P O L S K A A K A D E M I A N A U K
K O M I T E T I N Ż Y N I E R I I L Ą D O W E J I W O D N E J
I N S T Y T U T P O D S T A W O W Y C H P R O B L E M Ó W T E C H N I K I

STUDIA Z ZAKRESU INŻYNIERII
NR 68

ANDRZEJ KOTOWSKI, BARTOSZ KAŹMIERCZAK,
ANDRZEJ DANCEWICZ

MODELOWANIE OPADÓW DO WYMIAROWANIA KANALIZACJI

WARSZAWA 2010

Rada redakcyjna

H. Bałuch, A. M. Brandt (przewodniczący), L. Czarnecki, E. Dembicki,
A. Garstecki, J. Głomb, S. Kajfasz, P. Kowalik, Z. Mendera

Komitet Redakcyjny

J. Bień, W. Brilon (Niemcy), J. Chróścielewski, L. Courard (Belgia),
A.G. Davenport (Kanada), A. Garbacz, W. Gilewski (redaktor naczelny),
M. Giżejowski, O. Kapliński, J. Kawecki, P. Klemm, M. Knauff, L. Kucharska,
W. Marks, Z. Młynarek, A.S. Nowak (USA), A. Siemiańska-Lewandowska,
A.P. Tarko (USA), M. Tracz, E.K. Zavadskas (Litwa)

Redaktor naukowy tomu

Andrzej Kotowski

Recenzenci

Józef Dziopak, Marian Kwietniewski, Janusz Łomotowski

Adres Redakcji

00-049 Warszawa, ul. Świętokrzyska 21, IPPT

Pracę zrealizowano ze środków finansowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przyznanych na podstawową działalność statutową Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej w 2008 i 2009 roku

Monografia przygotowana pod patronatem
Podsekcji Inżynierii Sanitarnej
Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk

© Copyright by Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN
Warszawa 2010

SPIS TREŚCI

SPIS OZNACZEŃ……... 5

1. Wprowadzenie……. 6

2. Dyskusja modeli opadów do projektowania odwodnień terenów……... 10

2.1. Modele opadów o zasięgu ogólnopolskim……... 10

2.1.1. Model Reinholda z 1940 roku…….. 10

2.1.2. Model Błaszczyka z 1954 roku……..... 10

2.1.3. Model Chomicza z 1953 roku…….. 11

2.1.4. Model Lambora z 1953 roku…… 12

2.1.5. Model Bogdanowicz i Stachy z 1998 roku……... 13

2.1.6. Atlasy opadów ……...…….. 15

2.2. Modele opadów o zasięgu lokalnym – dla Wrocławia……. 16

2.2.1. Drugi model Lambora z 1953 roku……..… 16

2.2.2. Model Wołoszyna z 1961 roku……. 17

2.2.3. Model Sowińskiego z 1980 roku…….. 17

2.2.4. Model Licznara i Łomotowskiego z 2005 roku……...… 18

2.3. Porównanie modelu Błaszczyka z innymi modelami opadów……. 19

2.4. Doraźne zalecenia do projektowania odwodnień terenów w Polsce……..... 23

3. Metody badawcze i materiał pluwiograficzny Wrocławia-Strachowic……... 26

3.1. Ogólna charakterystyka opadów deszczu……. 26

3.2. Materiał pluwiograficzny z lat 1960-2009……... 29

3.3. Kryteria wyboru opadów do analiz statystycznych…….. 31

3.4. Charakterystyka ilościowo-jakościowa materiału badawczego……...…… 35

3.5. Czasoprzestrzenne zróżnicowanie opadów atmosferycznych ……...…….. 38

3.5.1. Średnie roczne wysokości opadów w skali Polski……... 38

3.5.2. Średnie roczne wysokości opadów w skali Dolnego Śląska ……... 40

3.5.3. Średnie roczne wysokości opadów w skali aglomeracji wrocławskiej…… 41

4. Analiza błędów rejestracji wysokości opadów …….……..... 45

4.1. Sezonowe i miesięczne wysokości opadów……...…. 45

4.2. Dobowe wysokości opadów……..... 47

4.3. Przedziałowe wysokości opadów krótkotrwałych……...… 48

4.4. Podsumowanie i wnioski z analizy dokładności urządzeń pomiarowych ……..... 52

5. Analiza i fizykalna interpretacja szeregów częstości opadów maksymalnych we Wrocławiu-Strachowicach ……..……... 54
5.1. Testowy okres badawczy opadów 1960-1990……..… 54
5.1.1. Seria czasowa C = 1 rok wg interpretacji Bogdanowicz-Stachy……..…. 54
5.1.2. Seria czasowa C = 1 rok wg własnej interpretacji….....……..... 56
5.1.3. Porównanie ilościowe testowych serii czasowych.....…….…….. 57
5.2. Podstawowy okres badawczy opadów 1960-2009……... … …….. 60
5.2.1. Serie czasowe o częstości występowania C = 1÷50 lat…..……..……..... 60
5.2.2. Modele fizykalne opadów maksymalnych……...… 64
5.2.2.1. Adaptacja modeli literaturowych…….. 64
5.2.2.2. Własne modele fizykalne opadów maksymalnych…… 70
5.2.3. Ocena ilościowa uzyskanych modeli fizykalnych opadów maksymalnych…. 75
6. Probabilistyczna interpretacja i uogólnienie wyników badań opadów maksymalnych we Wrocławiu-Strachowicach...……..… 80
6.1. Ogólna charakterystyka rozkładów prawdopodobieństwa……... 80
6.2. Szczegółowa charakterystyka rozkładów prawdopodobieństwa…….. 84
6.2.1. Rozkład Fishera-Tippetta typ I_{max}……... 84
6.2.2. Rozkład Fishera-Tippetta typ III_{min}……. 86
6.2.3. Rozkład logarytmiczno-normalny……... 88
6.2.4. Rozkład Pearsona typ III……. 91
6.3. Testy zgodności rozkładów empirycznych z teoretycznymi……... 94
6.4. Kryteria wyboru modeli probabilistycznych do opisu opadów maksymalnych…. 96
6.5. Modele probabilistyczne opadów maksymalnych……... 97
6.5.1. Model I - oparty na rozkładzie Fishera-Tippetta typ III_{min}……..... 97
6.5.2. Model II - oparty na rozkładzie Pearsona typ III…… 101
6.6. Ocena jakościowa i ilościowa probabilistycznych i fizykalnych modeli opadów…… 104
7. Podsumowanie i wnioski końcowe……..… 108

Bibliografia……...…….. 113
Spis tabel…… 120
Spis rysunków…… 122

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a_i, b_i, c_i, n_i, m_i	- współczynniki (parametry) równań,
A	- powierzchnia zlewni deszczowej, ha,
C	- częstość (powtarzalność) występowania deszczu, lata,
C_n	- częstość (powtarzalność) występowania nadpiętrzeń w kanalizacji, lata,
C_w	- częstość (powtarzalność) występowania wylewów z kanalizacji, lata,
C_z	- częstość (powtarzalność) występowania deszczu do projektowania zbiorników retencyjnych, lata,
$D_{\max}$	- maksymalna rozbieżność między rozkładami empirycznym i teoretycznym,
e	- efektywność względna estymatora,
$\overline{f}$	- wartość uśredniona funkcji f,
$f(x)$	- funkcja gęstości prawdopodobieństwa,
g	- przyśpieszenie ziemskie, m/s^2,
$\hat{g}_i$	- estymator parametru rozkładu prawdopodobieństwa,
h	- wysokość opadu, mm,
$h_{\max}$	- maksymalna wysokość opadu, mm,
$h_{15,1}$	- wysokość opadu o czasie trwania 15 min i częstości występowania C = 1 rok, mm,
$h_{15,C}$	- wysokość opadu o czasie trwania 15 min i częstości występowania C, mm,
H	- wysokość opadu normalnego (średniego z wielolecia), mm,
i	- indeks, liczba naturalna,
I	- intensywność deszczu, mm/min,
k	- liczba estymowanych parametrów rozkładu prawdopodobieństwa,
L	- funkcja wiarygodności,
m	- wyraz ciągu rozdzielczego (nierosnącego), liczba naturalna,
N	- liczba lat obserwacji (liczebność ciągu), liczba naturalna,
p	- prawdopodobieństwo (teoretyczne) wystąpienia opadu (o natężeniu q z przewyższeniem), % lub wartość bezwymiarowa,
$p(m, N)$	- prawdopodobieństwo empiryczne wystąpienia opadu: $p(m, N)=m/(N + 1)$,
R	- współczynnik korelacji,
t	- czas trwania deszczu, min,
t_p	- wartość kwantyla zmiennej standaryzowanej,
q	- jednostkowe natężenie deszczu (q=166,7 I), dm^3/(s·ha),
$q_{15,1}$	- natężenie wzorcowe deszczu o czasie trwania t=15 min i częstości C=1 rok, dm^3/(s·ha),
$q_{15,C}$	- natężenie wzorcowe deszczu o czasie trwania t=15 min i częstości C,

