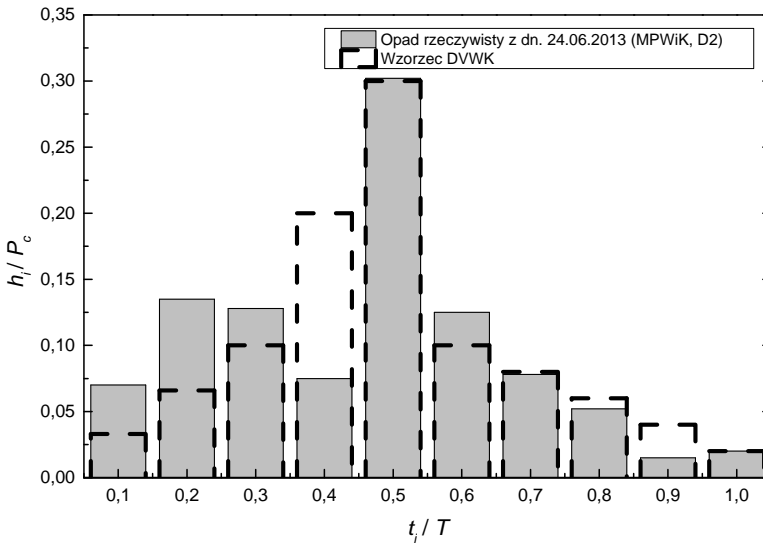
Na podstawie zmierzonych i obliczonych parametrów badanych opadów (tab. 4.13) opracowano bezwymiarową krzywą sumową – z median przedziałowych bezwymiarowych wysokości, z podaniem wyników pomiarów w tzw. pudełkach, którą przedstawiono na rysunku 5.14 wraz z naniesioną krzywą łamaną wg wzorca DVWK. Z wykresów na rysunku 5.14 wynika, że wzorcowa krzywa sumowa – wg pudełek z 50% percentylami przedstawia bezwymiarowy opad o kształcie zbliżonym do wzorca DVWK. Występują jednak istotne rozbieżności obu modeli odnośnie do głównego wskaźnika rozkładu masy – m_{50} , tj. dla $t_i/T = 0,50$ – wartość średnia $h_i/P_c = 0,62$ (mediana 0,57) – dla badanych opadów wobec stałej wartości $h_i/P_c = 0,70$ – dla wzorca



Rys. 5.14. Bezwymiarowy hietogram 14 opadów (linia ciągła) z wykresami pudełkowymi wyników pomiarów dla Wrocławia wraz z naniesionym wzorcem DVWK (linia przerywana)

DVWK. Podobnie dla wskaźnika m_{30} , tj. dla $t_i/T = 0,30$, występują rozbieżności – wartość średnia $h_i/P_c = 0,26$ (mediana 0,26) – dla badanych opadów wobec stałej wartości $h_i/P_c = 0,20$ – dla wzorca DVWK. Średnia wartość nierównomierności w czasie intensywności badanych 14 opadów: $n_I = 3,30$ (mediana 3,33) jest wyższa od stałej wartości $n_I = 3,00$ – dla wzorca DVWK. Dla badanych opadów z Wrocławia, zgodnie z przebiegiem krzywej sumowej (rys. 5.14), po pierwszych 20% czasu trwania T występuje ok. 15% całkowitej wysokości P_c , po czasie równym 60% T pojawia się ok. 80% P_c , a pozostałe ok. 20% P_c występuje na pozostałych 40% T .

W przypadku analizy opadów z Jeleniej Góry stwierdzono rozbieżności podobnej klasy, tj.: zgodność dla wartości wskaźnika m_{50} – o wartości median: $h_i/P_c = 0,71$ – dla badanych opadów i $h_i/P_c = 0,70$ – dla wzorca DVWK. Natomiast dla wskaźnika m_{30} wykazano już bardzo duże rozbieżności wartości median: $h_i/P_c = 0,38$ – dla badanych opadów i $h_i/P_c = 0,20$ – dla wzorca DVWK. Średnia wartość nierównomierności w czasie przedziałowej intensywności badanych 13 opadów: $n_I = 3,05$ była natomiast praktycznie równa $n_I = 3,00$ – dla wzorca DVWK. Dla opadów z Jeleniej Góry stwierdzono, że po pierwszych 20% czasu trwania (T) występuje ok. 15% całkowitej wysokości P_c , po czasie równym 60% T pojawia się ok. 85% P_c , a pozostałe ok. 15% P_c występuje na 40% T .



Rys. 5.15. Przykładowy bezwymiarowy histogram słupkowy opadu niżowego z Wrocławia (linia ciągła) z naniesionym wzorcem słupkowym opadu modelowego DVWK (linia przerywana)

Na rysunku 5.15 przedstawiono dla ilustracji porównanie: bezwymiarowego histogramu słupkowego opadu niżowego z Wrocławia (z dnia 13.09.2013 r.) o $P_c = 40,0$ mm, $T = 1166$ min i $C = 1,2$ roku (zarejestrowanego przez deszczomierz D2 sieci MPWiK),

z bezwymiarowym wzorcem DVWK. Przykładowy opad niżowy charakteryzuje się następującymi wartościami wskaźników: $r = 0,45$, $r_{sc} = 0,43$, $n_l = 3,01$ oraz $m_{30} = 0,33$ i $m_{50} = 0,71$. Z porównania bezwymiarowych hietogramów słupkowych (rys. 5.15) wynika równość wartości pików maksymalnej wysokości przedziałowej ($\Delta t = T/10$), czyli zgodność nierównomierności przedziałowej intensywności: $n_l = 3,01$ z $n_l = 3,00$ dla wzorca DVWK. Pik też występuje w tym samym przedziale czasowym na obu hietogramach. Z porównania wynika również zbieżność jednego ze wskaźników rozkładu masy, mianowicie, w przykładowym opadzie niżowym wg wskaźnika $m_{50} = 0,71$, natomiast dla wzorca DVWK $m_{50} = 0,70$. W przypadku wskaźnika m_{30} zauważalna jest już duża rozbieżność wartości: w przykładowym opadzie $m_{30} = 0,33$, natomiast dla wzorca DVWK $m_{30} = 0,20$.

Podsumowując, należy stwierdzić, że wzorec DVWK nie może być uznany za pozytywnie zweryfikowany na 14 opadach pochodzących ze stacji nizinnych – IMGW-PIB i MPWiK we Wrocławiu, jako mieszczący się w klasie dokładności pomiarów i obliczeń hydrologicznych dotyczących zjawisk o charakterze losowym. Występują bowiem znaczne różnice w rozkładzie masy opadów. Analogiczny wniosek sformułowano w przypadku analizy 13 opadów pochodzących ze stacji górskiej – IMGW-PIB Jelenia Góra.

6. Uogólnienie wyników badań hietogramów wzorcowych

6.1. Hietogramy wzorcowe opadów konwekcyjnych dla badanych stacji

6.1.1. Uszczegółowiony wzorzec Eulera typu II dla Jeleniej Góry

Jak wykazano w podrozdziałach 4.3.1 i 4.3.2 podczas weryfikacji podobieństwa kształtów hietogramów bezwymiarowych i wymiarowych opadów ze stacji górskiej (IMGW-PIB w Jeleniej Górze), wzorzec Eulera typu II odzwierciedla w przybliżeniu badane opady o charakterze konwekcyjnym, w tym orograficznym (dla $T \leq 180$ min). Wartość wskaźnika rozkładu masy $m_{33} = 0,69$ na 25 hietogramach wymiarowych jest niemal równa stałej wartości $m_{33} = 0,71$ w 28 modelach Eulera typu II dla Jeleniej Góry. Główna masa opadu występuje więc w pierwszej 1/3 części czasu trwania deszczów. Jednakże położenie piku maksymalnej intensywności opadów (dla $\Delta t = 5$ min) znacznie się różni – dla badanych opadów występuje na końcu 1/5 części czasu trwania opadów, a w modelach Eulera typu II – na końcu 1/3 tego czasu. Uogólniając wyniki badań, należy więc dokonać niezbędnej korekty położenia piku przedziałowej, maksymalnej intensywności – z $1/3 T$ do $1/5 T$. Idea tworzenia wzorców Eulera typu II – na podstawie lokalnych krzywych IDF/DDF będzie w tym przypadku zachowana, co zilustrowano w tabeli 6.1.

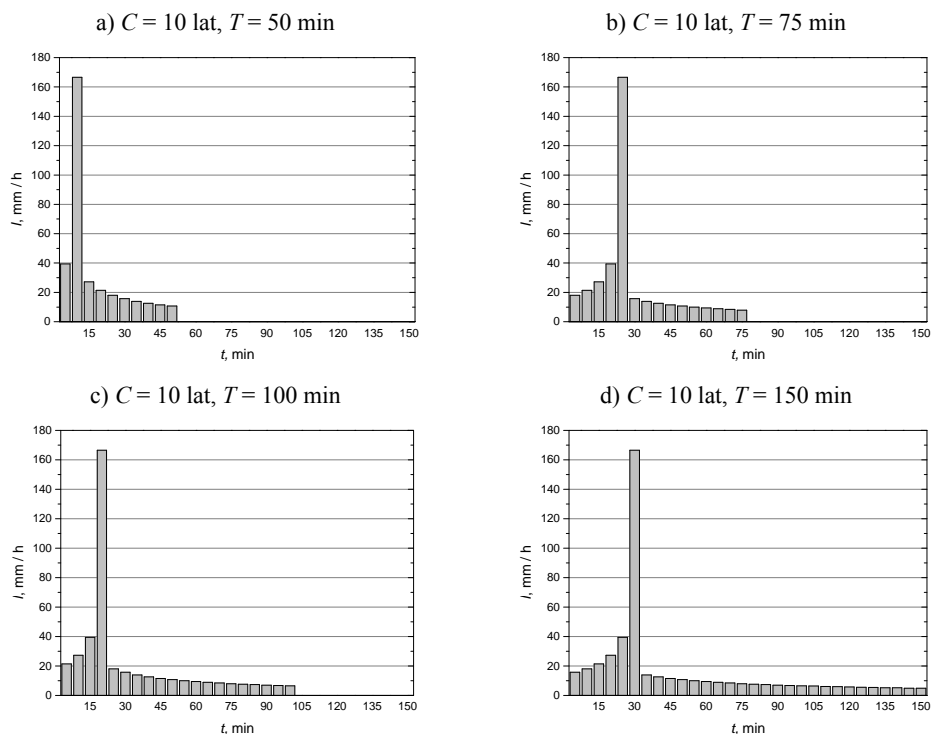
Według wytycznych DWA-A118 z 2006 r. [4, 80] wzorzec Eulera typu II zalecany jest do modelowania niezawodności działania kanalizacji deszczowej, zwłaszcza w małych zlewniach miejskich o powierzchni do ok. 2 km^2 , gdzie czas (T) trwania opadów miarodajnych do ich projektowania jest ograniczony czasem przepływu w kanałach (t_p). Czas trwania opadów modelowych powinien natomiast spełniać relację: $T \geq 2t_p$ [4, 48, 51, 55, 80, 95]. Przykładowo dla zlewni o powierzchni ok. 2 km^2 , zakładając prędkość przepływu w kanałach deszczowych na poziomie $1,0 \text{ m/s}$, możemy mieć do czynienia z czasami przepływu (t_p) od ok. 25 min – dla zlewni o kształcie kwadratu

Tabela 6.1. Fazy tworzenia uszczegółowionego wzorca Eulera typu II dla Jeleniej Góry – dla przykładowych danych: $C = 10$ lat i $T = 50, 75, 100$ i 150 min

t	h	Δh	I	Uszczegółowiony wzorec Euler a typu II			
				$T = 50$ min	$T = 75$ min	$T = 100$ min	$T = 150$ min
5	13,88	13,88	166,56	39,36	27,24	21,36	15,72
10	17,16	3,28	39,36	166,56	39,36	27,24	18,00
15	19,43	2,27	27,24	27,24	166,56	39,36	21,36
20	21,21	1,78	21,36	21,36	21,36	166,56	27,24
25	22,71	1,50	18,00	18,00	18,00	18,00	39,36
30	24,02	1,31	15,72	15,72	15,72	15,72	166,56
35	25,18	1,16	13,92	13,92	13,92	13,92	13,92
40	26,23	1,05	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
45	27,19	0,96	11,52	11,52	11,52	11,52	11,52
50	28,08	0,89	10,68	10,68	10,68	10,68	10,68
55	28,91	0,83	9,96	–	9,96	9,96	9,96
60	29,69	0,78	9,36	–	9,36	9,36	9,36
65	30,43	0,74	8,88	–	8,88	8,88	8,88
70	31,13	0,70	8,40	–	8,40	8,40	8,40
75	31,79	0,66	7,92	–	7,92	7,92	7,92
80	32,42	0,63	7,56	–	–	7,56	7,56
85	33,03	0,61	7,32	–	–	7,32	7,32
90	33,61	0,58	6,96	–	–	6,96	6,96
95	34,17	0,56	6,72	–	–	6,72	6,72
100	34,71	0,54	6,48	–	–	6,48	6,48
105	35,24	0,53	6,36	–	–	–	6,36
110	35,74	0,50	6,00	–	–	–	6,00
115	36,23	0,49	5,88	–	–	–	5,88
120	36,71	0,48	5,76	–	–	–	5,76
125	37,17	0,46	5,52	–	–	–	5,52
130	37,62	0,45	5,40	–	–	–	5,40
135	38,05	0,43	5,16	–	–	–	5,16
140	38,48	0,43	5,16	–	–	–	5,16
145	38,89	0,41	4,92	–	–	–	4,92
150	39,3	0,41	4,92	–	–	–	4,92

(np. $1,4 \times 1,4$ km) do ok. 75 min – dla zlewni o kształcie wydłużonego prostokąta (np. $4,5 \times 0,45$ km). Wówczas czas trwania opadów modelowych dla $T = 2t_p$ wyniesie od 50 do 150 min. Dla podanego zakresu danych w tabeli 6.1 zobrazowano fazy obliczeniowe podczas tworzenia uszczegółowionego wzorca Eulera typu II dla Jeleniej Góry (z krzywych DDF wg modelu opadów maksymalnych (3.1)), dla przykładowej częstości przewyższeń $C = 10$ lat i 4 czasów trwania opadów modelowych $T = 50, 75, 100$ i 150 min.

Na rysunku 6.1 przedstawiono kształty hietogramów wg uszczegółowionego wzorca Eulera typu II dla Jeleniej Góry – dla przykładowych danych: $C = 10$ lat i $T = 50, 75, 100$ i 150 min.



Rys. 6.1. Przykładowe uszczegółowione wzorce Eulera typu II dla Jeleniej Góry ($C = 10$ lat i $T = 50, 75, 100$ i 150 min)

6.1.2. Uszczegółowiony wzorec Euler a typu II dla Wrocławia

Jak wykazano w podrozdziałach 5.3.1 i 5.3.2 podczas weryfikacji podobieństwa kształtów hietogramów bezwymiarowych i wymiarowych opadów ze stacji nizinnych (sieci pomiarowej MPWiK i IMGW-PIB we Wrocławiu), wzorec Euler a typu II odzwierciedla w przybliżeniu badane opady o charakterze konwekcyjnym (dla $T < 150$ min). W obu przypadkach, główna masa opadu występuje w pierwszej 1/3 części czasu trwania deszczów. Jednakże położenie piku maksymalnej przedziałowej intensywności znacznie się różni – dla badanych opadów występuje na końcu 1/5 części czasu trwania opadów, a w modelach Euler a typu II – na końcu 1/3 tego czasu. Uogólniając wyniki badań, należy więc dokonać niezbędnej korekty położenia piku przedziałowej, maksymalnej intensywności – z $1/3 T$ do $1/5 T$. Wyniki tych badań potwierdziły się

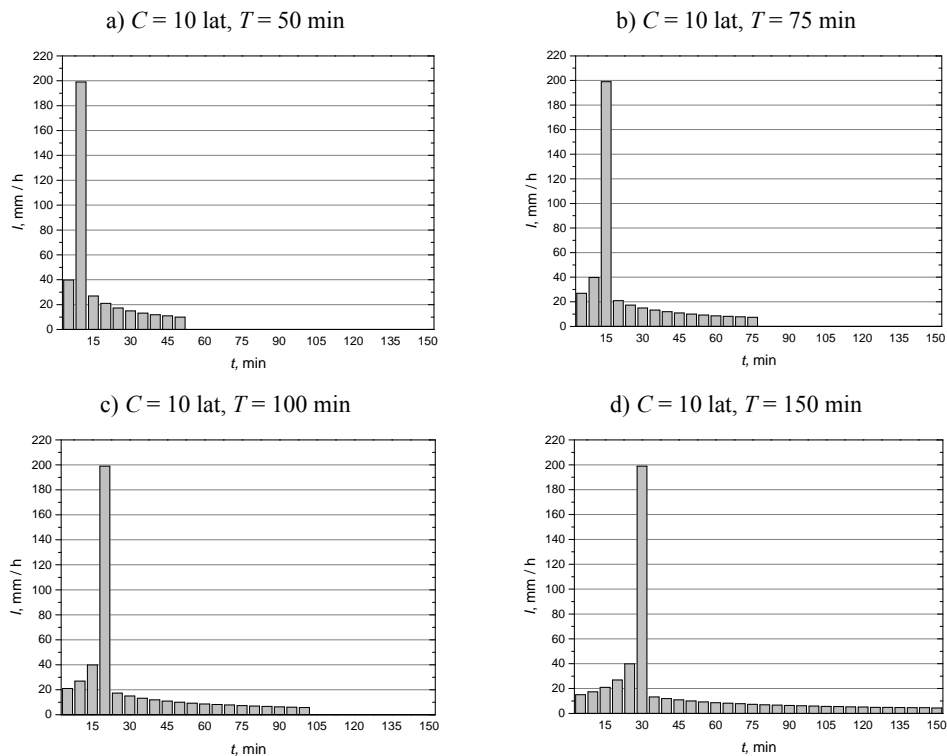
w przypadku omówionych już opadów o charakterze konwekcyjnym, w tym orograficznym, pochodzących ze stacji górskiej.