	$dm^3/(s \cdot ha)$,
q_{max}	- maksymalne natężenie deszczu, $dm^3/(s \cdot ha)$,
Q	- strumień objętości, dm^3/s,
U_k	- wysokość opadu (kategorii k) w skali Chomicza, mm,
x_i	- elementy próby losowej ($i = 1, 2, \ldots, N$),
x_p	- kwantyl zmiennej losowej ($x_p = h_{max}$),
Z_n	- próba losowa,
α	- poziom istotności korelacji,
$\alpha(R_i, t)$	- parametr skali do wzoru (2.11), zależny od regionu Polski (R_i) i czasu trwania opadu (t),
ε	- dolne ograniczenie rozkładu prawdopodobieństwa,
$\alpha, u,$	- parametry (współczynniki) rozkładu prawdopodobieństwa Fishera-Tippetta typ I_{max},
$\alpha, \beta, \varepsilon$	- parametry (współczynniki) rozkładu prawdopodobieństwa Fishera-Tippetta typ III_{min},
σ, μ, ε	- parametry (współczynniki) rozkładu prawdopodobieństwa logarytmiczno-normalnego,
$\alpha, \lambda, \varepsilon$	- parametry (współczynniki) rozkładu prawdopodobieństwa Pearsona typ III,
λ_{kr}	- wartość krytyczna statystyki λ-Kołmogorowa,
ψ	- współczynnik spływu, wartość bezwymiarowa,
$\Gamma(\lambda)$	- funkcja gamma Eulera.

Skróty:

AIC - Akaike Information Criterion (Kryterium informacyjne Akaike'go),
BIC - Bayesian Information Criterion (Bayesowskie kryterium informacyjne),
DDF - Depth-Duration Frequency (Powtarzalna wysokość opadu),
IDF - Intensity-Duration Frequency (Powtarzalna intensywność opadu),
MGN - Metoda Granicznych Natężeń,
MNW - Metoda Największej Wiarygodności.

1. Wprowadzenie

Nasilające się w ostatnim dwudziestoleciu ekstremalne zjawiska przyrodnicze, takie jak gwałtowne bądź długotrwałe opady i związane z nimi powodzie czy wylewy z kanalizacji powodują znaczne straty gospodarcze. Zmuszać to nas powinno do ciągłego doskonalenia zasad wymiarowania odwodnień terenów, w tym systemów melioracyjnych i kanalizacyjnych. Współczesne metody badawcze stosowane w hydrologii, w tym monitoring opadów, w powiązaniu z wiedzą z zakresu statystyki, rachunku prawdopodobieństwa i modelowania matematycznego, stają się obecnie niezbędnymi narzędziami w praktyce inżynierskiej.

Projektowanie systemów odwodnień terenów zurbanizowanych, zwłaszcza kanalizacji deszczowej bądź ogólnospławnej (wraz z obiektami typu separatory, przelewy burzowe, zbiorniki retencyjne czy oczyszczalnie ścieków) napotyka w Polsce na trudność wynikającą z braku wiarygodnej metody określania miarodajnego do wymiarowania kanalizacji natężenia deszczu. Wzór Błaszczyka (z 1954 r.) [1,2,3], który jest najczęściej stosowany do projektowania systemów kanalizacyjnych w Polsce, znacznie zaniża wyniki obliczeń strumieni deszczy, co wykazano w licznych analizach porównawczych [4-11]. Ma to swoje konsekwencje przy wymiarowaniu odwodnień terenów w Polsce wg zaleceń normy PN-EN 752 (z 2008 r. [12]) - dostosowanej do zaleceń Europejskiego Komitetu Normalizacji (CEN) odnośnie ujednolicenia wymagań w zakresie ochrony terenów przed wylewami z kanalizacji w państwach członkowskich Unii Europejskiej - wpływając bezpośrednio na większą częstość występowania tych niekorzystnych zjawisk w Polsce.

Z punktu widzenia hydrologii miejskiej, zarówno krótkotrwałe intensywne opady nawalne o małym najczęściej zasięgu terytorialnym, jak i długotrwałe opady deszczu o mniejszej intensywności lecz o dużym zasięgu, mogą wywołać w efekcie zniszczenia środowiskowe, zwłaszcza w infrastrukturze urbanistyczno-przemysłowej, wskutek zalania bądź podtopienia terenu czy też rozmycia powierzchni gruntu - przy braku możliwości odbioru przez system kanalizacyjny czy melioracyjny (bądź odbiornik) dużych objętości wód opadowych. Zjawiska takie występują obecnie i będą też zapewne zdarzały się w przyszłości. Należy więc dążyć do ograniczenia niekorzystnych skutków środowiskowych takich zdarzeń losowych.

Norma europejska PN-EN 752:2008 ogranicza częstość wylewów z kanalizacji, czy też braku możliwości odbioru wód opadowych, do rzadkich „akceptowanych społecznie" powtarzalności ich występowania: raz na 10 lat w przypadku terenów wiejskich, oraz raz na 20, 30 lub 50 lat dla terenów miejskich - odpowiednio do rodzaju zagospodarowania przestrzennego (tab. 1.1). Filozofia ta stawia przed projektantami systemów kanalizacyjnych nowe wyzwanie sprostania tym zaleceniom. Dlatego tak ważne stają się obecnie systematyczne badania opadów i określenie statystycznej częstości występowania ich maksymalnych wysokości, intensywności czy natężeń jednostkowych, nawet dla rzadkich powtarzalności deszczy. Do analiz statystycznych niezbędny jest odpowiednio długi materiał archiwalny z obserwacji opadów, nie krótszy niż z okresu 30 lat [13] i ciągle aktualizowany. Nie znaczy to wcale, że mamy wymiarować kanały na tak rzadkie częstości występowania deszczy, czyli na tak znaczne prognozowane strumienie objętości wód opadowych. Byłoby to często nieuzasadnione ekonomicznie i technicznie trudne do spełnienia np. z powodu braku miejsca na kanały o znacznych średnicach. Cytowana norma zaleca do projektowania systemów kanalizacyjnych następujące częstości deszczu obliczeniowego: raz na rok dla terenów pozamiejskich oraz raz na 2, 5 lub 10 lat dla terenów miejskich – odpowiednio do rodzaju zagospodarowania (tab. 1.1 [12]), jednak przy tych częstościach nie mogą występować żadne przeciążenia w działaniu systemów grawitacyjnych (np. praca pod

ciśnieniem). Wynika stąd konieczność dobierania kanałów na niecałkowite wypełnienie, tj. z rezerwą przepustowości na wypadek rzadziej pojawiających się deszczy.

Zalecenia te nabierają szczególnego znaczenia wobec znacznych różnic ilościowych, obliczanych strumieni deszczu miarodajnego do wymiarowania kanałów [5,6,7] czy obiektów typu zbiorniki retencyjne [8,9], stosowanymi w Polsce modelami-wzorami [10,11], w porównaniu do innych państw europejskich o podobnych właściwościach klimatycznych zlewni deszczowych, co zostanie wykazane w pracy.

Tabela 1.1.