W tabeli 6.2 zobrazowano fazy obliczeniowe podczas tworzenia uszczegółowionego wzorca Eulera typu II dla Wrocławia (z krzywych DDF wg modelu opadów maksymalnych (3.2)) dla przyjętych: 4 czasów trwania opadów modelowych $T = 50, 75, 100$ i 150 min i częstości przewyższeń $C = 10$ lat.

Tabela 6.2. Fazy tworzenia uszczegółowionego wzorca Eulera typu II dla Wrocławia – dla przykładowych danych: $C = 10$ lat i $T = 50, 75, 100$ i 150 min

t min	h mm	Δh mm	I mm/h	Uszczegółowiony wzorzec Eulera typu II			
				$T = 50$ min	$T = 75$ min	$T = 100$ min	$T = 150$ min
5	16,58	16,58	198,96	39,84	26,88	21,00	15,00
10	19,90	3,32	39,84	198,96	39,84	26,88	17,28
15	22,14	2,24	26,88	26,88	198,96	39,84	21,00
20	23,89	1,75	21,00	21,00	21,00	198,96	26,88
25	25,33	1,44	17,28	17,28	17,28	17,28	39,84
30	26,58	1,25	15,00	15,00	15,00	15,00	198,96
35	27,68	1,10	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20
40	28,67	0,99	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
45	29,58	0,91	10,92	10,92	10,92	10,92	10,92
50	30,41	0,83	9,96	9,96	9,96	9,96	9,96
55	31,18	0,77	9,24	–	9,24	9,24	9,24
60	31,90	0,72	8,64	–	8,64	8,64	8,64
65	32,58	0,68	8,16	–	8,16	8,16	8,16
70	33,23	0,65	7,80	–	7,80	7,80	7,80
75	33,84	0,61	7,32	–	7,32	7,32	7,32
80	34,42	0,58	6,96	–	–	6,96	6,96
85	34,97	0,55	6,60	–	–	6,60	6,60
90	35,50	0,53	6,36	–	–	6,36	6,36
95	36,01	0,51	6,12	–	–	6,12	6,12
100	36,50	0,49	5,88	–	–	5,88	5,88
105	36,97	0,47	5,64	–	–	–	5,64
110	37,43	0,46	5,52	–	–	–	5,52
115	37,87	0,44	5,28	–	–	–	5,28
120	38,30	0,43	5,16	–	–	–	5,16
125	38,71	0,41	4,92	–	–	–	4,92
130	39,11	0,40	4,80	–	–	–	4,80
135	39,50	0,39	4,68	–	–	–	4,68
140	39,88	0,38	4,56	–	–	–	4,56
145	40,26	0,38	4,56	–	–	–	4,56
150	40,62	0,36	4,32	–	–	–	4,32

Na rysunku 6.2 zobrazowano kształty hietogramów wg uszczegółowionego wzorca Eulera typu II dla Wrocławia – dla przykładowych danych: $C = 10$ lat i $T = 50, 75, 100$ i 150 min.



Rys. 6.2. Przykładowe uszczegółowione wzorce Eulera typu II dla Wrocławia ($C = 10$ lat i $T = 50, 75, 100$ i 150 min)

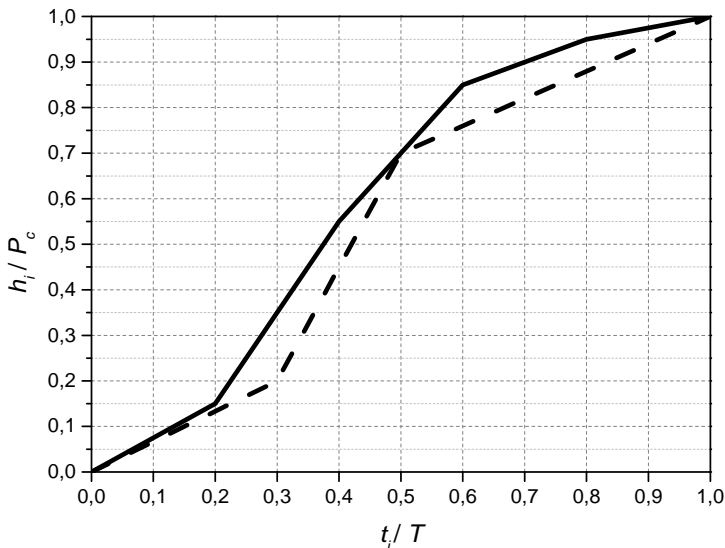
6.2. Hietogramy wzorcowe opadów frontalnych i niżowych dla badanych stacji

6.2.1. Uszczegółowiony wzorzec DVWK dla Jeleniej Góry

Jak wykazano w podrozdziale 4.3.3 podczas weryfikacji podobieństwa kształtów hietogramów bezwymiarowych ze stacji górskiej (IMGW-PIB w Jeleniej Górze), wzorzec DVWK nie odzwierciedla opadów o charakterze frontalnym (dla $T > 180$ min) i niżowym. Dla badanych opadów wykazano bowiem, że punkty węzłowe krzywey

sumowej względem weryfikowanego wzorca DVWK – z dwoma punktami węzłowymi, przemieszczają się z przedziału $t_i/T = 0,30$ do przedziału $t_i/T = 0,20$, a z przedziału $t_i/T = 0,50$ do $t_i/T = 0,60$ (wg rys. 4.14). Zmienia to istotnie rozkład masy opadów. W szczególności po upływie pierwszych 20% czasu trwania (T) występuje ok. 15% całkowitej wysokości (P_c), a po czasie równym 60% T pojawia się ok. 85% P_c .

Wzorzec DVWK należy uznać generalnie za zbyt uproszczony – do 2 punktów węzłowych krzywej sumowej, tj. do 3 przedziałów o prostoliniowej zależności bezwymiarowej wysokości h_i/P_c od bezwymiarowego czasu t_i/T . Zaproponowano więc uszczegółowioną postać tego wzorca – do 4 punktów węzłowych krzywej sumowej, tj. 5 przedziałów o prostoliniowej zależności h_i/P_c od t_i/T . Dla opadów z Jeleniej Góry, na podstawie zbadanego przebiegu krzywej sumowej – wg rysunku 4.14, ustalono parametry 4 punktów węzłowych krzywej sumowej: $t_i/T = 0,20 - h_i/P_c = 0,15$; $t_i/T = 0,40 - h_i/P_c = 0,55$; $t_i/T = 0,60 - h_i/P_c = 0,85$; $t_i/T = 0,80 - h_i/P_c = 0,95$. Na rysunku 6.3 przedstawiono łamaną krzywą sumową uszczegółowionej postaci wzorca DVWK dla Jeleniej Góry wraz z naniesionym oryginalnym wzorcem DVWK.



Rys. 6.3. Krzywa sumowa uszczegółowionej postaci wzorca DVWK dla Jeleniej Góry (linia ciągła) z naniesionym oryginalnym wzorcem DVWK (linia przerywana)

Aby dowieść tezy, że oryginalna postać modelu DVWK nie może być uznana za pozytywnie zweryfikowaną na opadach frontalnych i niżowych z Jeleniej Góry (rys. 6.3), dokonano obliczeń ilościowych różnic bezwymiarowych wielkości $h_i/P_c(t_i/T)$ dla modeli: oryginalnego DVWK i uszczegółowionego DVWK względem krzywej su-

mowej z pomiarów. W tabeli 6.3 przedstawiono wyniki porównań, tj. procentowych różnic dla wzorca DVWK (z 2 punktami węzłowymi) i uszczegółowionego wzorca DVWK (z 4 punktami), względem krzywej sumowej z median – wyników pomiarów opadów w Jeleniej Górze. Pośrednie wartości krzywych sumowych, poza punktami węzłowymi, interpolowano liniowo.

Tabela 6.3. Porównanie odchyłeń wartości $h_i/P_c(t_i/T)$ dla wzorca DVWK oraz uszczegółowionego wzorca DVWK względem median z wyników pomiarów opadów w Jeleniej Górze

Przedział czasu t_i/T	Wyniki pomiarów h_i/P_c	Uszczegółowiony wzorzec DVWK		Wzorzec DVWK	
		h_i/P_c	$\Delta(h_i/P_c)$	h_i/P_c	$\Delta(h_i/P_c)$
–	–	–	%	–	%
0,1	0,056	0,075	33,9	0,067	19,6
0,2	0,152	0,15	–1,3	0,134	–11,8
0,3	0,380	0,350	–7,9	0,200	–47,4
0,4	0,535	0,55	2,8	0,450	–15,9
0,5	0,707	0,700	–1,0	0,700	–1,0
0,6	0,846	0,85	0,5	0,760	–10,2
0,7	0,909	0,900	–1,0	0,820	–9,8
0,8	0,952	0,95	–0,2	0,880	–7,6
0,9	0,978	0,975	–0,3	0,940	–3,9
1,0	1,000	1,00	0,0	1,000	0,0

Pojedynczy, maksymalny błąd względny $\Delta(h_i/P_c)$ uszczegółowionego wzorca DVWK sięga 33,9% (co wynikać może z małej dokładności pomiarów h_i/P_c dla $t_i/T = 0,1$), wobec pozostałych błędów – średnio na poziomie \pm kilku procent. W przypadku oryginalnego wzorca DVWK błędy te są znacznie większe – maksymalnie 47,4%, a średnio na poziomie \pm kilkunastu procent.

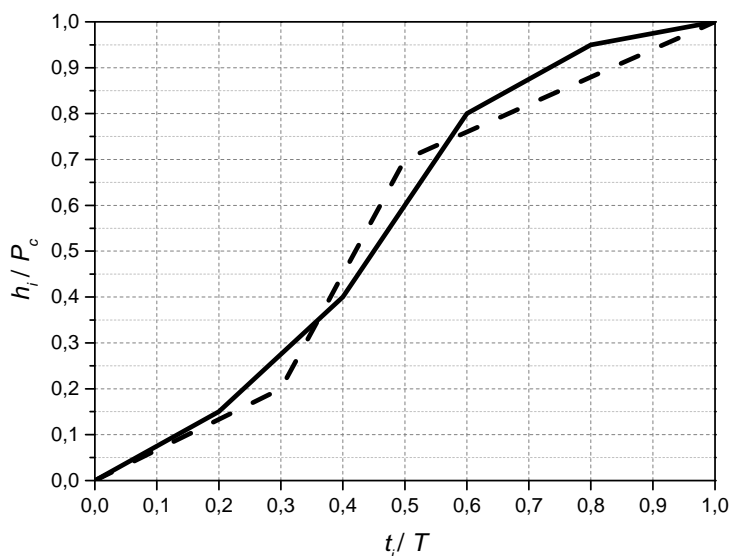
Ocenę dokładności porównywanych wzorców przeprowadzono na podstawie przyjętego wskaźnika jakości dopasowania – względnego błędu resztkowego średniokwadratowego $rRMSE$ (wg wzoru (2.6)). Wartość $rRMSE$ dla uszczegółowionego wzorca DVWK wynosi 11,7% – co świadczy o dość dobrym odwzorowaniu wyników pomiarów, w przeciwieństwie do wzorca DVWK, gdzie wartość $rRMSE$ wynosi 19,1%.

6.2.2. Uszczegółowiony wzorzec DVWK dla Wrocławia

Jak wykazano w podrozdziale 5.3.3 podczas weryfikacji podobieństwa kształtów hietogramów bezwymiarowych ze stacji nizinnych we Wrocławiu, wzorzec DVWK jako zbyt uproszczony (do 2 punktów węzłowych) nie odzwierciedla opadów o charakterze frontalnym (dla $T > 150$ min) i niżowym. Dla badanych opadów wykazano,

że punkty węzłowe krzywej sumowej, względem weryfikowanego wzorca DVWK, przesuwają się z przedziału $t_i/T = 0,30$ do przedziału $t_i/T = 0,20$, a z przedziału $t_i/T = 0,50$ do $t_i/T = 0,60$. Zmienia to istotnie rozkład masy opadów (analogicznie do przypadku opadów ze stacji górskiej). Dla opadów z Wrocławia, po upływie 20% czasu trwania T występuje ok. 15% całkowitej wysokości P_c , a po czasie równym 60% T pojawia się ok. 80% P_c .

Na podstawie zbadanego przebiegu krzywej sumowej dla opadów z Wrocławia (wg rys. 5.14) zaproponowano uszczegółowioną postać wzorca DVWK – z 4 punktami węzłowymi. W szczególności węzłowe parametry krzywej sumowej przyjmują wartości: $t_i/T = 0,20 - h_i/P_c = 0,15$; $t_i/T = 0,40 - h_i/P_c = 0,40$; $t_i/T = 0,60 - h_i/P_c = 0,80$; $t_i/T = 0,80 - h_i/P_c = 0,95$. Na rysunku 6.4 przedstawiono łamaną krzywą sumową uszczegółowionej postaci wzorca DVWK dla Wrocławia wraz z naniesionym oryginalnym wzorcem DVWK.



Rys. 6.4. Krzywa sumowa uszczegółowionej postaci wzorca DVWK dla Wrocławia (linia ciągła) z naniesionym oryginalnym wzorcem DVWK (linia przerywana)

W tabeli 6.4 wykazano ilościowe różnice bezwymiarowych wielkości $h_i/P_c(t_i/T)$ dla modeli: oryginalnego DVWK i uszczegółowionego DVWK, względem krzywej sumowej z pomiarów we Wrocławiu (pośrednie wartości krzywych sumowych – poza punktami węzłowymi, interpolowano liniowo). Pojedynczy, maksymalny błąd względny $\Delta(h_i/P_c)$ uszczegółowionego wzorca DVWK sięga 7,8%, wobec pozostałych błędów – średnio na poziomie \pm kilku procent. W przypadku oryginalnego wzorca DVWK błędy te są znacznie większe – maksymalnie 23,2%, a średnio na poziomie \pm kilkunastu procent.

Tabela 6.4. Porównanie odchyłek wartości $h_i/P_c(t_i/T)$ dla wzorca DVWK oraz uszczegółowionego wzorca DVWK względem median z wyników pomiarów opadów we Wrocławiu

Przedział czasu t_i/T	Wyniki pomiarów h_i/P_c	Uszczegółowiony wzorzec DVWK		Wzorzec DVWK	
		h_i/P_c	$\Delta(h_i/P_c)$	h_i/P_c	$\Delta(h_i/P_c)$
–	–	–	%	–	%
0,1	0,075	0,075	0,0	0,067	–10,7
0,2	0,149	0,15	0,7	0,134	–10,1
0,3	0,255	0,275	7,8	0,200	–21,6
0,4	0,385	0,40	3,9	0,450	16,9
0,5	0,568	0,600	5,6	0,700	23,2
0,6	0,788	0,80	1,5	0,760	–3,6
0,7	0,867	0,875	0,9	0,820	–5,4
0,8	0,949	0,95	0,1	0,880	–7,3
0,9	0,978	0,975	–0,3	0,940	–3,9
1,0	1,000	1,00	0,0	1,000	0,0

Dokładność porównywanych wzorców określono na podstawie wskaźnika jakości dopasowania $rRMSE$ (2.6). Wartość $rRMSE$ dla uszczegółowionego wzorca DVWK dla Wrocławia wynosi 3,5%, co świadczy o bardzo dobrym odwzorowaniu wyników pomiarów w przeciwieństwie do oryginalnego wzorca DVWK, gdzie wartość $rRMSE$ wynosi 13,4%.

7. Podsumowanie i wnioski końcowe

Realne zagrożenia środowiskowe powodowane wylewami z systemów kanalizacyjnych można stwierdzić w trakcie ich eksploatacji, natomiast potencjalne zagrożenia można wykazać jedynie na drodze modelowania hydrodynamicznego. Modele do symulacji działania systemów kanalizacyjnych umożliwiają uwzględnienie zmiennych w czasie i przestrzeni scenariuszy obciążeń opadami, a także niestabilnego przepływu w kanałach. Scenariuszami tymi mogą być zarówno rzeczywiste, zmierzone w wieloleciu intensywne lokalne opady, które są trudno dostępne, jak i opady modelowe, np. Eulera typu II czy DVWK, stosowane w Niemczech, tworzone na podstawie krzywych intensywności (IDF) bądź wysokości (DDF) opadów deszczowych. Modele te są również zalecane do stosowania w Polsce, lecz brak odpowiedniej weryfikacji, czy kształt tych modeli odpowiada polskim warunkom hydrologicznym.