Zalecane częstości projektowe deszczu obliczeniowego (C) i dopuszczalne częstości wystąpienia wylewów (C_w) z kanalizacji wg PN-EN 752:2008

Częstość deszczu obliczeniowego, C (1 raz na C lat)	**Standard kanalizacyjny terenu (lokalizacja, rodzaj zagospodarowania)**	**Częstość wystąpienia wylewów, C_w (1 raz na C_w lat)**
1 na 1	I. Tereny pozamiejskie (w oryginale „wiejskie”)	1 na 10
1 na 2	II. Tereny mieszkaniowe	1 na 20
1 na 5	III. Centra miast, tereny usług i przemysłu:	1 na 30
1 na 10	IV. Podziemne obiekty komunikacyjne, przejścia i przejazdy pod ulicami, itp.	1 na 50

Opady atmosferyczne w naszej strefie klimatycznej występują zarówno w postaci ciekłej (deszczu lub mżawki), jak i stałej (śniegu czy gradu). Ze względu na odmienny na ogół charakter spływu wód opadowych do kanalizacji: prawie natychmiastowy w wypadku deszczy, bądź znacznie przesunięty w czasie przy topnieniu śniegu czy lodu, do wymiarowania odwodnień terenów brane są pod uwagę głównie opady deszczu, jako dające największe chwilowe odpływy.

Podstawową formą ilościowego opisu deszczy są jak dotychczas modele zależności: intensywności I (w mm/min) lub natężenia jednostkowego q (w $dm^3/(s \cdot ha)$) bądź wysokości h (w mm) opadu od czasu jego trwania t i prawdopodobieństwa wystąpienia p, bądź też zamiennie od częstości - powtarzalności C opadu (w latach), typu:

$$I = I(t, p); \quad q = q(t, p); \quad h = h(t, p) \tag{1.1}$$

Związek intensywności (natężenia jednostkowego bądź wysokości) opadu z czasem jego trwania prezentowany jest najczęściej w postaci krzywych typu IDF (ang. Intensity-Duration-Frequency), bądź też krzywych typu DDF (ang. Depth-Duration-Frequency), dla różnych prawdopodobieństw p (lub zamiennie częstości C) wystąpienia opadu. Krzywe te stanowią rodzinę hiperbol o ogólnym równaniu [1]:

$$I = \frac{a}{(t+b)^n} + c \tag{1.2}$$

w którym: a, b, c, n - współczynniki empiryczne, zależne od prawdopodobieństwa pojawienia się danego deszczu oraz od czynników klimatycznych i fizjograficznych zlewni. Do ich ustalenia niezbędna jest seria kilkudziesięciu lat homogenicznych obserwacji [14].

Prekursorem badań nad opisem opadów był Talbot, który w 1899 roku na podstawie analizy natężeń deszczy od czasu ich trwania wyznaczył pierwsze krzywe wzorcowe opadów. Krzywe deszczy miarodajnych typu IDF czy DDF są tworami całkowicie sztucznymi (syntetycznymi), ustalonymi na podstawie materiału empirycznego. Na ich podstawie tworzony jest prosty model blokowy opadu w zlewni o stałej wartości natężenia, który jest

podstawą wymiarowania kanalizacji deszczowej czy też ogólnospławnej tzw. metodami czasu przepływu [2,15].

Intensywność deszczu nie jest jednak stała ani w czasie jego trwania ani w przestrzeni objętej opadem. Chwilowe natężenie jednostkowe opadu może być znacznie (wielokrotnie) większe od średniego. Duża intensywność może też występować raz lub nawet kilkakrotnie podczas trwania opadu, pojawiając się w dowolnej sekwencji. Zjawiska te, zmienne z natury, są trudne do jednostkowego opisu w czasie i przestrzeni, np. w skali zlewni miejskiej, niezbędnego jednak do uogólnień (uproszczeń) dla celów projektowych. W większych systemach odwodnieniowych zaleca się obecnie weryfikację częstości wylewów (czy też nadpiętrzeń do powierzchni terenu [15]) na drodze modelowania hydrodynamicznego sieci - przy różnych scenariuszach jej obciążenia opadami atmosferycznymi (zmiennymi w czasie i przestrzeni). Scenariuszami tymi są jak dotychczas rzeczywiste zmierzone serie opadów lokalnych w wieloleciu (minimum 30 lat), bądź też opady modelowe np. Eulera typu II tworzone z krzywych IDF bądź DDF, a więc hietogramy syntetyczne. Zwłaszcza te pierwsze scenariusze są na ogół trudnodostępne.

Powszechne wdrożenie modelowania działania istniejących bądź projektowanych systemów kanalizacyjnych, zalecane normą PN-EN 752:2008 [12], napotyka w Polsce na barierę braku dostępu projektantów do odpowiednich i wiarygodnych baz danych o opadach. Najczęściej na wejściu do modeli hydrodynamicznych niezbędne są hietogramy opadów o rozdzielczości czasowej co najmniej 5 minut. W Polsce dostęp do źródłowych danych o opadach (rejestrowanych do 2007 r. na pluwiogramach papierowych) jest w gestii Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, właściciela największej w kraju liczby stacji i posterunków meteorologicznych. W IMGW istnieje co prawda możliwość uzyskania odpłatnego dostępu projektantów do takich baz danych, lecz częściej zamówienia analizy statystycznej opadów - wg opracowań standardowych, np. pod kątem określenia lokalnych zależności typu IDF czy DDF. Pewnym wyjściem z tej sytuacji mogą okazać się hietogramy syntetyczne opadów - generowane losowo, będące jak na razie w sferze eksperymentów, jednak i one wymagają materiałów źródłowych, w tym o wysokiej rozdzielczości [16]. Punktem wyjścia do ich generowania jest bowiem najczęściej znajomość zarejestrowanych dobowych sum wysokości opadów, które są zwykle najłatwiej dostępne. Generator losowy służy do przeprowadzenia klasycznego skalowania w dół, a więc rozdzielenia dobowej wysokości opadu aż do skali czasowej równej np. 5 minut. W przypadku danych krótkoterminowych (kilkugodzinnych) punktem wyjścia do generowania hietogramów syntetycznych niezbędna jest również znajomość wysokości opadu i czasu jego trwania dla przyjętej częstości występowania, przy czym możliwe jest w tym przypadku wykorzystanie istniejących lokalnych formuł typu IDF czy DDF.

Miarodajne do projektowania bezpiecznych systemów odwodnień terenów są zarówno deszcze krótkotrwałe (przelotne) o dużym natężeniu jednostkowym (q), jak i deszcze długotrwałe (rozlewne) o znacznym zasięgu terytorialnym (A) i dużej wydajności ($Q = qA$). Deszcze ulewne czy nawalne pochodzą z chmur burzowych kłębiastych (cumulonimbus), trwają zwykle kilkadziesiąt minut (rzadziej kilka godzin) i cechują się dużą intensywnością i zróżnicowanym zasięgiem lokalnym, obejmując obszar od kilku do nawet kilkuset kilometrów kwadratowych. Występują w Polsce w miesiącach letnich, ściślej od maja do września, a najczęściej w lipcu. Zjawiska opadowe trwające najdłużej (nawet do kilku dni) składają się zwykle z kilku opadów, występujących bezpośrednio po sobie, przedzielonych okresami bez opadów. Do projektowania systemów kanalizacyjnych największe znaczenie mają intensywne, a więc maksymalne opady. Wywołują one bowiem największe przepływy w kanałach deszczowych czy ogólnospławnych.

Do wyodrębnienia opadów maksymalnych, zwłaszcza typu: silne deszcze, ulewy, silne ulewy czy deszcze nawalne - wg klasyfikacji Chomicza, stosowane jest najczęściej orientacyjne kryterium jakościowe postaci [17]:

$$U_k = \sqrt{2^k}\sqrt{t} \tag{1.3}$$

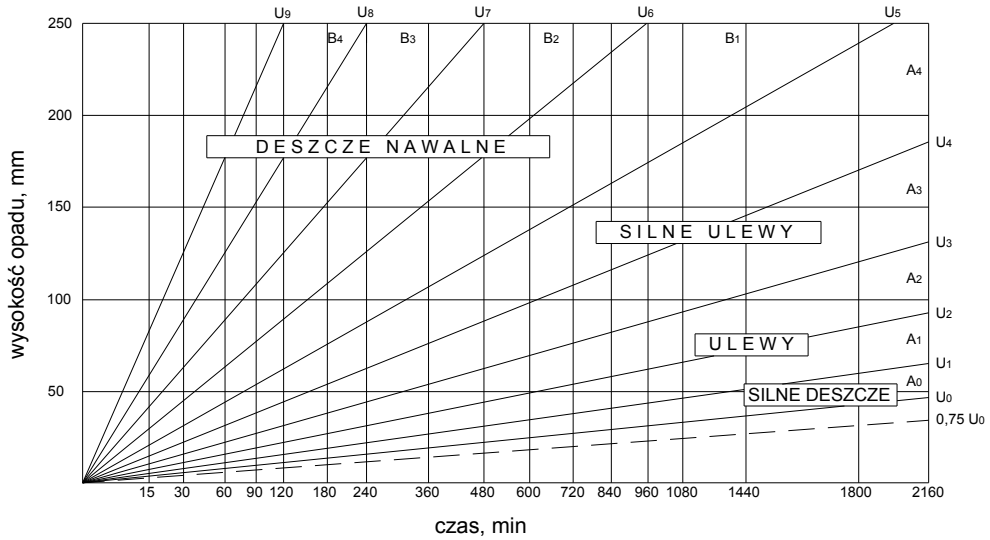
gdzie:

U_k - wysokość opadu (kategorii k w skali Chomicza), mm,

k - numer skali (stosowny do kategorii) opadu: $k = 0, 1, 2, 3, \ldots, 9$ (12),

t - czas trwania deszczu, min.

Wzór (1.3) ma znaną powszechnie interpretację graficzną w postaci rodziny krzywych, tj. zależności granicznych (w skali Chomicza) wysokości (U_k) opadów od czasu ich trwania (t) [17]. I tak pomiędzy krzywymi U_0 i U_1 (w polu A_0 - rys. 1.1) występują silne deszcze; pomiędzy krzywymi U_1 i U_3 (w polach A_1 i A_2) występują ulewy; pomiędzy krzywymi U_3 i U_5 (w polach A_3 i A_4) – silne ulewy; powyżej krzywej U_5 (w polach $B_1 \div B_4$) – deszcze nawalne. Skala Chomicza ma głównie wartość opisową, przydatną jednak do celów metodologicznych, m.in. w tej pracy.



Rys. 1.1. Klasyfikacja opadów deszczu w skali Chomicza [17] w interpretacji Stachy [18] (linią przerywaną oznaczono własne kryterium wyboru opadów do analiz statystycznych we Wrocławiu)

Stan wiedzy w zakresie podstaw wymiarowania czy modelowania działania systemów odwodnień terenów w Polsce, w tym zwłaszcza systemów kanalizacyjnych, wskazuje na pilną potrzebę uściślenia modeli fizykalnych bądź probabilistycznych do określania wielkości miarodajnego strumienia deszczu, a opracowanych w latach 40, 50 czy 90-tych ubiegłego wieku, bądź też opracowania nowych - uwzględniających również współczesne dane hydrologiczne.

W kolejnym rozdziale przedstawione zostaną informacje o znanych i dotychczas stosowanych w Polsce modelach opadów do wymiarowania kanalizacji deszczowej bądź ogólnospławnej wraz z oceną ich wiarygodności, na podstawie dyskusji założeń wyjściowych przy ich wyprowadzaniu, prowadzących w efekcie do wzajemnych różnic ilościowych i jakościowych.

2. Dyskusja modeli opadów do projektowania odwodnień terenów

2.1. Modele opadów o zasięgu ogólnopolskim

2.1.1. Model Reinholda z 1940 roku

W 1940 roku, profesor Reinhold opublikował ogólne zasady projektowania odwodnień terenów zurbanizowanych, w tym w szczególności kanalizacji obiektów komunikacyjnych typu autostrady, mosty i wiadukty, przejścia i przejazdy pod ulicami czy lotniska, w których sformułował swój autorski model fizykalny opadów [19]:

$$q = q_{15,1} \frac{38}{t+9} (\sqrt[4]{C} - 0{,}3684), \tag{2.1}$$

skąd strumień objętości, miarodajny do zwymiarowania np. przekroju kanału, wylicza się z zależności:

$$Q = qA\psi \tag{2.2}$$

gdzie:

q - jednostkowe natężenie deszczu, $dm^3/(s \cdot ha)$,
$q_{15,1}$ - natężenie deszczu wzorcowego o czasie trwania t = 15 min i częstości C = 1 rok, $dm^3/(s \cdot ha)$,
t - czas trwania deszczu, min,
C - częstość wystąpienia deszczu o natężeniu q lub większym, lata,
Q - strumień objętości, dm^3/s,
A - powierzchnia zlewni deszczowej, ha,
ψ - współczynnik spływu przyjmowany w zależności od stopnia uszczelnienia i nachylenia terenu oraz natężenia deszczu $q_{(15,C)}$.

Po wojnie model Reinholda (2.1) był powszechnie stosowany do projektowania kanalizacji w państwach zachodnich (Niemcy, Szwajcaria, Austria) - przy zmianach $q_{15,1}$ od 76 dla Kolonii, poprzez 122 dla Wiednia, do 133 $dm^3/(s \cdot ha)$ dla Stuttgartu), ale także w państwach Europy środkowej, jak NRD ($q_{15,1}$ = 94 $dm^3/(s \cdot ha)$ dla Berlina), Czechosłowacji ($q_{15,1}$ = 100 $dm^3/(s \cdot ha)$ dla Pragi) i w Polsce ($q_{15,1}$ = 84 $dm^3/(s \cdot ha)$ dla Warszawy, 87 dla Szczecina, 93 dla Gdańska, 112 dla Wrocławia i Elbląga oraz 117 dla Opola). Najczęściej do wymiarowania odwodnień przyjmowano $q_{15,1}$ = 100 $dm^3/(s \cdot ha)$, jako średnią wartość dla tej części Europy [20]. Obecnie w Niemczech zaleca się odczytywanie jednostkowego natężenia deszczu wzorcowego z atlasu KOSTRA - indywidualnie dla każdej zlewni miejskiej, bowiem $q_{(15,1)}$ zmienia się w granicach od 90 do 170 $dm^3/s \cdot ha$ [14,21]. Tak więc w modelu (2.1) przestrzenna zmienność natężenia opadów (q dla t i C), miarodajnych do celów projektowych na terenie Niemiec, uzależniona jest od przyjmowanej wartości lokalnego natężenia deszczu wzorcowego.

2.1.2. Model Błaszczyka z 1954 roku

Obecnie w Polsce, najczęściej stosowanym w projektowaniu odwodnień terenów jest model opadów Błaszczyka (z 1954 r.), wzorowany na strukturze formuły Gorbaczewa, postaci [1]:

$$q = \frac{6{,}631 \sqrt[3]{H^2 C}}{t^{0,67}} \tag{2.3}$$

gdzie:

q - jednostkowe (miarodajne) natężenie deszczu, $dm^3/(s \cdot ha)$,
t - czas trwania deszczu, min,
H - wysokość opadu normalnego (średniego z wielolecia), mm,
C - częstość występowania deszczu o natężeniu q lub większym (z przewyższeniem), lata.