Opady modelowe powinny odzwierciedlać główne cechy rzeczywistych opadów występujących na danym terenie. Celowe było zatem przeprowadzenie odpowiednich badań nad zmiennością intensywności opadów w czasie, na podstawie lokalnych baz danych. Do realizacji przyjętego celu pracy zebrano dane opadowe z dwóch charakterystycznych lokalizacji stacji meteorologicznych w dorzeczu Górnej i Środkowej Odry: IMGW-PIB Jelenia Góra i IMGW-PIB Wrocław. Wybrane stacje spełniały kryteria różnorodności położenia geograficznego – na terenie górskim i nizinnym, dostępność do długich ciągów rejestracji opadów z zapisem elektronicznym w rozdzielczości czasowej 1 minuty, a także możliwość uzupełnienia danych z sieci lokalnego monitoringu opadów (MPWiK we Wrocławiu). Dla wybranych stacji meteorologicznych ustalono szeregi czasowe typu DDF dla przyjętych częstości przewyższeń: $C \geq 1$ rok, $C \geq 2$ lata, $C \geq 5$ lat oraz $C \geq 10$ lat – z aktualnych modeli opadów maksymalnych dla tych stacji. Do analiz statystycznych wyselekcjonowano niezależne opady o częstościach przewyższeń $C(T) \geq 1$ rok, które następnie grupowano genetycznie – względem czasów trwania, na opady: konwekcyjne (K o $T \leq 120$ min), frontalne (F o $T \in (120; 720]$ min) i niżowe (N o $T > 720$ min). Do grupowania opadów ze względu na podobieństwo kształtu hietogramów zastosowano 3 metodyki badawcze: Huffa, analizy skupień metodą Warda oraz metodą k -średnich. Metody te, a zwłaszcza metoda k -średnich (dla $k = 4$), okazały się przydatne do selekcji opadów ze względu na cechy genetyczne opadów. Do ilościowej oceny podobieństwa kształtów lokalnych hietogramów zasto-

sowano 6 wskaźników charakteryzujących: położenie maksymalnych przedziałowych wysokości, rozkłady masy i nierównomierność intensywności deszczów w czasie. Analiza porównawcza objęła weryfikację kształtów wzorców Eulera typu II i DVWK, jak i ich uogólnienie dla badanych stacji. Przeprowadzone badania upoważniają do sformułowania następujących wniosków o znaczeniu naukowym i praktycznym:

1. Ze względu na kształt hietogramów, największą populację badanych opadów o charakterze konwekcyjnym (K), frontalnym (F) i niżowym (N) – o ponadprogowej wysokości dla częstości występowania $C(T) \geq 1$ rok, stanowiły deszcze, dla których główny przyrost masy skoncentrowany jest w pierwszej połowie czasu ich trwania (jak we wzorcach Eulera typu II i DVWK). Dotyczy to odpowiednio: 71% populacji opadów w Jeleniej Górze i 78% we Wrocławiu, przy czym charakter konwekcyjny, w tym orograficzny wykazują opady dla czasów trwania $T < 180$ min w Jeleniej Górze oraz konwekcyjny dla $T < 150$ min we Wrocławiu.

2. W weryfikowanym (wymiarowym) wzorcu Eulera typu II położenie pików maksymalnej przedziałowej wysokości opadów, zarówno w Jeleniej Górze, jak i we Wrocławiu przesuwają się z $1/3$ do $1/5$ czasu trwania opadów. Zbadane rozbieżności mieszczą się w klasie dokładności pomiarów i obliczeń hydrologicznych, dotyczących zjawisk o charakterze losowym. To znaczy, że idea tworzenia wzorców Eulera typu II z krzywych IDF może zostać uznana za pozytywnie zweryfikowaną na badanych opadach ze stacji górskiej i nizinnych. Dla badanych stacji ustalono uszczegółowione wzorce Eulera typu II z pikiem maksymalnej przedziałowej intensywności położonym w pierwszej $1/5$ części czasu trwania opadów zarówno dla Jeleniej Góry, jak i Wrocławia.

3. W weryfikowanym (bezwymiarowym) wzorcu DVWK 2 punkty węzłowe krzywej sumowej zarówno w Jeleniej Górze, jak i we Wrocławiu przesuwają się z przedziału $t_i/T = 0,30$ do przedziału $t_i/T = 0,20$, a z przedziału $t_i/T = 0,50$ do $t_i/T = 0,60$, co ma wpływ na rozkład masy opadów. Wzorec DVWK jest ponadto zbyt uproszczony – do 2 punktów węzłowych krzywej sumowej, tj. do 3 przedziałów o prostoliniowej zależności bezwymiarowej wysokości h_i/P_c od bezwymiarowego czasu t_i/T . Zaproponowane uszczegółowione wzorce DVWK dla opadów z badanych stacji mają 4 punkty węzłowe krzywych sumowych, tj. 5 przedziałów o prostoliniowej zależności h_i/P_c od t_i/T . Węzłowe parametry krzywych sumowych przyjmują wartości:

- dla Jeleniej Góry: $t_i/T = 0,20 - h_i/P_c = 0,15$; $t_i/T = 0,40 - h_i/P_c = 0,55$; $t_i/T = 0,60 - h_i/P_c = 0,85$; $t_i/T = 0,80 - h_i/P_c = 0,95$;

- dla Wrocławia: $t_i/T = 0,20 - h_i/P_c = 0,15$; $t_i/T = 0,40 - h_i/P_c = 0,40$; $t_i/T = 0,60 - h_i/P_c = 0,80$; $t_i/T = 0,80 - h_i/P_c = 0,95$.

Uszczegółowione wzorce DVWK dla opadów z badanych stacji odwzorowują wyniki pomiarów na zadowalającym poziomie dokładności.

Prezentowane wyniki badań, wg proponowanej w pracy metodyki analizy opadów, powinny zostać zweryfikowane na większej liczbie stacji IMGW-PIB i sieci lokalnego monitoringu opadów, w celu potwierdzenia zbadanych zależności w innych regionach Polski.

Literatura

- [1] ALFIERI L., LAIO F., CLAPS P., *A simulation experiment for optimal design hyetograph selection*. Hydrological Processes 2008, Vol. 22, No. 6, 813–820.
- [2] AL-RAWAS G.A., VALEO C., *Characteristics of rainstorm temporal distributions in arid mountainous and coastal regions*, Journal of Hydrology 2009, Vol. 376, No. 1, 318–326.
- [3] Arbeitsblatt ATV-A110, *Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und Leitungen*, GFA, Hennef 1988.
- [4] Arbeitsblatt DWA-A118, *Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen*, DWA, Hennef 2006.
- [5] Arbeitsblatt DWA-A/531, *Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.*, Hennef 2012.
- [6] ARNBJERG-NIELSEN K., *Quantification of climate change impacts on extreme precipitation used for design of sewer systems*, 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, 31 August–5 September 2008 (Scotland).
- [7] ARNELL V., *Rainfall data for the design of sewer pipe systems with the supplement description and validation of the CTH-urban runoff model*, Report Series A:8, Department of Hydraulics, Chalmers University of Technology, Göteborg 1983.
- [8] ASQUITH W.H., *Modeling of runoff-producing rainfall hyetographs in Texas using L-moment statistics* (Praca doktor., prom.: J.M. Sharp), The University of Texas at Austin, 2003.
- [9] BAJKIEWICZ-GRABOWSKA E., MIKULSKI Z., *Hydrologia ogólna*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [10] BANASIK K., *Wyznaczenie wezbrań powodziowych w małych zlewniach zurbanizowanych*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2009.
- [11] BANASIK K., BODZIONY M., BOGDANOWICZ E. i in., *Metodyka obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ*, Wyd. KZGW, Warszawa 2009.
- [12] BANASIK K., WAŁĘGA A., WĘGLARCZYK S., WIĘZIK B., *Aktualizacja metodyki obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ*, Wyd. KZGW, Warszawa 2017.
- [13] BARSZCZ M., *Znormalizowane rozkłady warstwy opadu w czasie trwania deszczy na obszarze zlewni doświadczalnej w Warszawie*, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie 2012, t. 12, 27–38.
- [14] BERNE A., DELRIEU G., CREUTIN J.- D., OBLED C., *Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology*, Journal of Hydrology 2004, Vol. 299, No. 3, 166–179.
- [15] BŁASZCZYK W., *Spyły deszczowe w sieci kanalizacyjnej*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna 1954, nr 9, 262–271.

- [16] BŁASZCZYK W., ROMAN M., STAMATELLO H., *Kanalizacja*, Arkady, Warszawa 1974.
- [17] BOGDANOWICZ E., STACHÝ J., *Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe*, Wyd. IMGW, Seria: Hydrologia i Oceanologia nr 23, Warszawa 1998.
- [18] BOLT A., BURSZTA-ADAMIAK E., GUDELIS-TARASZKIEWICZ K., SULIGOWSKI Z., TUSZYŃSKA A., *Kanalizacja. Projektowanie, wykonanie, eksploatacja*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2012.
- [19] BONTA J.V., *Development and utility of Huff curves for disaggregating precipitation amounts*, Applied Engineering in Agriculture 2004, Vol. 20, No. 5, 641–652.
- [20] BONTA J.V., SHAHALAM A., *Cumulative storm rainfall distributions: comparison of Huff curves*. Journal of Hydrology 2003, Vol. 42, No. 1, 65–74.
- [21] BRUNI G., REINOSO R., VAN DE GIESEN N.C., CLEMENS F.H.L.R., TEN VELDHUIS J.A.E., *On the sensitivity of urban hydrodynamic modelling to rainfall spatial and temporal resolution*. Hydrology and Earth System Sciences 2015, Vol. 19, No. 2, 691–709.
- [22] BYCZKOWSKI A., BANASIK K., IGNAR S., MEYER W., *Hydrologia*, Wyd. SGGW, Warszawa 1999.
- [23] CAZANESCU S., CAZANESCU R.A., *New hydrological approach for environmental protection and floods management*, Bulletin UASVM Agriculture 2009, Vol. 66, No. 2, 63–70.
- [24] CHARGUI S., SLIMANI M., CUDENNEC C., *Statistical distribution of rainy events characteristics and instantaneous hyetographs generation (Merguellil watershed in central Tunisia)*, Arabian Journal of Geosciences 2013, Vol. 6, No. 5, 1581–1590.
- [25] CHEN L.H., LIN G.F., HSU C.W., *Development of design hyetographs for ungauged sites using an approach combining PCA, SOM and kriging methods*, Water Resources Management 2011, Vol. 25, No. 8, 1995–2013.
- [26] CHOMICZ K., *Ulewy i deszcze nawalne w Polsce*, Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej 1951, vol. 2, nr 3, 17–88.
- [27] CHOW V.T., MAIDMENT D.R., MAYS L.W., *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York 1988.
- [28] CIEPIEŁOWSKI A., DĄBKOWSKI S. L., *Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami)*, Oficyna Wyd. Projprzem-EKO, Bydgoszcz 2006.
- [29] DĄBROWSKI W., DĄBROWSKA B., *Przewidywany wpływ zmian klimatu na dysfunkcję systemów odprowadzania ścieków*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2012, nr 1, 17–20.
- [30] DOLŠAK D., BEZAK N., ŠRAJ M., *Temporal characteristics of rainfall events under three climate types in Slovenia*, Journal of Hydrology 2016, No. 541, 1395–1405.
- [31] DVWK, *Arbeitsanleitung zur Anwendung Niederschlag-Abflub-Modellen in kleinen Einzugsgebieten*, Regeln 113 (Teil II: Synthese). Verlag Paul Parey, Hamburg 1984.
- [32] EAGLESON P.S., *The distribution of annual precipitation derived from observed storm sequences*, Water Resources Research 1978, Vol. 14, No. 5, 713–721.
- [33] ELLOUZE M., ABIDA H., SAFI R., *A triangular model for the generation of synthetic hyetographs*, Hydrological Sciences Journal 2009, Vol. 54, No. 2, 287–299.
- [34] GŁADYSZ B., *Wykorzystanie rozkładu statystycznego do aproksymacji czasowego przebiegu intensywności opadu*, [w:] *Ekstremalne zjawiska hydrologiczno-meteorologiczne i możliwości ich prognozowania*, Wyd. IMGW, Kraków 1987.
- [35] GRIMALDI S., SERINALDI F., *Design hyetograph analysis with 3-copula function*, Hydrological Sciences Journal 2006, Vol. 51, No. 2, 223–238.
- [36] GRUSZECKA A., *Pluwiogram syntetyczny jako podstawa określania hydrogramu przepływu ścieków deszczowych*, Ochrona Środowiska 1984, nr 3–4, 21–24.
- [37] HÄNSEL S., PETZOLD S., MATSCHULLAT J., *Precipitation Trend Analysis for Central Eastern Germany 1851–2006*, Bioclimatology and Natural Hazards 2009, Vol. 14, 29–38.
- [38] HUANG C.C., *Gaussian-distribution-based hyetographs and their relationships with debris flow initiation*, Journal of Hydrology 2011, Vol. 411, No. 3–4, 251–265.

- [39] HUFF F.A., *Time distribution of rainfall in heavy storms*, Water Resources Research 1967, Vol. 3, No. 4, 1007–1019.
- [40] HUFF F.A., *Time distributions of heavy rainstorms in Illinois*, Circular. Illinois State Water Survey 173, Champaign 1990.
- [41] HUFF F.A., ANGEL J.R., *Rainfall frequency atlas of the Midwest*, MCC Research Report 92: 03.1992.
- [42] IGNAR S., *Metodyka obliczania przepływów wezbraniowych w zlewniach nieobserwowanych*, Wyd. SGGW: Rozprawy Naukowe i Monografie (ISBN 83-00-02783-1), Warszawa 1993.
- [43] IPCC Climate Change, Impacts, Adaptation, and Vulnerability (Part A: Global and Sectoral Aspects). Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2014.
- [44] JOHANSEN L., *Design rainfall for sewer systems. Department of Sanitary Engineering*, Technical University of Denmark (Ph.D. Thesis, Report 79–2), Lyngby 1979.
- [45] KACZOR G., WAŁĘGA A., *Przebieg wybranych epizodów opadowych na obszarze aglomeracji krakowskiej w aspekcie modelowania sieci kanalizacji deszczowej*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2011, nr 10, 364–366.
- [46] KAŻMIERCZAK B., *Prognozy zmian maksymalnych wysokości opadów deszczowych we Wrocławiu*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019.
- [47] KAŻMIERCZAK B., KOTOWSKI A., *The influence of precipitation intensity growth on the urban drainage systems designing*, Theoretical and Applied Climatology 2014, Vol. 118, No. 1–2, 285–296.
- [48] KAŻMIERCZAK B., KOTOWSKI A., *Weryfikacja przepustowości kanalizacji deszczowej w modelowaniu hydrodynamicznym*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
- [49] KAŻMIERCZAK B., KOTOWSKI A., *Wpływ czasu trwania opadów modelowych Eulera typu II na objętość wylewów z kanałów deszczowych*, Forum Eksploatatora 2012, nr 3(60), 84–90.
- [50] KEIFER C.J., CHU H.H., *Synthetic storm pattern for drainage design*, Journal of the Hydraulics Division 1957, Vol. 83, No. 4, 1–25.
- [51] KOTOWSKI A., *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Sieci kanalizacyjne (t. I), Obiekty specjalne (t. II)*, Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa 2015 (Wydanie II).
- [52] KOTOWSKI A., DANCEWICZ A., KAŻMIERCZAK B., *The accuracy of measurements of precipitation amount using standard and tipping bucket pluviographs in comparison to Hellmann rain gauges*, Environment Protection Engineering 2011, Vol. 37, No. 2, 23–34.
- [53] KOTOWSKI A., KAŻMIERCZAK B., DANCEWICZ A., *Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji*, Wyd. KILiW PAN (IPPT), nr 68, Warszawa 2010.
- [54] KOTOWSKI A., KAŻMIERCZAK B., LICZNAK P., *Wybrane problemy projektowania i modelowania odwodnień terenów*, INSTAL 2018, nr 5, 56–61.
- [55] KOTOWSKI A., KAŻMIERCZAK B., NOWAKOWSKA M., *Analiza obciążenia systemu odwodnienia terenu w przypadku prognozowanego zwiększenia częstości i intensywności deszczów z powodu zmian klimatycznych*, Ochrona Środowiska 2013, vol. 35, nr 1, 25–32.
- [56] KOŻUCHOWSKI K. (red.), *Meteorologia i klimatologia*, WNPWN, Warszawa 2007.
- [57] KUPCZYK E., SULIGOWSKI R., *Statystyczny opis struktury opadów atmosferycznych jako elementu wejścia do modeli hydrologicznych*, [w:] *Prognozy opadów i wezbrań o zadanym czasie powtarzalności* (red. U. Soczyńska), Wyd. UW, Warszawa 1997.
- [58] Landesamt für Umwelt (LFU), *Bemessung von Misch- und Regenwasserkanälen*, Teil 1: *Klimawandel und möglicher Anpassungsbedarf*, Referat 66 des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, Merkblatt Nr. 4.3/3, Stand Juli 2009.
- [59] LICZNAK P., *Analiza opadów atmosferycznych na potrzeby projektowania systemów odwodnienia*, Wyd. Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2018.

- [60] LICZJAR P., *Generatory syntetycznych szeregów opadów do modelowania sieci kanalizacji deszczowych i ogólnospławnych*, Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław 2009.
- [61] LICZJAR P., ŁOMOTOWSKI J., *Analiza chwilowych natężeń deszczów miarodajnych we Wrocławiu*, Ochrona Środowiska 2005, vol. 27, nr 2, 25–28.
- [62] LICZJAR P., SZELĄG B., *Analiza zmienności czasowej opadów atmosferycznych w Warszawie*, Ochrona Środowiska 2014, vol. 36, nr 3, 23–28.
- [63] LICZJAR P., ŁOMOTOWSKI J., ROJEK M., *Pomiary i przetwarzanie danych opadów dla potrzeb projektowania i eksploatacji systemów odwodnieniowych*, Wyd. FUTURA, Poznań 2005.
- [64] LICZJAR P., BURSZTA-ADAMIAK E., ŁOMOTOWSKI J., STAŃCZYK J., *Modern proposal of methodology for retrieval of characteristic synthetic rainfall hyetographs*, E3S Web of Conferences 2017, Vol. 22, EDP Sciences.
- [65] LICZJAR P., BURSZTA-ADAMIAK E., KOTOWSKI A., SIEKANOWICZ-GROCHOWINA K., OKTAWIEC M., *Empiryczna weryfikacja modelu Bogdanowicz–Stachy do obliczania wartości natężenia deszczu miarodajnego*, Ochrona Środowiska 2018, Vol. 40, nr 3, 21–28.
- [66] LICZJAR P., SIEKANOWICZ-GROCHOWINA K., OKTAWIEC M., KOTOWSKI A., BURSZTA-ADAMIAK E., *Empiryczna weryfikacja formuły Błaszczyka do obliczania wartości natężenia deszczu miarodajnego*, Ochrona Środowiska 2018, vol. 40, nr 2, 17–22.
- [67] MADSEN H., MIKKELSEN P.S., ROSBJERG D., HARREMOES P., *Estimation of regional intensity-duration-frequency curves for extreme precipitation*, Water Science and Technology 1998, Vol. 37, No. 11, 29–36.
- [68] MAZURKIEWICZ K., *Wyznaczenie charakterystyki opadu obliczeniowego dla potrzeb modelowania odpływu ze zlewni miejskiej* (p. dokt.), Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, Poznań 2016.
- [69] MAZURKIEWICZ K., SKOTNICKI M., SOWIŃSKI M., *Opracowanie hietogramów wzorcowych na potrzeby symulacji odpływu ze zlewni miejskich*, [w:] *Hydrologia zlewni zurbanizowanych*, Wyd. Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, z. 39, Warszawa 2016, 33–47.
- [70] MAZURKIEWICZ K., SOWIŃSKI M., *Wyznaczenie opadów deszczu statystycznie niezależnych na podstawie danych pomiarowych*, Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury 2014, t. XXXI, z. 61, nr 1, 149–161.
- [71] NOWAKOWSKA M., *Identyfikacja parametrów hydrologicznych i hydraulicznych zlewni miejskiej w modelowaniu hydrodynamicznym SWMM* (praca dokt.), Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2016.
- [72] NOWAKOWSKA M., KOTOWSKI A., *Metodyka i zasady modelowania odwodnień terenów zurbanizowanych*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2017.
- [73] ONOF C., ARNBJERG-NIELSEN K., *Quantification of anticipated future changes in high resolution design rainfall for urban areas*, Atmos. Res. 2009, Vol. 92(3), 350–363.
- [74] OTTER J., KÖNIGER W., *Bemessungsregen für Kanalnetz, Regenüberläufe und Regenbecken*, Gas-Wasser-Abwasser 1986, Nr. 66, 124–128.
- [75] OZGA-ZIELIŃSKA M., BRZEZIŃSKI J., *Hydrologia stosowana*, PWN, Warszawa 1997.
- [76] PAN C., WANG X., LIU L., HUANG H., WANG D., *Improvement to the Huff Curve for Design Storms and Urban Flooding Simulations in Guangzhou, China*, Water 2017, Vol. 9, No. 6, 411.
- [77] PN-EN 752: 2017: Drain and sewer systems outside buildings – Sewer system management. PKN, Warszawa 2017.
- [78] POWELL D.N., KHAN A.A., AZIZ N.M., RAIFORD J.P., *Dimensionless rainfall patterns for South Carolina*, Journal of Hydrologic Engineering 2007, Vol. 12, No. 1, 130–133.
- [79] SCHILLING W., *Univariate versus Multivariate Rainfall Statistics – Problems and Potentials (A Discussion)*, Water Science and Technology 1984, Vol. 16, No. 8–9, 139–146.

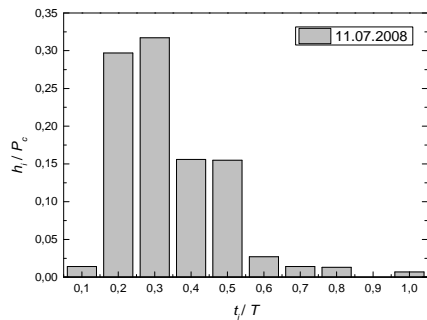
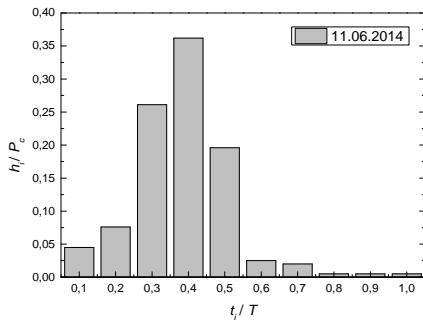
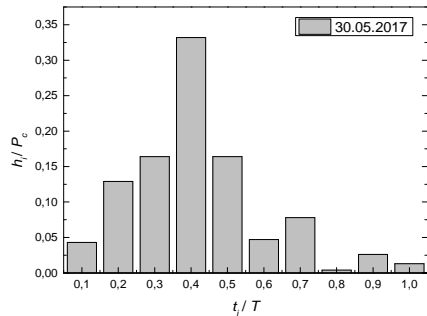
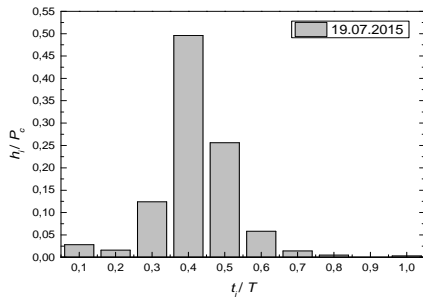
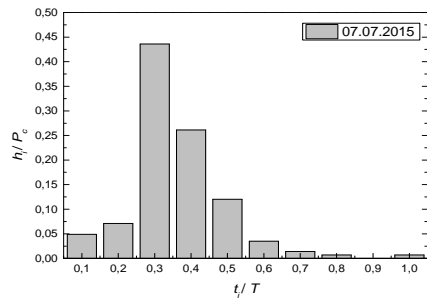
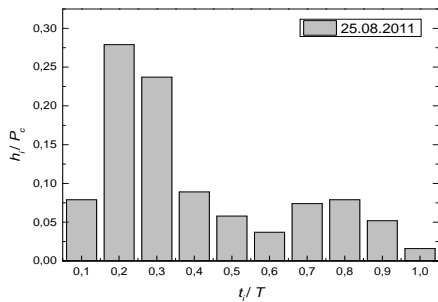
- [80] SCHMITT T.G., Komentarz do DWA – A 118 *Hydrauliczne wymiarowanie systemów odwadniających* (Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 *Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen*, DWA, Hennef 2000). Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa 2007.
- [81] SCHMITT T.G., THOMAS M., *Rechnerischer Nachweis der Überstauhäufigkeit auf der Basis von Modellregen und Starkregenserien*, KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 2000 (Jg. 47), Nr. 1, 63–69.
- [82] SCS, *Urban hydrology for small watersheds*, Engineering Division, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, Washington, DC, 1986.
- [83] SHARAFATI A., ZAHABIYOUN B., *Stochastic generation of storm pattern*, Life Science Journal 2013, Vol. 10, No. 1, 1575–1583.
- [84] SILVEIRA A.L.L. da., *Cumulative equations for continuous time Chicago hyetograph method*, RBRH 2016, Vol. 21, No. 3, 646–651.
- [85] SOCZYŃSKA U. (red.), *Hydrologia dynamiczna*, PWN, Warszawa 1997.
- [86] STAUFER P., LECKEBUSCH G., PINNEKAMP J., *Die Ermittlung der relevanten Niederschlagscharakteristik für die Siedlungsentwässerung im Klimawandel*, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2010 (Jg. 57), Nr. 12.
- [87] SULIGOWSKI R., *Struktura czasowa i przestrzenna opadów atmosferycznych w Polsce. Próba regionalizacji*, Prace Instytutu Geografii Akademii Świętokrzyskiej, nr 12, Kielce 2004.
- [88] SULIGOWSKI Z., *Zagospodarowanie wód opadowych. Szczególne problemy*, Forum Eksploatatora 2004, nr 3–4, 24–27.
- [89] SZYMKIEWICZ R., GĄSIOROWSKI D., *Podstawy hydrologii dynamicznej*, WNT, Warszawa 2010.
- [90] TERRANOVA O.G., IAQUINTA P., *Temporal properties of rainfall events in Calabria (southern Italy)*, Natural Hazards and Earth System Sciences 2011, Vol. 11, No. 3, 751–757.
- [91] THORND AHL S., WILLEMS P., *Probabilistic modelling of overflow, surcharge and flooding in urban drainage using the first-order reliability method and parameterization of local rain series*, Water Research 2008, Vol. 42, No. 1, 455–466.
- [92] TWARDOSZ R., *Dobowy przebieg opadów atmosferycznych w ujęciu synoptycznym na przykładzie Krakowa (1886–2002)*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2005.
- [93] VENEZIANO D., VILLANI P., *Best linear unbiased design hyetograph*, Water Resources Research 1999, Vol. 35, No. 9, 2725–2738.
- [94] WARTALSKA K.E., *Analiza hietogramów deszczów do modelowania działania kanalizacji* (praca dokt.), Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019.
- [95] WARTALSKA K., MICHAŁEC J., KAŻMIERCZAK B., *Symulacje hydrodynamiczne kanalizacji deszczowej na wybranym osiedlu mieszkaniowym w Głogowie*, Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska. t. 6 (red. A. Kotowski, K. Piekarska i B. Kaźmierczak), Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015, 404–418.
- [96] WARTALSKA K., NOWAKOWSKA M.W., KAŻMIERCZAK B., *Verification of storm water reservoirs operation in hydrodynamic modeling*, 9th IWA Eastern European Young Water Professionals Conference (red. M. Feierabend, O. Novytska, V. Bakos), Budapeszt, 24–27.05.2017, 526–533.
- [97] WATT W.E., CHOW K.C.A., HOGG W.D., LATHAM K.W., *A 1-h urban design storm for Canada*, Canadian Journal of Civil Engineering 1986, Vol. 13, No. 3, 293–300.
- [98] WDOWIKOWSKI M., KAŻMIERCZAK B., DĄBEK P.B., KOTOWSKI A., *Analiza rozkładów prawdopodobieństwa maksymalnych wysokości opadów w dorzeczu Górnej i Środkowej Odry*, Technologia Wody 2017, nr 3 (53), 4–13.
- [99] WENZEL JR H.G., VOORHEES M.L., *Evaluation of the urban design storm concept*, Final report to the Office of Water Research and Technology, Department of the Interior, Washington, D.C., Research Report No. 164, Water Resources Center, University of Illinois, 1981.

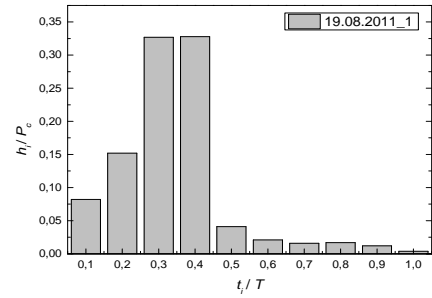
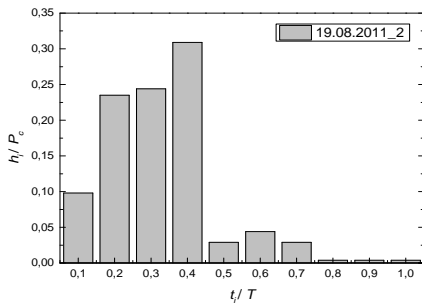
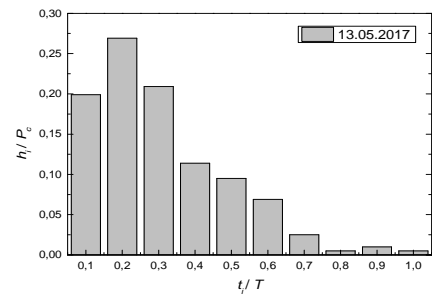
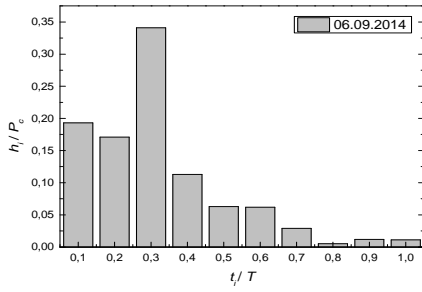
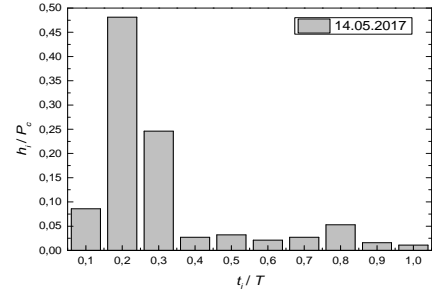
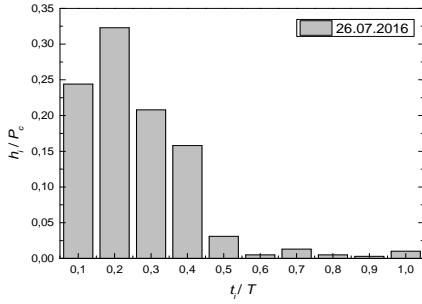
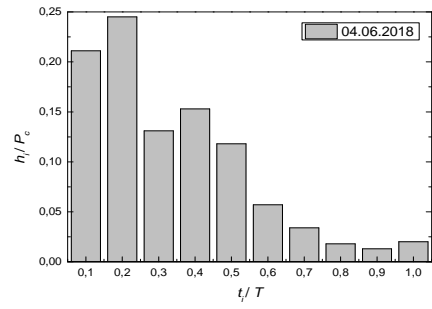
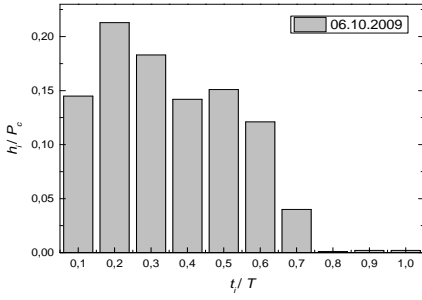
- [100] WĘGLARCZYK S., *Statystyka w inżynierii środowiska. Podręcznik dla studentów szkół wyższych*, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010.
- [101] WIERZCHOŃ S., KŁOPOTEK M., *Algorytmy analizy skupień*, Wyd. WNT, Warszawa 2015.
- [102] WIĘZIK B., *Prognostyczny model odpływu ze zlewni*, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Monografia 67, Kraków 1988.
- [103] WILLIAMS-SETHUR T., *Empirical, dimensionless, cumulative-rainfall hyetographs developed from 1959–1986 storm data for selected small watersheds in Texas*, US Geological Survey, No. 2004–5075, 2004.
- [104] WU S.J., YANG J.C., TUNG Y.K., *Identification and stochastic generation of representative rainfall temporal patterns in Hong Kong territory*, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 2006, Vol. 20, No. 3, 171–183.
- [105] WYNN J.K., *Seasonal and geographic variability in rainstorm parameter distributions*, (praca magisterska, prom. D. Entekhabi), Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [106] ZAWILSKI M., BRZEZIŃSKA A., *Spatial rainfall intensity distribution over an urban area and its effect on a combined sewerage system*, 12th International Conference on Urban Drainage, 11–16 September 2011, Porto Alegre, Brazil.
- [107] ZAWILSKI M., SAKSON G., *Modelowanie sphywu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2010, nr 11, 32–36.