Model fizykalny Błaszczyka oparty został na analizie statystycznej zbioru 79 silnych deszczy, ulew oraz deszczy nawalnych, spełniających kryterium wysokości opadu: $h > t^{0,5}$ – dla t z całego okresu trwania deszczu, czyli powyżej krzywej U_0 – wg skali (1.3) Chomicza (rys. 1.1), zarejestrowanych w Warszawie w latach 1837÷1891 i 1914÷1925 a podanych m.in. przez Pomianowskiego. Z łącznego okresu 67 lat obserwacji analizie poddano jedynie opady z 37 lat - po odrzuceniu lat, w których nie odnotowano ani jednego silnego deszczu, ulewy bądź deszczu nawalnego. Zmienność opadów na obszarze kraju scharakteryzowano za pomocą opadu normalnego (H). Po przyjęciu dla Polski H = 600 mm, uproszczony model (2.3) Błaszczyka przyjmuje najczęściej cytowaną w literaturze postać [2,3]:

$$q = \frac{470\ \sqrt[3]{C}}{t^{0,67}} \tag{2.4}$$

Jak wykazano w licznych analizach porównawczych [4-10], najczęściej stosowany w Polsce model opadów w postaci wzoru empirycznego Błaszczyka (2.4) dla H = 600 mm zaniża wyniki obliczeń miarodajnych natężeń deszczy do wymiarowania kanałów czy obiektów, w porównaniu z najczęściej stosowanym w Niemczech modelem Reinholda (2.1), zwłaszcza dla czasów trwania opadów do 2 godzin i $q_{15,1}$ = 100 $dm^3/(s \cdot ha)$. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż zdecydowana większość deszczy nawalnych to deszcze krótkotrwałe, bo aż 98% z nich trwa nie dłużej niż 3,5 godziny [22,23]. Z punktu widzenia projektowania kanalizacji jest to bardzo istotne, gdyż zwykle początkowe odcinki krzywych IDF czy DDF są miarodajne do wymiarowania sieci kanalizacyjnych wraz z obiektami typu zbiorniki retencyjne, przelewy burzowe czy separatory. Przykładowo, przy wymiarowaniu zbiorników retencyjnych wód deszczowych, dla czasów trwania opadów (równych czasom przepływu w kanałach dopływowych do zbiorników) wynoszących np. 15÷45 min, mamy do czynienia z ok. 30% zaniżeniem wartości strumieni dopływowych obliczanych z modelu Błaszczyka (2.3), w porównaniu do modelu Reinholda (2.1), co skutkuje zaniżeniem, podobnego rzędu, ich objętości czynnej [8,9]. W przybliżeniu strumienie dopływowe z obu modeli będą równe, gdy do wzoru (2.3) Błaszczyka wprowadzimy częstość C = 2, gdy wymagana jest wg PN-EN 752 częstość C = 1 – dla terenów pozamiejskich. Analogicznie C = 5 gdy wymagana jest normą częstość C = 2 – dla terenów miejskich (mieszkaniowych), itd. Z jeszcze większymi różnicami strumieni, obliczanych z obu modeli, mamy do czynienia przy wymiarowaniu kanałów deszczowych metodą granicznych natężeń (MGN), gdzie we wzorze Błaszczyka oprócz czasu przepływu uwzględnia się dodatkowo czas koncentracji terenowej i czas retencji kanałowej [5,6,7]. Ma to swoje konsekwencje w eksploatacji systemów odwodnień terenów w Polsce (projektowanych wg zaleceń normy PN-EN 752:2008 odnośnie częstości), wpływając bezpośrednio na większą „rzeczywistą" częstość wylewów z kanalizacji, jako skutek zbyt małych projektowanych średnic kanałów.

2.1.3. Model Chomicza z 1953 roku

Chomicz [23], z materiału badawczego wykorzystanego przez Błaszczyka, tj. z 79 intensywnych opadów (zarejestrowanych w Warszawie) wyeliminował 8 silnych deszczy, ograniczając statystyczną analizę do pozostałych 71 ulew i deszczy nawalnych, spełniających kryterium $h > (2t)^{0,5}$ – dla całego okresu trwania opadu (czyli powyżej krzywej U_1 – rys. 1.1). Dla wybranych przez Błaszczyka 37 lat obserwacji (1837-39, 1841, 1844-45, 1847-48, 1851,

1853, 1855, 1857, 1861-65, 1869-75, 1878, 1882, 1889-91, 1914-16, 1918-20, 1922 i 1925), określił wysokość maksymalnego opadu zależnością:

$$h_{\max} = a\sqrt{t} - bt \tag{2.5}$$

gdzie:

$h_{\max}$ - wysokość maksymalnego opadu deszczu, mm,

t - czas trwania deszczu, min,

a, b – parametry zależne od prawdopodobieństwa (p) wystąpienia opadu (wg tab. 2.1):

Tabela 2.1.

Wartości parametrów a i b do wzoru (2.5)

Prawdopodobieństwo p, %			
10%	**20%**	**50%**	**100%**
$a = 7{,}4$	$a = 6{,}1$	$a = 4{,}7$	$a = 3{,}1$
$b = 0{,}29$	$b = 0{,}22$	$b = 0{,}16$	$b = 0{,}10$

Chomicz, do sformułowania modelu fizykalnego opadów maksymalnych wykorzystał jedynie 37 deszczy o największej intensywności, wybranych spośród 71 z okresu 67 lat obserwacji. Po ich uszeregowaniu wg malejących natężeń, częstość C = 1 rok przyporządkował dla opadu na 37 pozycji. Błaszczyk, jak już wspomniano, do sformułowania wzoru (2.3) przyjął natomiast 67 opadów, jako miarodajnych dla tego samego okresu obserwacji i po uszeregowaniu 79 deszczy wg malejących natężeń przypisał częstość C = 1 rok opadowi dopiero na 67 pozycji. Jak należało oczekiwać, model Chomicza wykazuje znacznie wyższe wartości jednostkowych natężeń opadów w porównaniu z modelem Błaszczyka. Przykładowo, dla czasów trwania opadów $t \leq 180$ min i częstości występowania C = 1, 2, 5 i 10 lat różnice obliczanych natężeń deszczy (q) wynoszą od 34 do 95% [10]. W szczególności dla t = 15 min i C = 1 rok (przyjmując H = 600 mm) ze wzoru (2.4) Błaszczyka otrzymamy $q_{15,1}$ = 76,6 dm^3/(s·ha) a ze wzoru Chomicza (2.5) już $q_{15,1}$ = 116,7 dm^3/(s·ha), czyli aż o 52% większą wartość.

Model opadów maksymalnych Chomicza nie znalazł jednak szerszego zastosowania w praktyce projektowania systemów kanalizacyjnych w Polsce.

2.1.4. Model Lambora z 1953 roku

Lambor oparł badania deszczy na wynikach pomiarów ze stacji meteorologicznych rozmieszczonych w różnych regionach geograficznych Polski, o dostatecznie długich okresach obserwacji, niejednokrotnie przekraczających 50 lat. W sumie dysponował 13812 deszczami, z czego połowa została użyta do sformułowania modelu opadów, w postaci wzoru empirycznego [14]:

$$I = \frac{(38 - 12\log p)H^{0,28}}{(t+c)^n} + d \tag{2.6}$$

przy czym:

$$n = 0{,}779 - 0{,}164H \tag{2.7}$$

$$c = \frac{1}{1000}(20{,}92Hp^{0,315} - 0{,}15p - 2) \tag{2.8}$$

$$d = 10^{-3}(47{,}3 - 0{,}023p) \tag{2.9}$$

gdzie:

I - intensywność opadu deszczu, mm/h,

p - prawdopodobieństwo wystąpienia opadu (o intensywności I z przewyższeniem), %,

H - wysokość opadu normalnego, m,

t - czas trwania deszczu, h.

Zmienność opadów na obszarze Polski scharakteryzowana jest za pomocą wysokości opadu normalnego H. W pracy [24] Lambor podaje już skróconą postać wzoru (2.6) - bez członu d wg (2.9), który przyjmuje najczęściej pomijalnie małe wartości (przykładowo: dla p = 100%, H = 0,6 m i t = 0,25 h intensywność opadu wyniesie I = 28,48 mm/h - wg (2.6), a w przypadku pominięcia członu d: I = 28,43 mm/h). Model Lambora zachowuje swą ważność do wysokości terenu 1500 m npm i czasu trwania zjawisk opadowych aż do jednego miesiąca. Jak wykazano w pracy [10], wzory empiryczne Lambora dla H = 0,6 m i $t \leq 3$ godzin dają wyniki praktycznie zgodne ze wzorem Błaszczyka. Przykładowo dla t = 15 min i C = 1 rok (p = 100%) ze wzoru Błaszczyka (2.4) otrzymujemy $q_{15,1}$ = 76,6 dm^3/(s·ha) a ze wzoru Lambora $q_{15,1}$ = 78,9 dm^3/(s·ha). Są to jednak znacznie niższe wartości w porównaniu do wartości wyliczonych ze wzorów Reinholda (dla obszaru Polski) czy Chomicza.