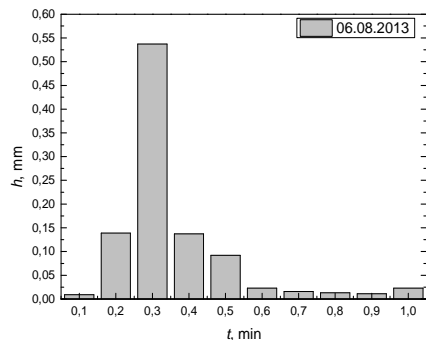
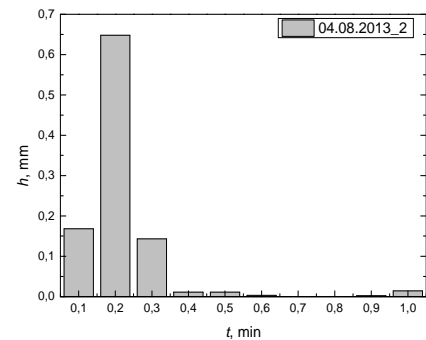
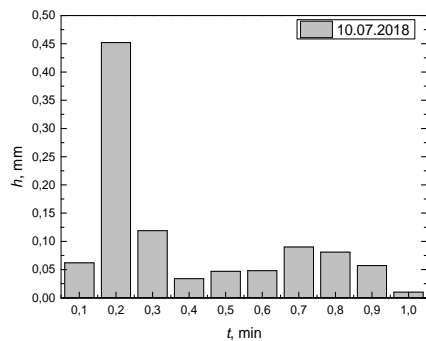
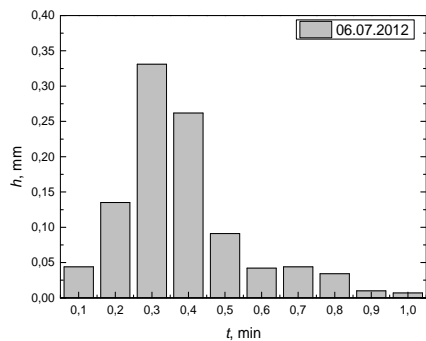
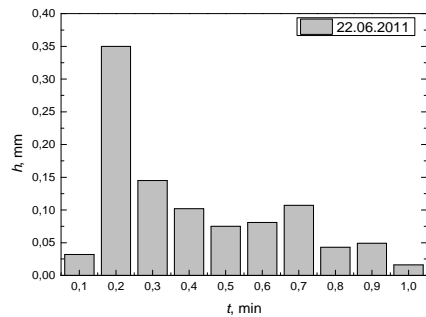
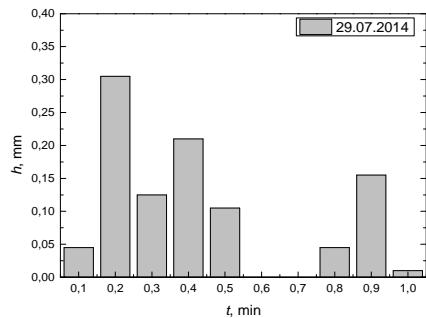
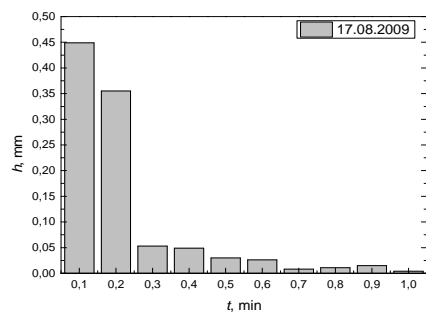
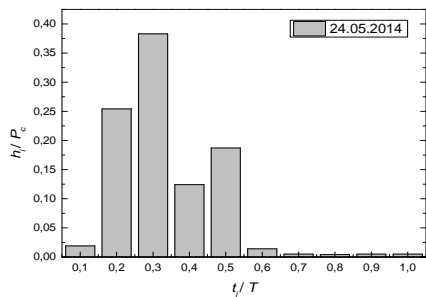
Załączniki

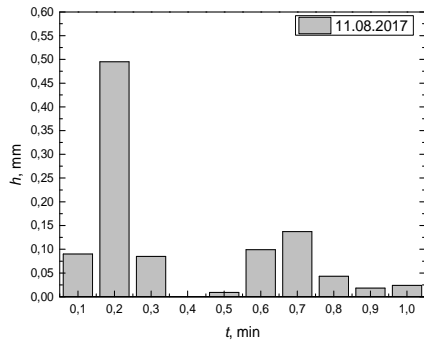
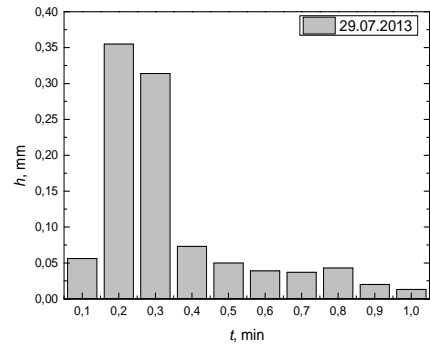
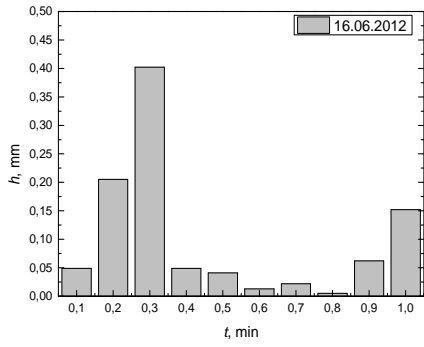
Załącznik 1

Hietogramy bezwymiarowe 25 analizowanych opadów – 15 K i 10 F o $T \leq 180$ min dla Jeleniej Góry



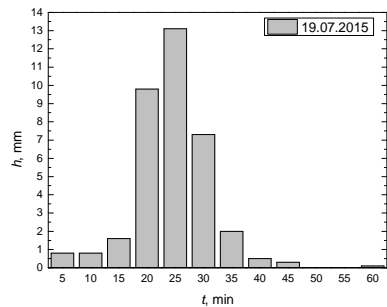
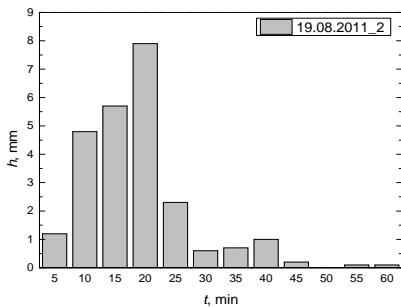
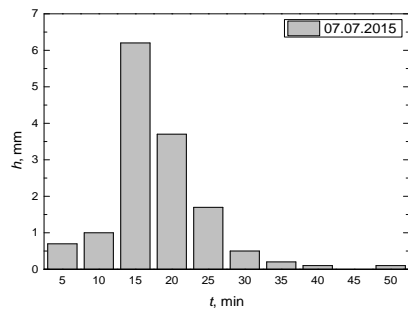
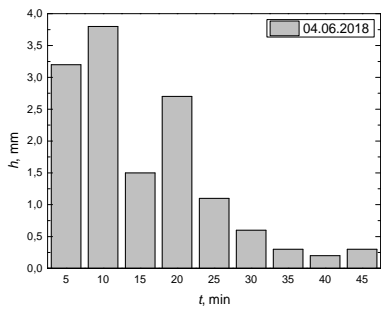
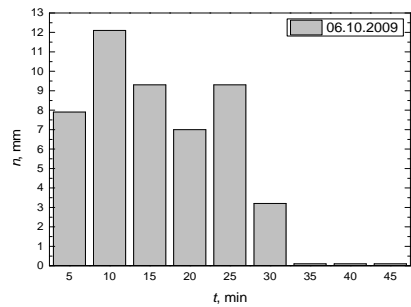
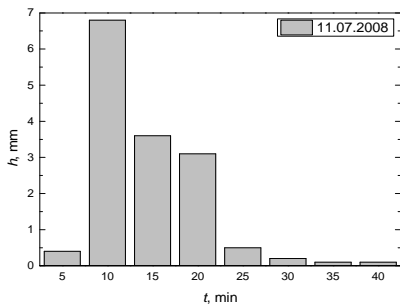


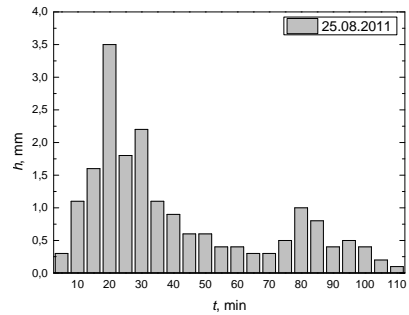
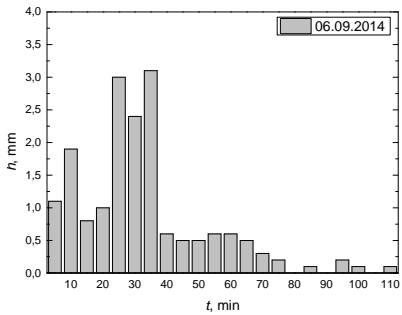
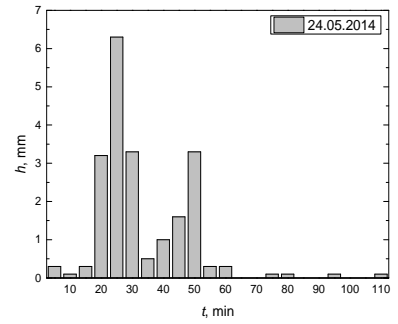
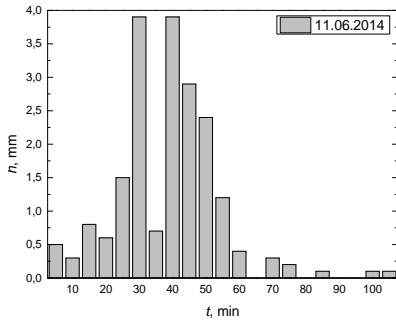
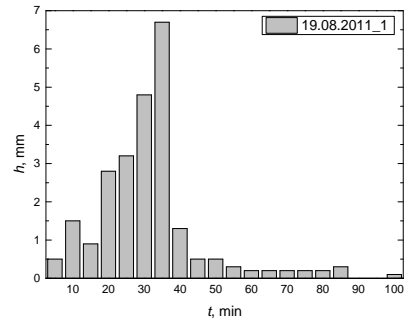
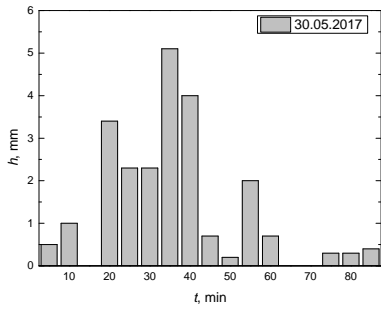
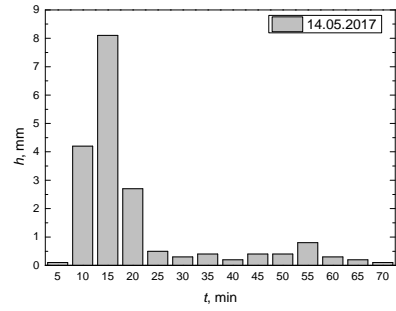
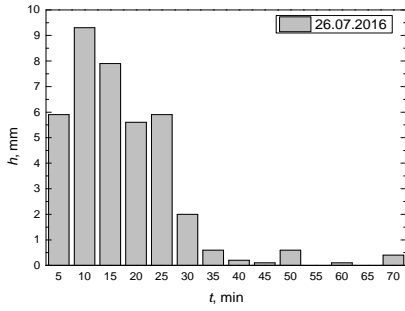


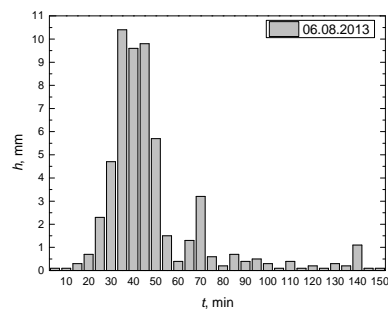
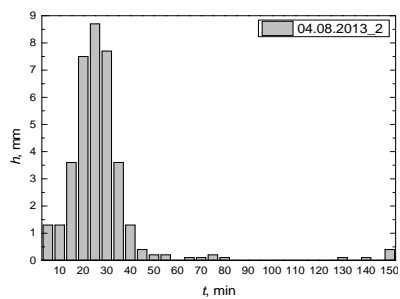
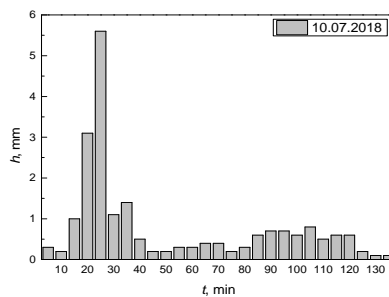
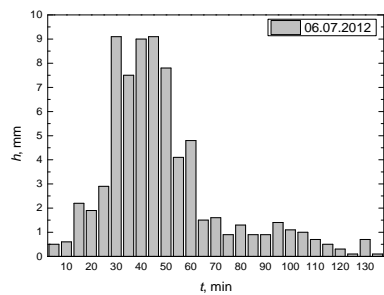
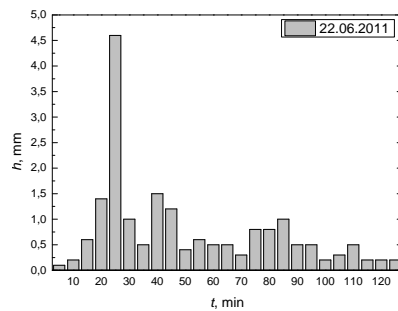
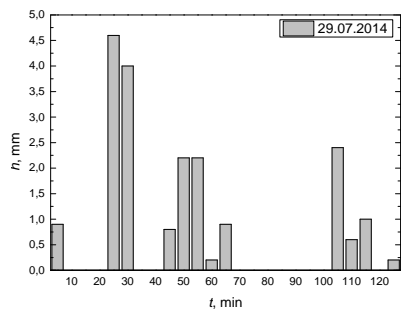
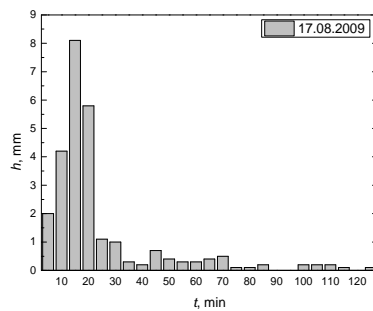
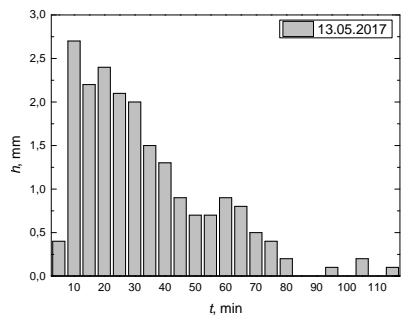


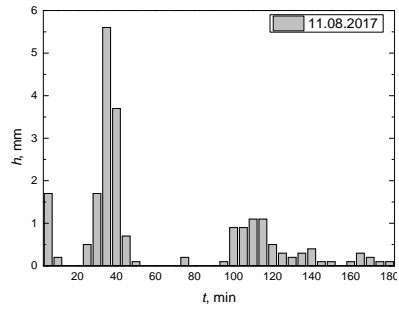
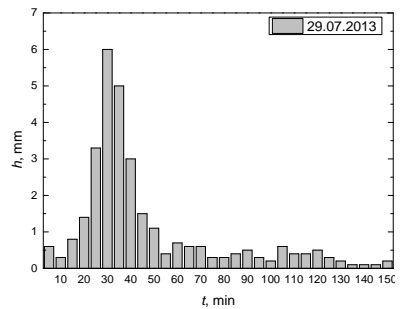
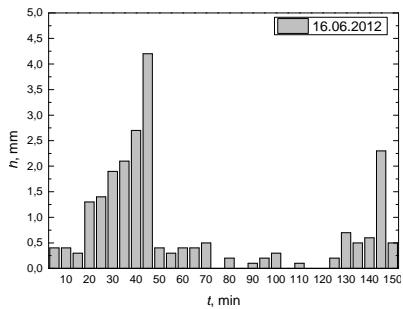
Załącznik 2

Hietogramy wymiarowe 25 analizowanych opadów – 15 K i 10 F o $T \leq 180$ min dla Jeleniej Góry



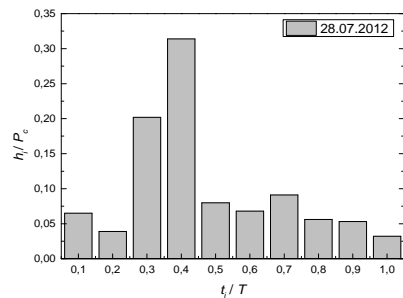
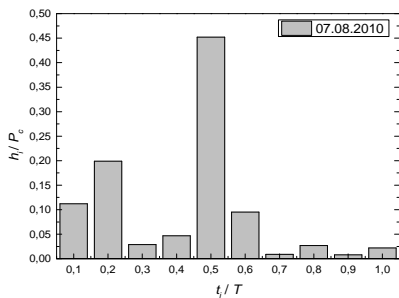
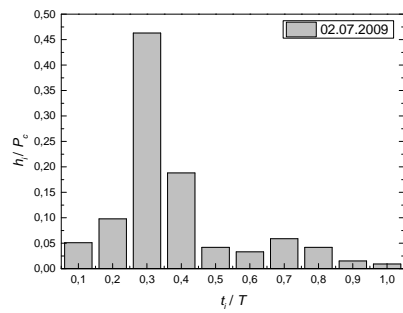
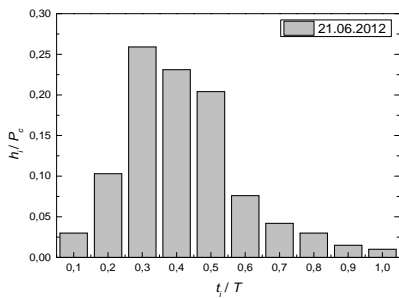
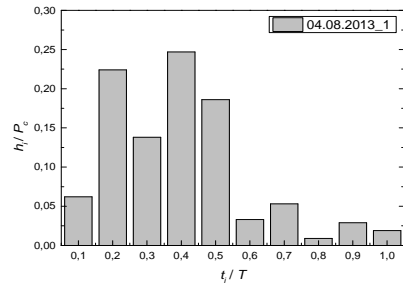
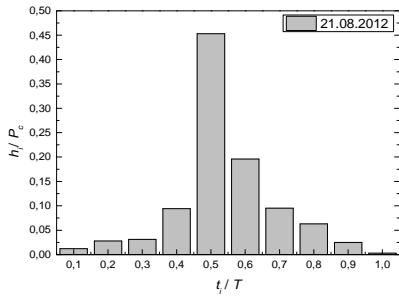


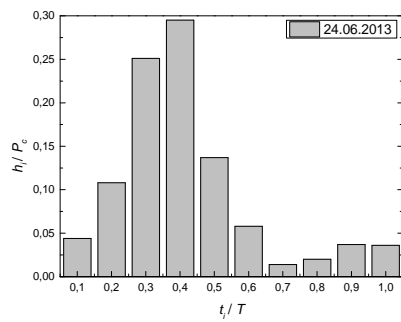
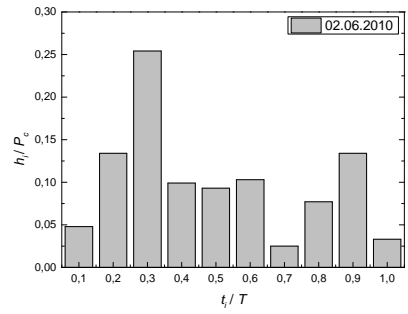
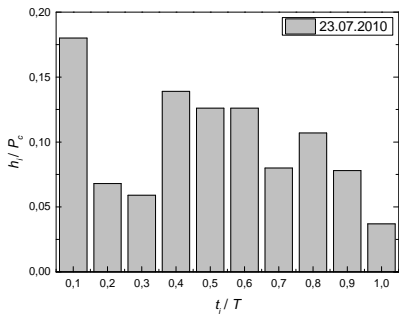
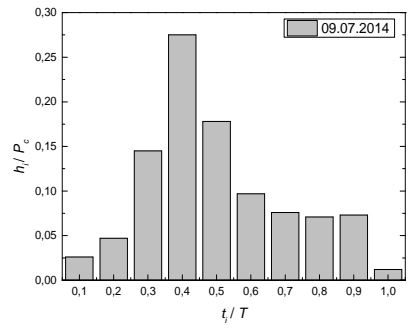
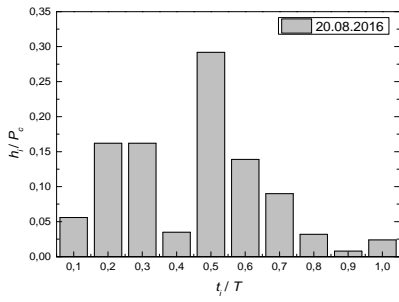
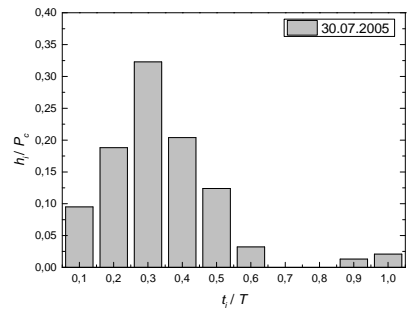
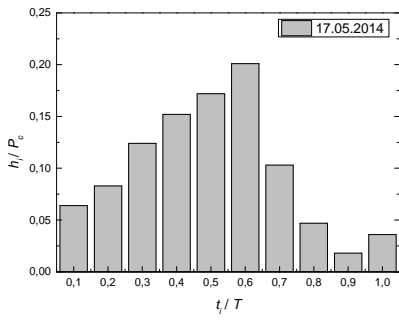




Załącznik 3

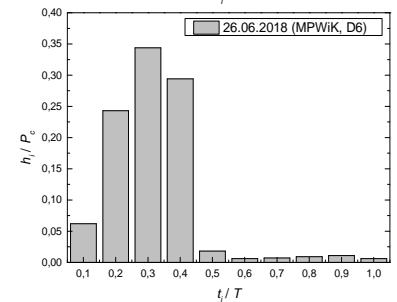
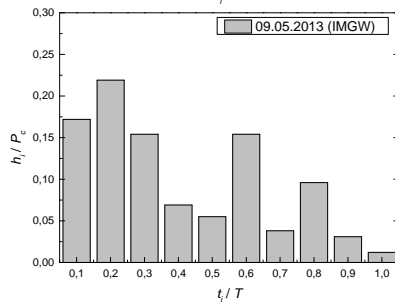
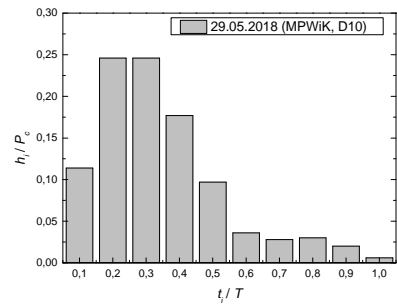
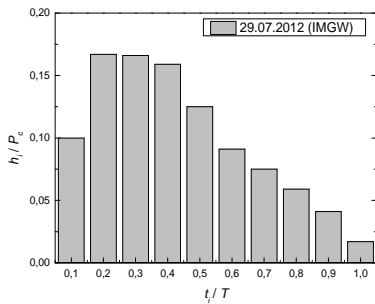
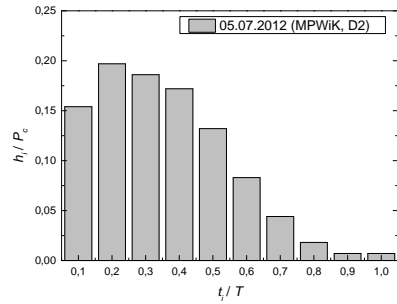
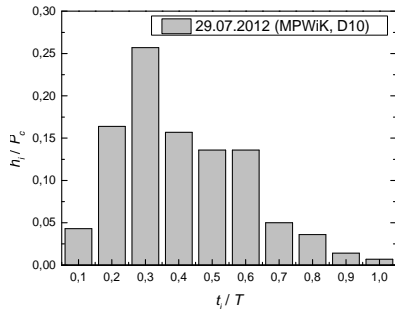
Hietogramy bezwymiarowe 13 analizowanych opadów – 10 F o $T > 180$ min i 3 N dla Jeleniej Góry

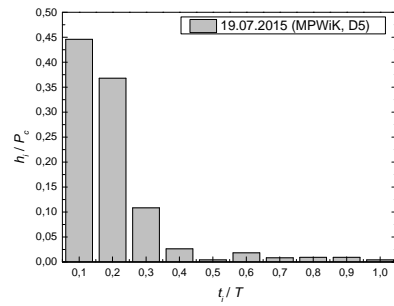
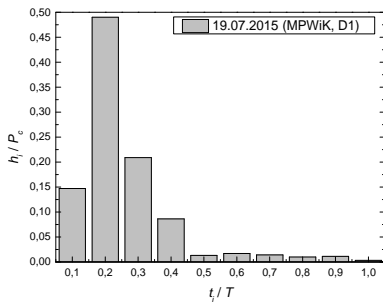
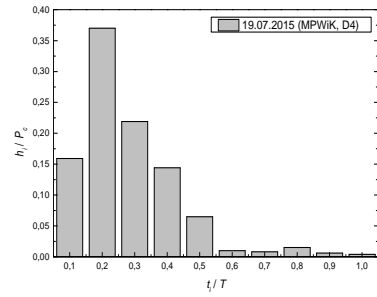
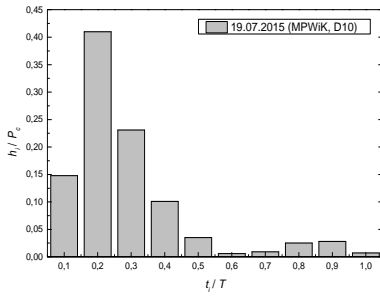
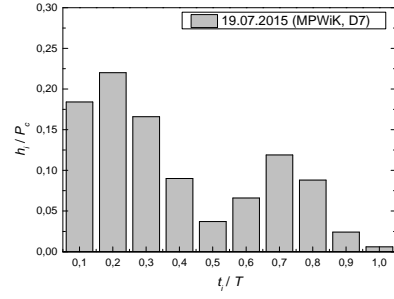
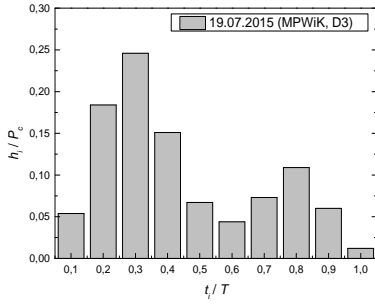
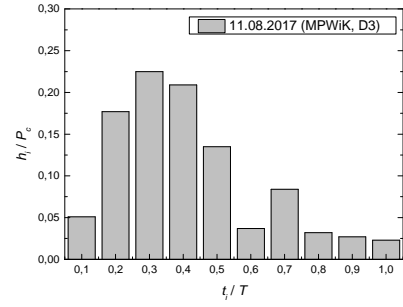
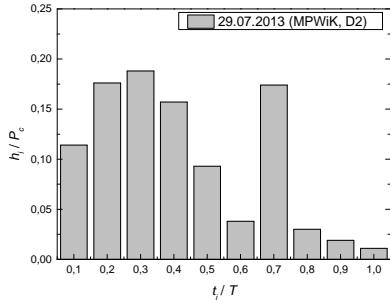


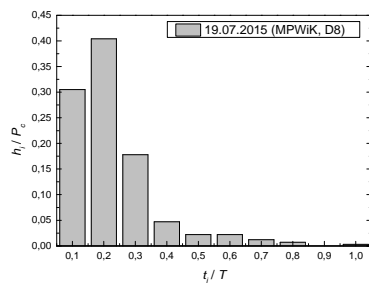
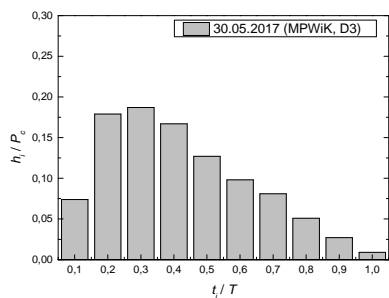
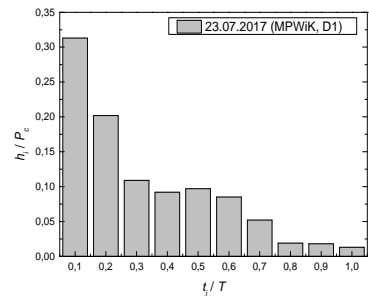
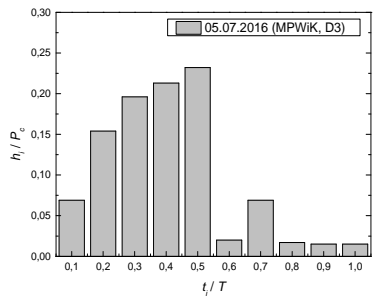
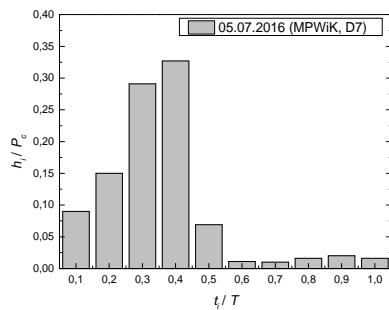
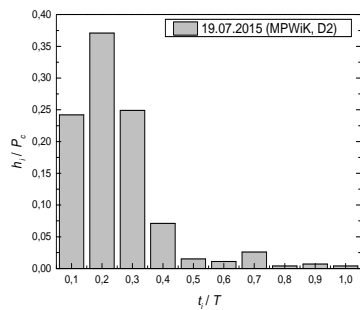
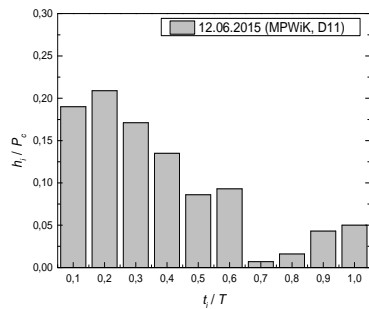
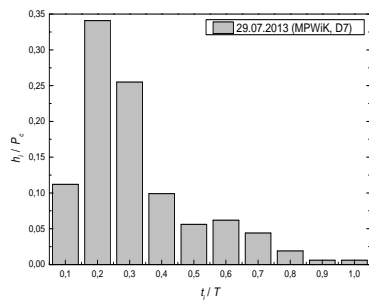


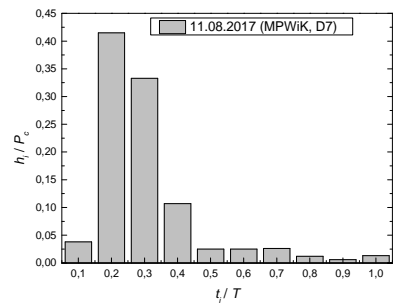
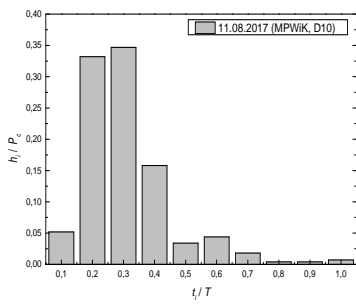
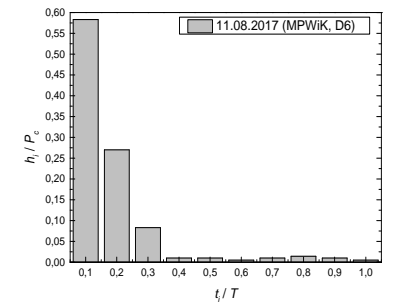
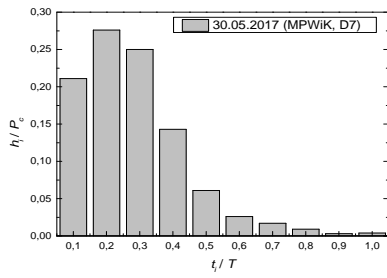
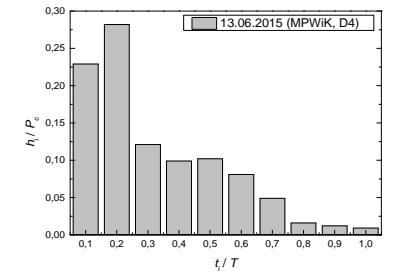
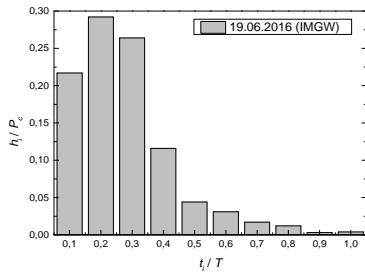
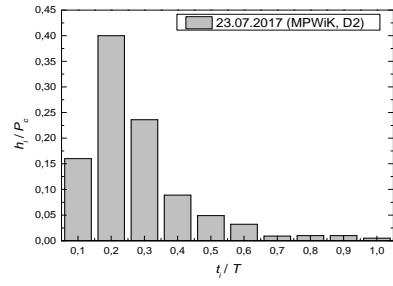
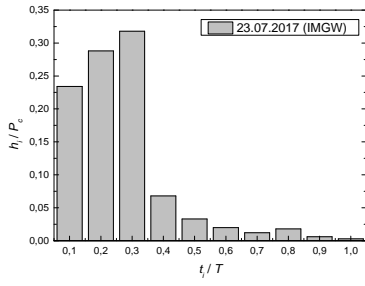
Załącznik 4

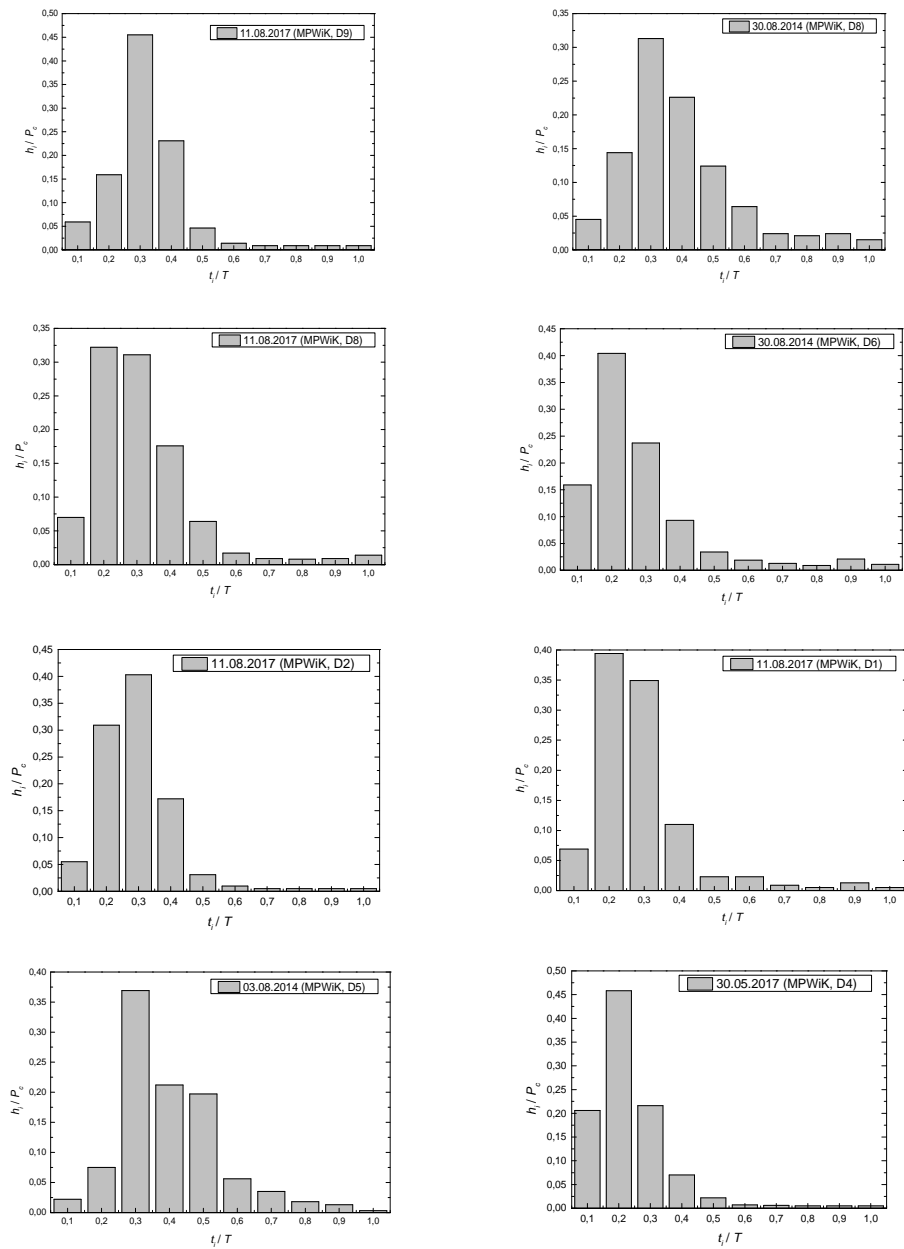
Hietogramy bezwymiarowe 51 analizowanych opadów – 48 K i 3 F o $T < 150$ min dla Wrocławia