W pracy [25] Lambor podał m.in. zależność na maksymalną intensywność nawalnych deszczy trwających do 5 godzin, które wystąpiły na terytorium Polski, w postaci wzoru fizykalnego:

$$I = 17{,}164(t + 5{,}5)^{-0{,}39} - 1{,}44 \tag{2.10}$$

gdzie:

I - intensywność (maksymalna) deszczu, mm/min,

t - czas trwania deszczu, min.

Z formuły (2.10) przykładowo dla t = 15 min otrzymamy maksymalną intensywność deszczu I = 3,85 mm/min, co w przeliczeniu na natężenie jednostkowe wyniesie q = 640,9 dm^3/(s·ha). Odpowiada to parametrom opadów na pograniczu deszczu nawalnego II stopnia i nawałnicy, czyli na pograniczu 7 i 8 klasy - w 9-cio stopniowej skali wg Atlasu klimatu Polski z 2005 r. [26]. Natomiast w 12 stopniowej skali Chomicza (1.3) odpowiada to wysokości opadu pomiędzy krzywymi U_7 i U_8 - w polu A_7, czyli bardzo silnych deszczy nawalnych (rys. 1.1). Lambor nie określił prawdopodobieństwa (czy też powtarzalności) występowania aż tak intensywnych opadów w Polsce.

Fizykalny model Lambora (2.6), zbliżony pod względem wyników obliczeń z modelem Błaszczyka (2.3), nie jest tak znany i stosowany w praktyce projektowania systemów odwodnieniowych w Polsce jak model Błaszczyka.

2.1.5. Model Bogdanowicz i Stachy z 1998 roku

Bogdanowicz i Stachy, na podstawie ogólnopolskich pomiarów deszczy w latach 1960÷1990 na 20 stacjach meteorologicznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, opublikowali w 1998 roku tzw. „charakterystyki projektowe" opadów, w postaci modelu probabilistycznego maksymalnych wysokości, będących kwantylem przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa Weibulla [27]:

$$h_{\max} = 1{,}42t^{0{,}33} + \alpha(R,t)\cdot(-\ln p)^{0{,}584} \tag{2.11}$$

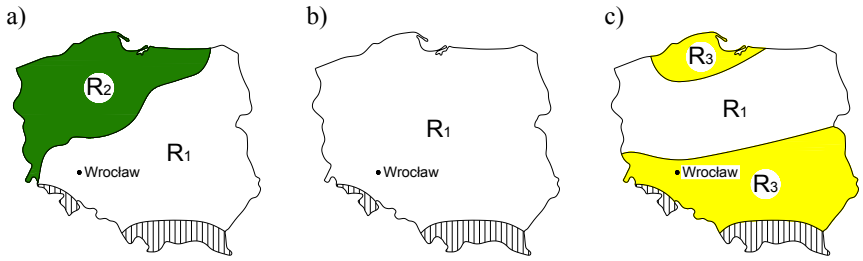
gdzie:

$h_{\max}$ - maksymalna wysokość opadu, mm,

t - czas trwania deszczu, min,

p - prawdopodobieństwo przewyższenia opadu: $p \in (0;1]$,

α - parametr (skali) zależny od regionu Polski (wg rys. 2.1) i czasu t,



Rys. 2.1. Regiony opadów maksymalnych: a) dla czasów trwania deszczy $t \in [5; 60]$ min; b) dla $t \in [60; 720]$ min; c) dla $t \in [720; 4320]$ min (R_1 - region centralny; R_2 - region północno-zachodni; R_3 - regiony południowy i nadmorski)

Do opracowania modelu (2.11) przyjęto za podstawę 31 opadów maksymalnych, po jednym największym z każdego roku obserwacji (1960-1990), dla każdej z 20 stacji meteorologicznych IMGW. Po uszeregowaniu malejąco przedziałowych wartości wysokości opadów w 14 interwałach czasowych (od 5 minut do 72 godzin), deszcz syntetyczny na 31. pozycji otrzymał prawdopodobieństwa przewyższenia $p = 1$ (czyli częstość występowania $C = 1$ rok). Tak więc dla $p = 1$ model (2.11) upraszcza się do funkcji, będącej dolnym ograniczeniem rozkładu prawdopodobieństwa Weibulla [27], postaci:

$$h_{\max} = 1{,}42 t^{0{,}33} \tag{2.12}$$

Dla prawdopodobieństw przewyższenia $p < 1$ (czyli dla $C > 1$) w regionie centralnym Polski (R_1) parametr α obliczany jest ze wzorów (rys. 2.1):

$$\alpha(R,t) = 4{,}693 \ln(t+1) - 1{,}249, \text{ dla } t \in [5; 120) \text{ min}, \tag{2.13}$$

$$\alpha(R,t) = 2{,}223 \ln(t+1) + 10{,}639, \text{ dla } t \in [120; 1080) \text{ min}, \tag{2.14}$$

$$\alpha(R,t) = 3{,}01 \ln(t+1) + 5{,}173, \text{ dla } t \in [1080; 4320] \text{ min}. \tag{2.15}$$

Analogicznie, dla regionu północno-zachodniego (R_2) parametr α obliczany jest ze wzoru:

$$\alpha(R,t) = 3{,}92 \ln(t+1) - 1{,}662, \text{ dla } t \in [5; 30] \text{ min}, \tag{2.16}$$

przy czym, „region północno-zachodni zanika" po 30 minutach trwania opadów, a po czasie jednej godziny „przechodzi do regionu centralnego" (R_1). Implikuje to powstanie nieciągłości w przebiegu parametru α w tym przedziale czasu, a co za tym idzie również h_{max}. Problem ten rozwiązano dokonując interpolacji α funkcją o równaniu:

$$\alpha(R,t) = 9{,}160 \ln(t+1) - 19{,}6, \text{ dla } t \in (30; 60) \text{ min}, \tag{2.17}$$

co jest rozwiązaniem bezpiecznym, przynoszącym wg [27] wartości wyższe w stosunku do zmierzonych.

Dla regionów południowego i nadmorskiego (R_3) parametr α obliczany jest ze wzoru:

$$\alpha(R,t) = 9{,}472 \ln(t+1) - 37{,}032, \text{ dla } t \in [720; 4320] \text{ min}. \tag{2.18}$$

Model (2.11) nie obejmuje jednak obszarów górskich, zakreskowane na rys. 2.1.

Wzory Bogdanowicz i Stachy na maksymalną wysokość opadów, oparte na obserwacjach intensywnych deszczy z okresu 1960-1990, są jednak niespójne - obarczone dużym błędem odnośnie wysokości opadów dla częstości deszczy pojawiających się raz na rok. Wykazano to w licznych analizach porównawczych [6-10] względem innych wzorów - modeli. Zostanie to udowodnione w niniejszej pracy na podstawie wyników pomiarów wysokości opadów we Wrocławiu w tym samym okresie obserwacyjnym, tj. w latach 1960-1990 (a także w dłuższym okresie lat 1960-2009). Łatwo bowiem wykazać, że z przekształcenia wzoru (2.12) do postaci wzoru na jednostkowe natężenie deszczu q (w $dm^3/(s \cdot ha)$) dla C = 1 rok otrzymamy:

$$q_{(max)} = 236{,}7/t^{0{,}67}, \tag{2.19}$$

a ze wzoru Błaszczyka (2.4) dla H = 600 mm i C = 1 rok mamy:

$$q = 470/t^{0{,}67}, \tag{2.20}$$

a zatem identyczne funkcje czasu t, ale różniące się wartością współczynnika w liczniku aż 2-krotnie. Tak więc, wyniki obliczeń q ze wzoru (2.19) będą dwukrotnie mniejsze w stosunku do wzoru (2.20). Przykładowo, dla t = 15 min ze wzoru (2.12) Bogdanowicz-Stachy otrzymamy $h_{15,1}$ = 3,5 mm, stąd $q_{15,1}$ = 38,6 $dm^3/(s \cdot ha)$, a ze wzoru (2.4) Błaszczyka $q_{15,1}$ = 76,6 $dm^3/(s \cdot ha)$. Porównując te wartości względem obliczonych ze wzoru (2.1) Reinholda, przy natężeniu wzorcowym $q_{15,1}$ = 100 $dm^3/(s \cdot ha)$ - najczęściej przyjmowanym w Polsce, wynik obliczeń ze wzoru Bogdanowicz-Stachy będzie już dwu i półkrotnie mniejszy. W efekcie prowadzi to wprost do znacznego zaniżenia projektowanych średnic kanałów [4-7,10], czy też obliczanych objętości zbiorników retencyjnych [8-9]. Tak duże różnice wyników są bezpośrednim następstwem nieodpowiednich, jak się wydaje, założeń wyjściowych przyjętych w pracy [27], mianowicie: szeregowano malejąco jedynie największe w roku wysokości opadów z lat 1960-1990 w interwałach czasowych od 5 minut do 72 godzin (dla każdej z 20 analizowanych stacji) i uznawano najmniejsze z największych rocznych a priori za odpowiadające częstości występowania C = 1 rok.