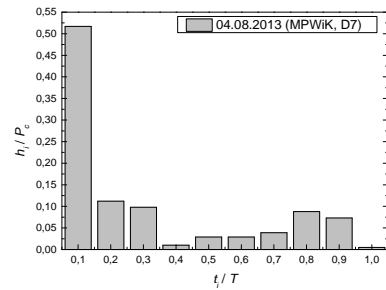
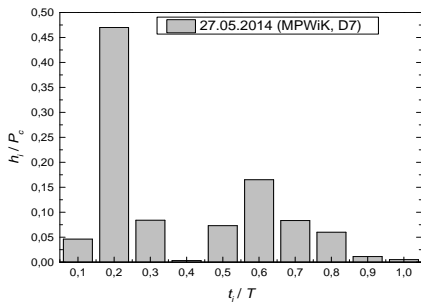
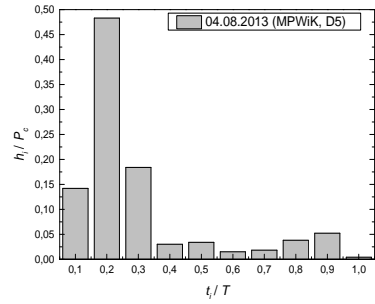
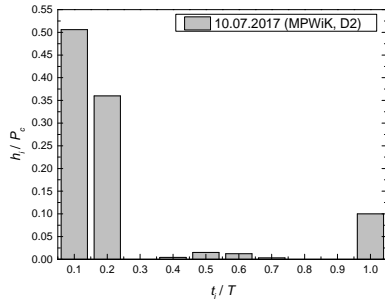
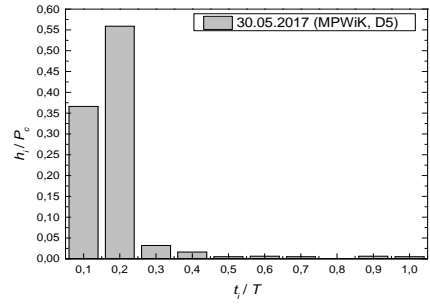
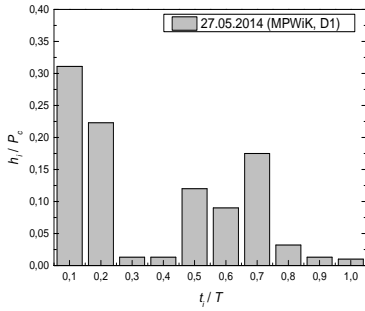
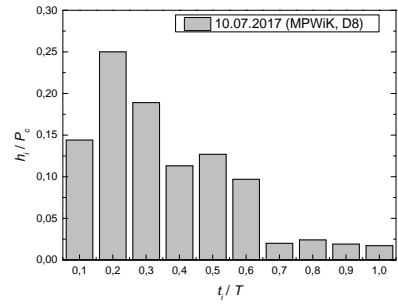
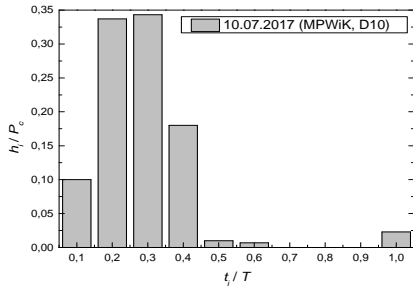


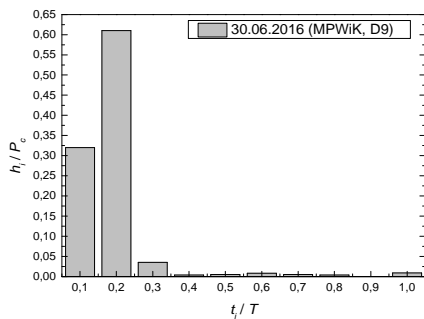
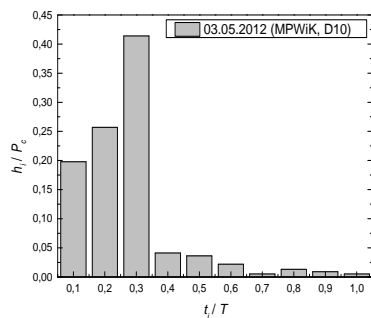
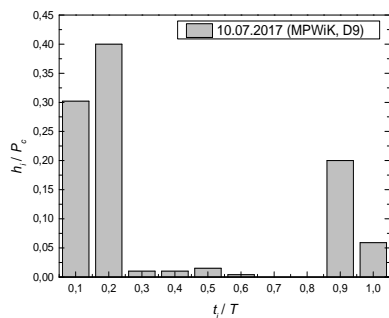
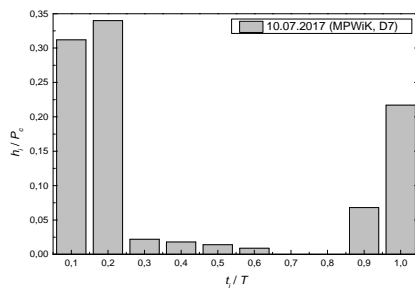
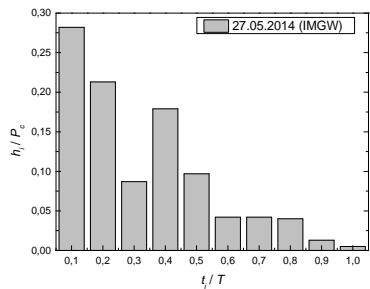






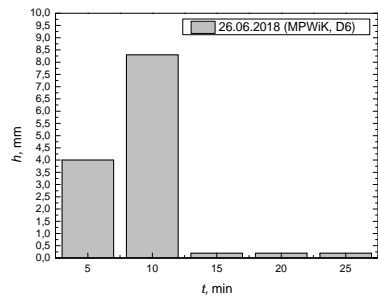
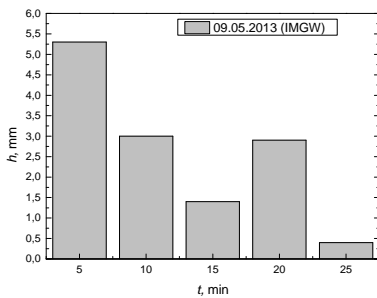
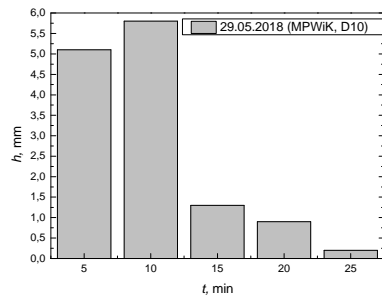
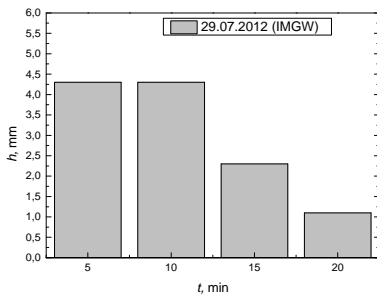
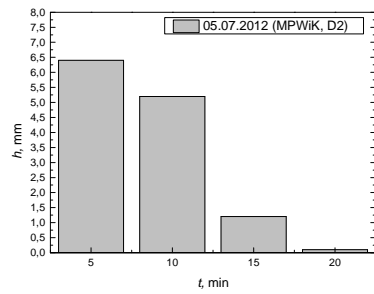
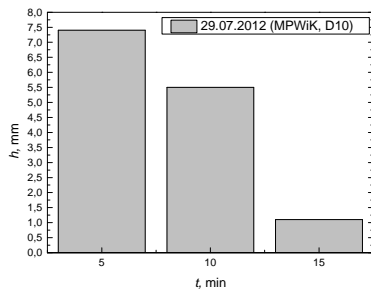


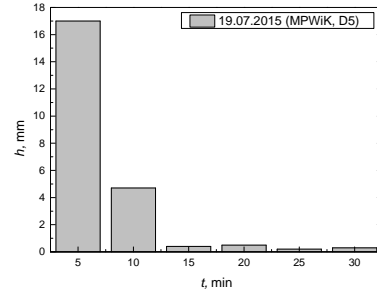
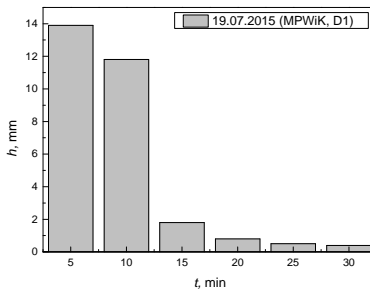
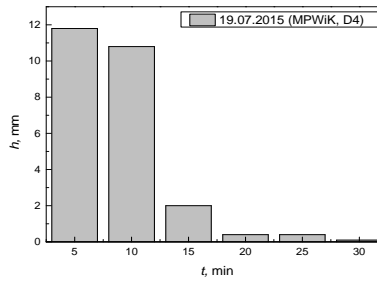
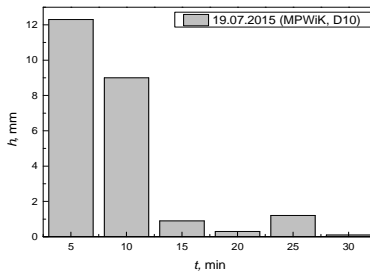
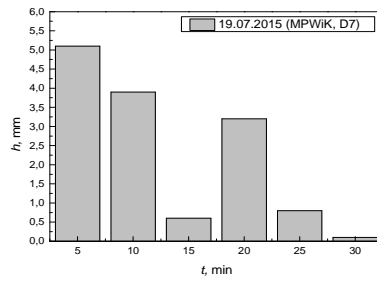
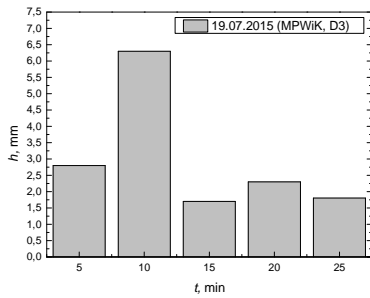
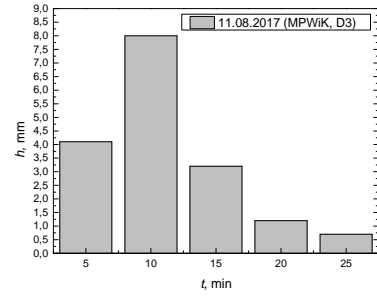
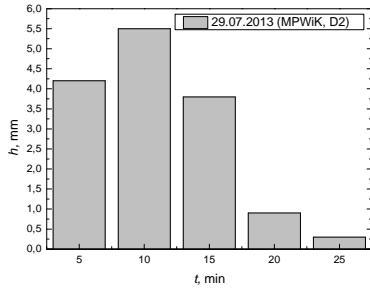


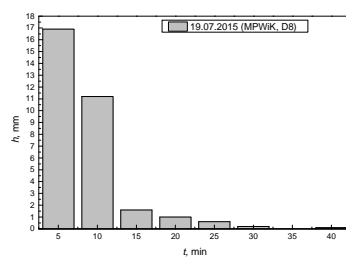
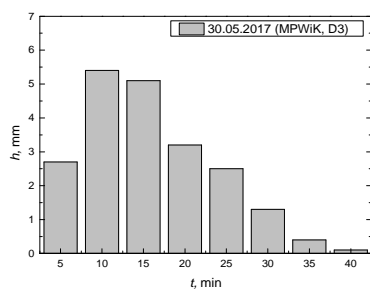
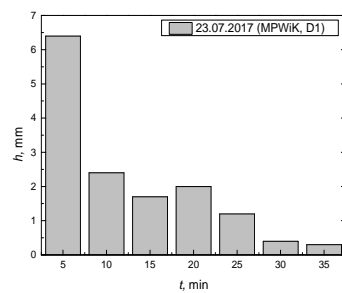
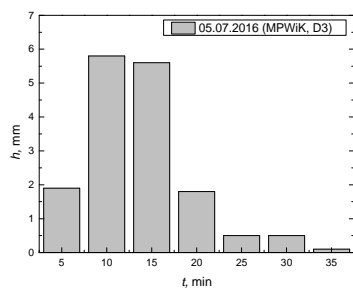
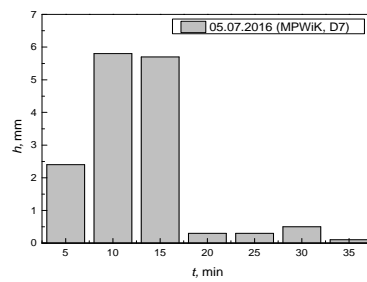
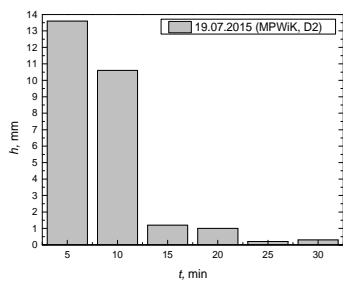
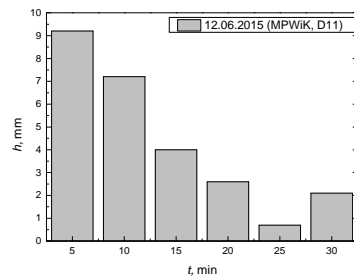
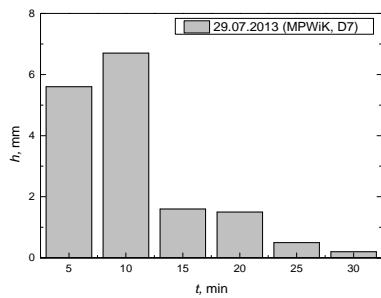


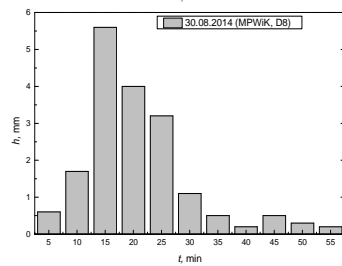
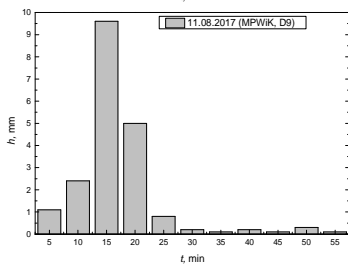
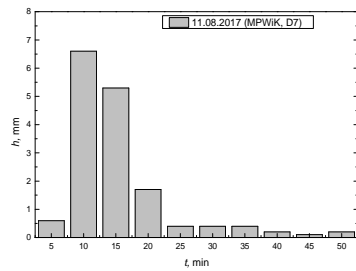
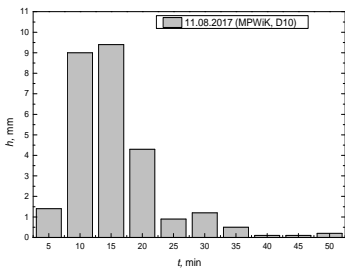
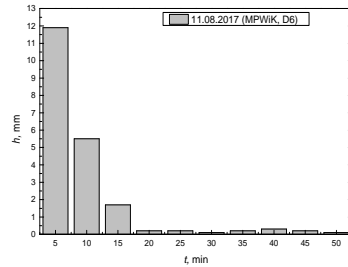
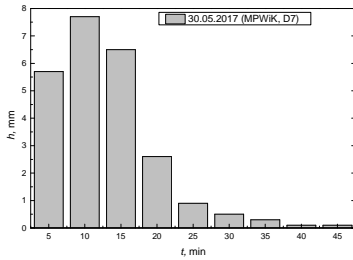
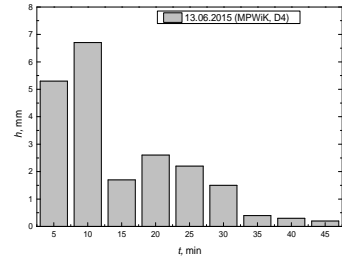
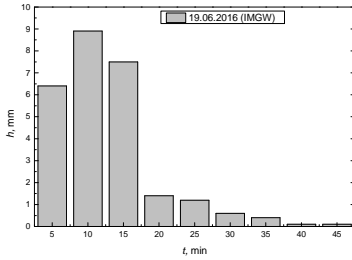
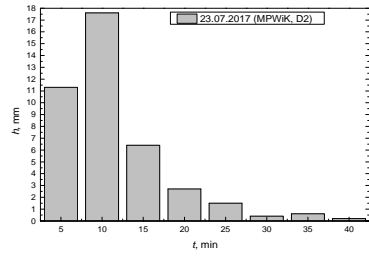
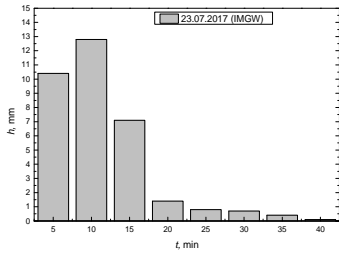
Załącznik 5