Dla częstości deszczy C = 2, 5 i 10 lat, z modelu Bogdanowicz i Stachy (przekształconego na q), przykładowo dla centralnej Polski, otrzymujemy o ok. 50% większe natężenia deszczy względem modelu Błaszczyka oraz o ok. 15% większe względem modelu Reinholda [10]. Te maksymalne natężenia opadów wydają się już być bardziej prawdopodobne, wymagają jednak potwierdzenia (weryfikacji), co uczynione zostanie na materiale wrocławskim z lat 1960-2009. Dotyczy to zwłaszcza prognozowania z modelu Bogdanowicz-Stachy wysokości (czy natężeń) opadów dla bardzo rzadkich częstości (C = 50 i 100 lat), ze względu na zbyt krótki, jak się wydaje, okres obserwacji (1960-1990).

2.1.6. Atlasy opadów

W Niemczech problem dostępu do wiarygodnych danych o opadach do projektowania odwodnień terenów rozwiązano wzorcowo, publikując w Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes (odpowiednik wydawnictwa IMGW), Offenbach am Main 1990, tabelaryczne zestawienia opracowanych wyników pomiarów wysokości opadów nawalnych dla 125 stacji meteorologicznych, dla 16 interwałów czasowych trwania deszczu (od 15 minut do 72 godzin) odpowiednio dla częstości C = 1, 2, 5, 10, 20, 50 i 100 lat [20]. Z zestawień tych wynika, że wysokość opadu wzorcowego - $h_{15,1}$ (o czasie trwania 15 min i częstości występowania C = 1 rok) wynosi na terenie Niemiec od 8,0 do 15,4 mm, czemu odpowiada w przeliczeniu natężenie deszczu wzorcowego $q_{15,1}$ od 89 do 171 $dm^3/(s \cdot ha)$. Porównując to dla Polski – przykładowo ze wzoru (2.12) Bogdanowicz-Stachy otrzymujemy tylko: $h_{15,1}$ = 3,5

mm i w przeliczeniu $q_{15,1}$ = 38,9 $dm^3/(s \cdot ha)$, czyli 2 do 4-razy mniejsze wartości od wyznaczonych w Niemczech. Wskazuje to dobitnie na niewłaściwą postać zależności (2.12) dla C = 1 rok, której wartości stanowią jednocześnie dolne ograniczenie rozkładu prawdopodobieństwa Weibulla, przyjętego do modelu (2.11) Bogdanowicz-Stachy.

Statystyczna analiza niemal stuletnich danych o opadach w Niemczech umożliwiła ustalenie lokalnych zależności natężenia opadu od czasu trwania i częstości występowania w postaci krzywych natężenia deszczu (IDF), dla każdej stacji meteorologicznej, które przedstawiono następnie w atlasie KOSTRA z 1997 roku - jako map uśrednionych wartości w poszczególnych regionach (zlewniach), w wyniku pokrycia powierzchni terenu siatką rastrową [28]. Nie są więc one w pełni zgodne z danymi uzyskanymi z analizy statystycznej dla pojedynczej stacji meteorologicznej, bowiem wielkość rastra kształtuje się średnio na poziomie 71,5 km^2. Nie mniej jednak pozwala to na daleko idącą indywidualizację oceny wielkości opadu. Regionalne różnice q, przy tej samej częstości i czasie trwania opadu, przekraczają bowiem w Niemczech 100% [21]. Dla przykładu dane o opadach dla polskich miast przygranicznych takich jak Świnoujście, Szczecin, Kostrzyń, Gubin, Zgorzelec czy Bogatynia, mieszczących się w zasięgu atlasu KOSTRA, wykazują znacznie wyższe natężenia miarodajnych opadów niż tradycyjnie obliczane w Polsce modelem Błaszczyka. Wprowadzenie podobnego systemu rejestracji i prezentacji wyników pomiarów opadów w Polsce, np. w strukturze IMGW, pozwoliłoby na urealnienie oceny skali zagrożeń przez wylania, co postuluje się m.in. w pracach [4,9].

Pierwszą próbę opracowania atlasu opadów maksymalnych w skali Polski podjęto w 1987 roku, pod redakcją Stachy [29]. Jednak wadą tej pracy był zbyt krótki, bo tylko 10 letni (1966-1975) okres obserwacji opadów, o ograniczonym do 2 godzin czasie ich trwania. Wysokości opadów dla kilku interwałów czasowych (t = 5, 10, 15, 30, 60 i 120 minut) odczytywano z pluwiogramów ze 121 stacji, a następnie zestawiano w ciągi nierosnące, skąd ustalano związki probabilistyczne typu:

$$h_{\max} = \frac{a - b[-\ln(-\ln(1-p))]}{t^n} \tag{2.21}$$

gdzie:

$h_{\max}$ - maksymalna wysokość opadu, mm,

a, b, n – współczynniki empiryczne (wyznaczane metodą najmniejszych kwadratów) dla każdej stacji meteorologicznej z maksymalnych rocznych wysokości,

t - czas trwania deszczu, min,

p - prawdopodobieństwo przewyższenia: $p \in (0;1)$.

Przykładowo dla stacji Wrocław-Strachowice ustalono: a = 4,57, b = –1,85, n = –0,32. Model ten nie ma jednak zastosowania dla częstości opadów C = 1 rok (p < 1). W rezultacie, w pracy [29] zamieszczono 12 map z izohietami maksymalnych wysokości opadów ($h_{\max}$) jedynie dla 3 prawdopodobieństw (p = 0,01, 0,1 i 0,5) występowania i 4 czasów (t = 15, 30, 60 i 120 minut) trwania deszczy. Należy jednak uznać ideę takiego opracowania dla Polski za cenną, wartą kontynuacji.

2.2. Modele opadów o zasięgu lokalnym – dla Wrocławia

2.2.1. Drugi model Lambora z 1953 roku

Modele opadów deszczu dla Wrocławia opracowali: Stachy (omówiony już model 2.21), Lambor, Wołoszyn, Sowiński oraz Licznar i Łomotowski. Lambor [14], oprócz pierwszego modelu (2.6) dla terenu całego kraju, opracował też indywidualne modele dla Warszawy i dla Wrocławia. Model fizykalny na intensywność opadów we Wrocławiu przyjmuje postać:

$$I = \frac{43{,}7 - 15\log p}{(t + 0{,}03)^{0{,}7}} \tag{2.22}$$

gdzie:

I - intensywność opadu deszczu, mm/h,

p – prawdopodobieństwo wystąpienia opadu, %,

t - czas trwania deszczu, h.

Przykładowo dla t = 15 min i p = 100% (C = 1 rok) z modelu Błaszczyka (2.4) otrzymujemy $q_{15,1}$ = 76,6 dm^3/(s·ha), a z pierwszego modelu (2.6) Lambora (dla obszaru Polski) $q_{15,1}$ = 78,9 dm^3/(s·ha), ale już z drugiego modelu (2.22) Lambora (dla Wrocławia) otrzymamy $q_{15,1}$ = 92,8 dm^3/(s·ha), co świadczy, że Wrocław ma wyższe miarodajne opady deszczy. Drugi model Lambora (2.22), jako mniej znany, był rzadko stosowany w praktyce projektowania systemów odwodnieniowych we Wrocławiu.