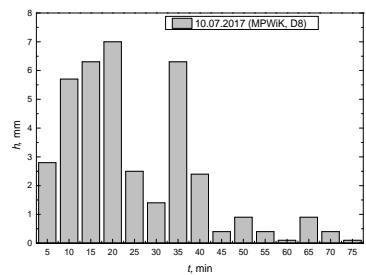
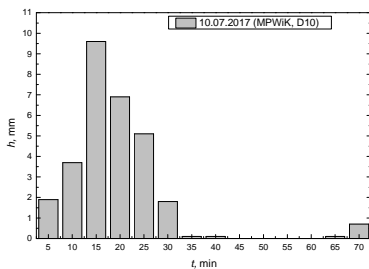
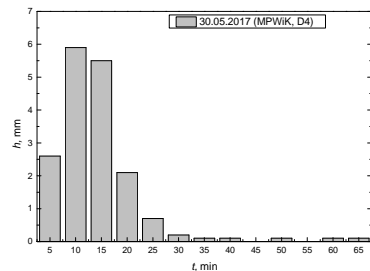
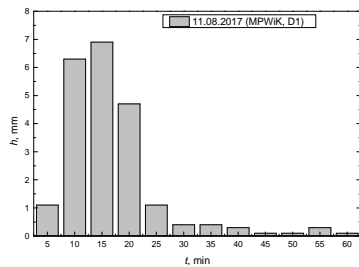
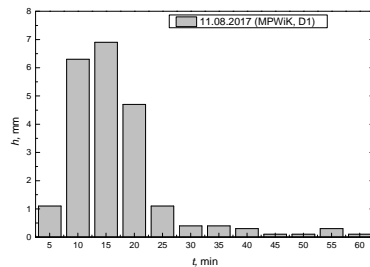
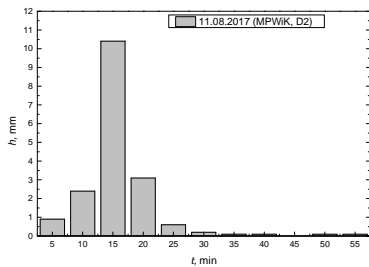
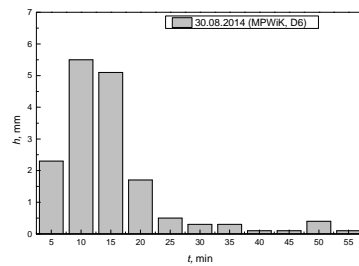
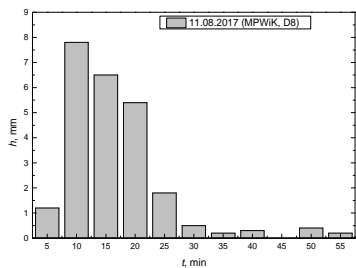
Hietogramy wymiarowe 51 analizowanych opadów – 48 K i 3 F o $T < 150$ min dla Wrocławia

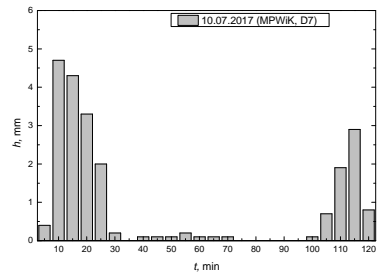
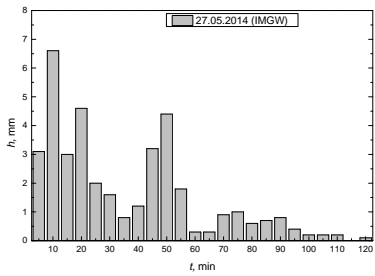
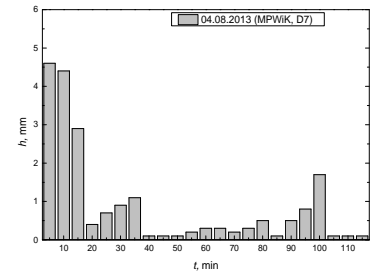
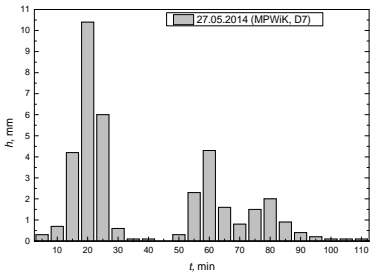
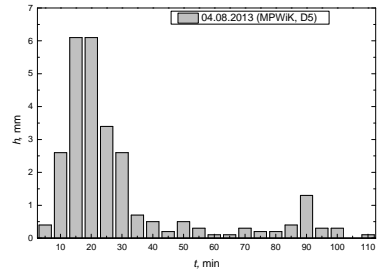
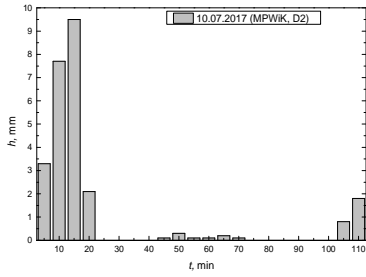
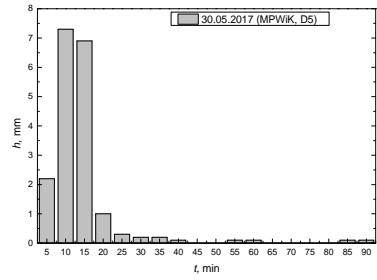
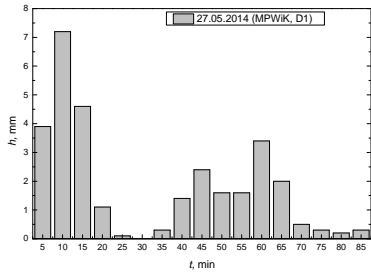


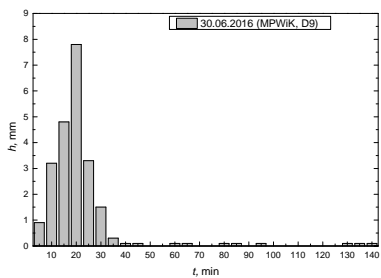
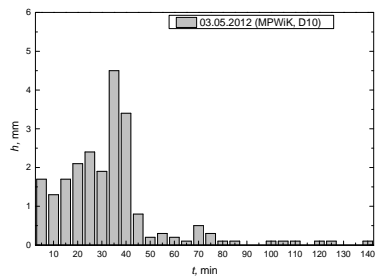
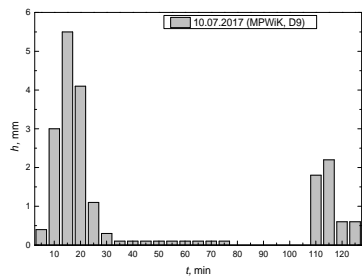






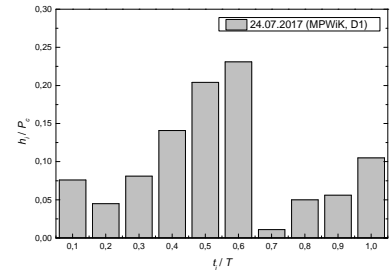
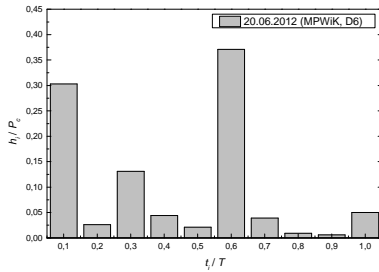
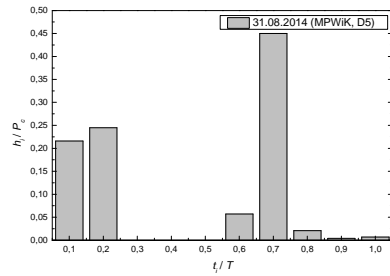
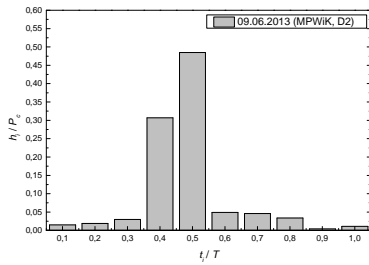
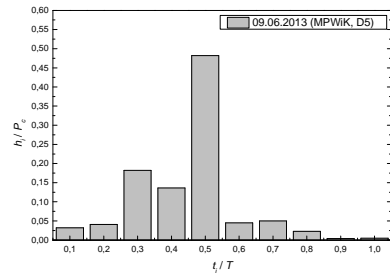
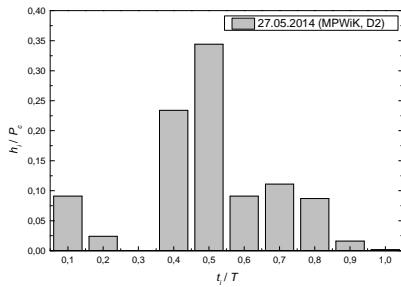


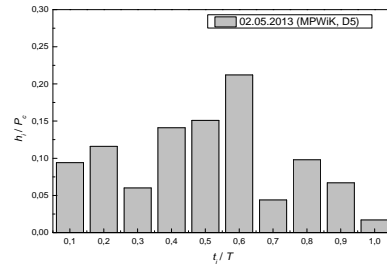
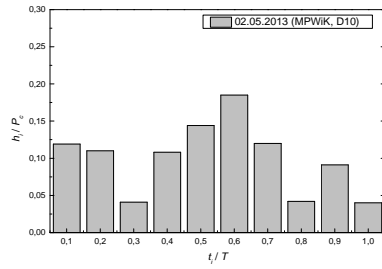
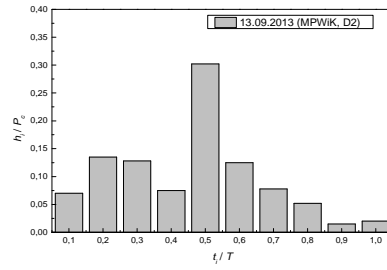
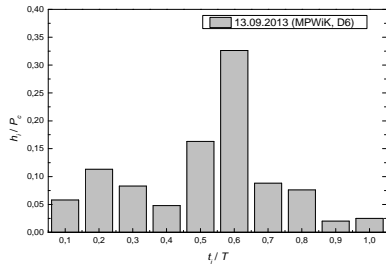
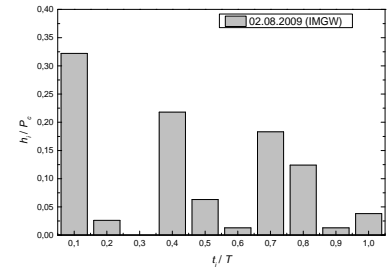
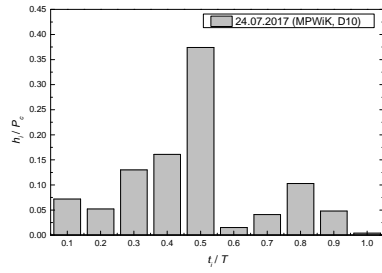
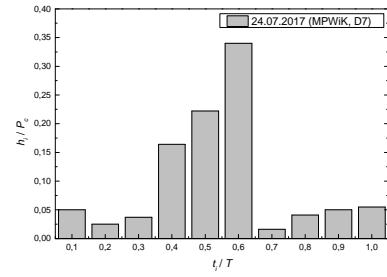
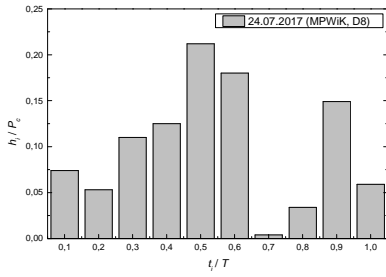




Załącznik 6

Hietogramy bezwymiarowe 14 analizowanych opadów – 9 F o $T > 150$ min i 5 N dla Wrocławia





Methodology for creating precipitation patterns for modeling of land drainage

Due to the lack of reliable precipitation patterns in Poland, Euler type II or DVWK model rainfalls used in Germany are recommended for modeling the rainfall-runoff phenomenon. However, there is no verification of the shape of these models in Polish climatic conditions. The purpose of the research was to develop and test a methodology for analyzing the shapes of local hyetographs used to verify precipitation patterns applied for modeling the reliability of land drainage systems. Precipitation data from 2 characteristic measurement networks were selected for testing: mountain – IMGW-PIB in Jelenia Góra and lowland – IMGW-PIB and MPWiK in Wrocław. The scope of research included: selection of methods for determining the independence of precipitation phenomena and precipitation grouping for qualitative analyzes of the similarity of local rainfall hyetographs; Defining mass distribution and unevenness in time indicators of local precipitation for quantitative analyzes of similarities in the shapes of Euler type II and DVWK reference hyetographs in dimensionless and dimensional forms; Qualitative and quantitative analysis of the similarity of local hyetograph shapes to Euler type II and DVWK standards, including genetic precipitation types: convective (K), frontal (F) and low-pressure (N) and exceedance frequency classes: $C \geq 1$ year, $C \geq 2$ years, $C \geq 5$ years, $C \geq 10$ years; Verification of Euler type II and DVWK pattern shapes for local precipitation, with generalization of test results for mountain and lowland stations.

In order to isolate independent precipitation phenomena, the own methodology for determining precipitation intervals (MDPD) was proposed. For statistical analyses, precipitations with frequencies exceeding $C(T) \geq 1$ year were selected, based on established DDF precipitation time series for selected stations. Three research methods were proposed for rainfall grouping due to the similarity of physical characteristics of hyetographs: Huff, cluster analysis using the Ward method and the k -means method. These methods, and especially the k -means method, proved to be useful for precipitation selection (K, F, and N). Statistical analysis of the similarity of local shapes of hyetographs was performed within the separated $k = 4$ clusters, based on calculations of parameters describing: geometrical location of the peaks, mass distributions and unevenness of intensity over time, defined by 6 indicators. The results of comparative analyses showed differences in the shape of local hyetographs relative to Euler type II standards, and especially DVWK. On this basis, detailed forms of model precipitation patterns for the studied stations have been proposed, which has scientific and practical significance.

Spis treści

Wykaz oznaczeń	5
Wykaz akrominów	7
1. Wprowadzenie	9
2. Podstawy modelowania opadów	15
2.1. Ogólna charakterystyka opadów deszczowych	15
2.2. Wybrane zagadnienia badawcze w modelowaniu opadów	19
2.2.1. Definiowanie niezależnych zjawisk opadowych	19
2.2.2. Metody tworzenia szeregów czasowych typu DDF/IDF	21
2.2.3. Metody tworzenia hietogramów wzorcowych bazujące na krzywych IDF	24
2.2.4. Metody tworzenia hietogramów wzorcowych bazujące na rzeczywistych opadach	28
2.3. Podsumowanie stanu wiedzy, cel i zakres badań	36
3. Materiał badawczy i metoda analiz	39
3.1. Charakterystyka stacji i ciągów pomiarowych opadów	39
3.2. Metodyka badań hietogramów	41
3.2.1. Kryteria dyskretyzacji czasowej niezależności opadów	41
3.2.2. Kryteria wyboru parametrów opadów do analiz statystycznych	43
3.2.3. Metody grupowania opadów do analiz jakościowych hietogramów	44
3.2.4. Wskaźniki do analiz ilościowych hietogramów	46
4. Wyniki badań hietogramów ze stacji IMGW-PIB Jelenia Góra	49
4.1. Charakterystyka materiału badawczego	49
4.2. Grupowanie opadów ze względu na kształt hietogramów bezwymiarowych	51
4.2.1. Analiza grupowań metodą Huffa	51
4.2.2. Analiza skupień metodą Warda	55
4.2.3. Analiza skupień metodą k -średnich	58
4.2.4. Wybór opadów do weryfikacji hietogramów wzorcowych	62
4.3. Analiza ilościowa kształtów hietogramów wzorcowych	63
4.3.1. Weryfikacja wzorca Eulera typu II w układzie bezwymiarowym	63
4.3.2. Weryfikacja wzorca Eulera typu II w układzie wymiarowym	67
4.3.3. Weryfikacja wzorca DVWK w układzie bezwymiarowym	72
5. Wyniki badań hietogramów ze stacji IMGW-PIB i MPWiK we Wrocławiu	75
5.1. Charakterystyka materiału badawczego	75
5.2. Grupowanie opadów ze względu na kształt hietogramów bezwymiarowych	77
5.2.1. Analiza grupowań metodą Huffa	77
5.2.2. Analiza skupień metodą Warda	81
5.2.3. Analiza skupień metodą k -średnich	84
5.2.4. Wybór opadów do weryfikacji hietogramów wzorcowych	87
5.3. Analiza ilościowa kształtów hietogramów wzorcowych	88

5.3.1. Weryfikacja wzorca Eulera typu II w układzie bezwymiarowym	88
5.3.2. Weryfikacja wzorca Eulera typu II w układzie wymiarowym	93
5.3.3. Weryfikacja wzorca DVWK w układzie bezwymiarowym	98
6. Uogólnienie wyników badań hietogramów wzorcowych	103
6.1. Hietogramy wzorcowe opadów konwekcyjnych dla badanych stacji	103
6.1.1. Uszczegółowiony wzorzec Eulera typu II dla Jeleniej Góry	103
6.1.2. Uszczegółowiony wzorzec Eulera typu II dla Wrocławia	105
6.2. Hietogramy wzorcowe opadów frontalnych i niżowych dla badanych stacji	107
6.2.1. Uszczegółowiony wzorzec DVWK dla Jeleniej Góry	107
6.2.2. Uszczegółowiony wzorzec DVWK dla Wrocławia	109
7. Podsumowanie i wnioski końcowe	113
Literatura	115
Załączniki	121
Streszczenie w języku angielskim	151

Badanie niezawodności działania systemów kanalizacji deszczowej w modelowaniu hydrodynamicznym wymaga przyjęcia wiarygodnych scenariuszy lokalnych opadów. Mogą nimi być zarówno rzeczywiste, zmierzone w wieloletniej intensywności deszcze, jak i tworzone na ich podstawie hietogramy wzorcowe. Ze względu na brak w Polsce takich scenariuszy do modelowania zjawiska opad–odpływ zaleca się wykorzystanie wzorców stosowanych w Niemczech.

W monografii dokonano oceny zmian intensywności opadów w czasie oraz opracowano uniwersalną metodykę tworzenia wzorców opadów do zastosowań naukowych i praktycznych. Badania przeprowadzono na podstawie danych dotyczących opadów z dwóch stacji pomiarowych IMGW-PIB: górskiej w Jeleniej Górze i nizinnej we Wrocławiu. Na tej podstawie opracowano i przedstawiono w pracy wzorce opadów o charakterze konwekcyjnym oraz frontalnym i niżowym dla badanych stacji.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej są do nabycia w księgarni
ul. C.K. Norwida 9, 50-374 Wrocław, tel. 71 328 08 95
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową: zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-122-9