2.2.2. Model Wołoszyna z 1961 roku

Wołoszyn, na podstawie zapisów opadów we Wrocławiu z okresów 1898-1933 oraz 1954-1960, ustalił model fizykalny opadów w postaci wzoru na intensywność deszczy [30]:

$$I = \frac{a_p}{(t + 4)} + c_p \tag{2.23}$$

przy czym:

$$a_p = \frac{4{,}326(5 - p)}{p^{0{,}6051}} + 28{,}056 \tag{2.24}$$

$$c_p = 0{,}0427 - 0{,}00025p \tag{2.25}$$

gdzie:

I - intensywność deszczu, mm/min,

t - czas trwania deszczu, min,

p - prawdopodobieństwo pojawienia się deszczu, %.

Powyższe model zalecany jest dla krótkotrwałych deszczy nawalnych, o czasie trwania krótszym niż:

$$t = 187{,}063\sqrt{a_p} - 4\,, \tag{2.26}$$

a dla deszczy o dłuższych czasach trwania Wołoszyn zaleca model:

$$I = 0{,}0107\sqrt{a_p} + c_p - 0{,}0000286\ t \tag{2.27}$$

Modele Wołoszyna były jednak rzadko wykorzystywane do projektowania systemów kanalizacyjnych Wrocławia, ze względu na niższe prognozowane wartości q w porównaniu do modelu Błaszczyka (zwłaszcza dla C = 1 i 2 lata).

2.2.3. Model Sowińskiego z 1980 roku

Sowiński [31], do opracowania probabilistycznego modelu na intensywność opadów we Wrocławiu, przyjął 40 największych opadów rocznych z 40 lat obserwacji, opierając się na

materiale źródłowym podanym przez Wołoszyna [30]. W rezultacie analizy różnych postaci równań na krzywe intensywności opadów (IDF) przyjął funkcję:

$$I_{\max} = b_0 + b_1 \frac{1}{t} + b_2 \frac{1}{t^2} \tag{2.28}$$

gdzie:

I - intensywność (maksymalna) miarodajnych opadów, mm/min,

t - czas trwania deszczu, min,

b_0, b_1, b_2 - współczynniki regresji, wg tabeli 2.2.

Tabela 2.2.
Wartości współczynników b_0, b_1 i b_2 do modelu (2.28)

Częstość *C*, lata	**Współczynniki regresji**		
	b_0	b_1	b_2
2	-0,016	17,062	-66,703
5	-0,017	24,076	-89,015
10	-0,021	29,235	-104,436
50	-0,029	41,515	-137,328

Model Sowińskiego (12) nie jest jednak stosowany w praktyce wymiarowania systemów odwodnieniowych ze względu m.in. na zbyt krótki zakres czasu trwania opadów (do 105 minut), a także brak określenia współczynników b_0, b_1, b_2 dla C = 1 rok.

2.2.4. Model Licznara i Łomotowskiego z 2005 roku

Licznar i Łomotowski dla danych pluwiograficznych ze stacji Wrocław-Swojec z wielolecia 1975-2002 (z pominięciem lat 1976, 1983, 1985, 1988 i 1993 z powodu braku kompletnych zapisów opadów), czyli z okresu 23 lat obserwacji wyodrębnili 959 opadów, przyjmując kryterium $h \geq 1{,}3$ mm dla $t \leq 6$ godzin. Na tej podstawie wyestymowali współczynniki empiryczne różnych postaci modeli opadów. Najwyższą zgodność statystyczną opisów uzyskali dla dwóch modeli, ogólnej postaci (1.2) - na średnie [32] oraz na maksymalne (chwilowe) natężenia deszczy (te ostatnie spośród 662 największych opadów) dla $t \leq 180$ min i C = 1, 2, 5 i 10 lat. Dla opadów maksymalnych model fizykalny Licznara-Łomotowskiego przyjmuje postać [33,34]:

$$q_{\max} = \frac{a}{(t+b)^n} + c \tag{2.29}$$

gdzie:

q - jednostkowe (maksymalne-chwilowe) natężenie opadów miarodajnych, $dm^3/(s \cdot ha)$,

t - czas trwania deszczu, min,

a, b, c, n - współczynniki regresji, zależne od prawdopodobieństwa p, wg tabeli 2.3.

Tabela 2.3.
Wartości współczynników a, b, c i n do modelu (2.29) na maksymalne natężenia deszczy

Prawdopodobieństwo *p*, %			
10%	**20%**	**50%**	**100%**
a = 713,8329	a = 82413,63	a = 643645564	a = 1573,239
b = -3,88429	b = 19,57292	b = 64,88700	b = 4,787518
c = -210,067	c = 20,40978	c = 20,62691	c = 6,351722
n = 0,218073	n = 1,752958	n = 3,535880	n = 0,949642

Modele Lambora (2.22), Wołoszyna (2.23), Sowińskiego (2.28) czy Licznara-Łomotowskiego (2.29) mają znaczenie lokalne, dla określonych obszarów Wrocławia i okolic. Wyniki obliczeń z tych modeli-wzorów empirycznych są wyjątkowo rozbieżne, co w części wytłumaczyć można różnym położeniem przestrzennym źródłowych stacji meteorologicznych w mieście. Przykładowo, jak wykazano w pracy [35] dla $C = 1$ rok i $t \in [5; 180]$ min, natężenia jednostkowe deszczy liczone modelami Wołoszyna oraz Licznara i Łomotowskiego różnią się aż 3÷4 krotnie (np. dla $t = 15$ min: wg Wołoszyna $q_{15,1} = 26{,}9$ $dm^3/(s \cdot ha)$, a wg Licznara-Łomotowskiego $q_{15,1} = 98{,}8$ $dm^3/(s \cdot ha)$). Główną przyczyną tych różnic, jak się wydaje, jest jednak odmienna metodyka opracowywania wyników pomiarów, w tym zwłaszcza interpretacji szeregów częstości występowania charakterystycznych opadów, ale także jakość dostępnego materiału źródłowego. W przykładzie, w pierwszym przypadku była to tzw. metoda średnich natężeń deszczy - obliczanych z całego okresu trwania danego opadu, a w drugim - metoda maksymalnych („chwilowych" [34]) natężeń deszczy, jako największych w przyjętych kolejnych (stałych) interwałach czasu trwania opadu, o czym będzie jeszcze mowa. Właściwe więc będzie zweryfikowanie przydatności tych i innych (o zasięgu ogólnopolskim) modeli - wzorów do projektowania odwodnień terenów w warunkach wrocławskich.

2.3. Porównanie modelu Błaszczyka z innymi modelami opadów

Dyskutowane modele opadów dają się wstępnie podzielić na dwie grupy. Do pierwszej grupy historycznych już modeli – opracowanych na podstawie danych z długich okresów obserwacji opadów, zaliczyć można modele: Reinholda (z okresu kilkudziesięciu lat), Błaszczyka i Chomicza (z 67 lat obserwacji w Warszawie), Lambora (z ok. 50 lat), Wołoszyna (z 42 lat obserwacji we Wrocławiu) czy też Sowińskiego (z 40 lat obserwacji we Wrocławiu). Do drugiej grupy modeli, niedawno opublikowanych a więc rzadziej jak dotychczas stosowanych w praktyce - opartych na danych z krótszych okresów obserwacji opadów, zaliczyć należy modele: Bogdanowicz-Stachy z 1998 r. (z 31 lat pomiarów IMGW na terenie kraju, z wyjątkiem obszarów podgórskich i górskich), Licznara-Łomotowskiego z 2005 r. (z 23 lat obserwacji we Wrocławiu) czy też Stachy z 1987 r. (z 10 lat obserwacji na terenie całego kraju).

Drugim kryterium podziału jest zasięg terytorialny analizowanych modeli. Zarówno w pierwszej jak i w drugiej grupie modeli, występują modele opadów, bądź to o ogólnopolskim lub regionalnym zasięgu (jak np. modele: Błaszczyka, Lambora, czy Bogdanowicz-Stachy), bądź też modele o zasięgu lokalnym, ograniczonym wyłącznie do Wrocławia jak np. modele: Wołoszyna, Sowińskiego czy Licznara-Łomotowskiego.

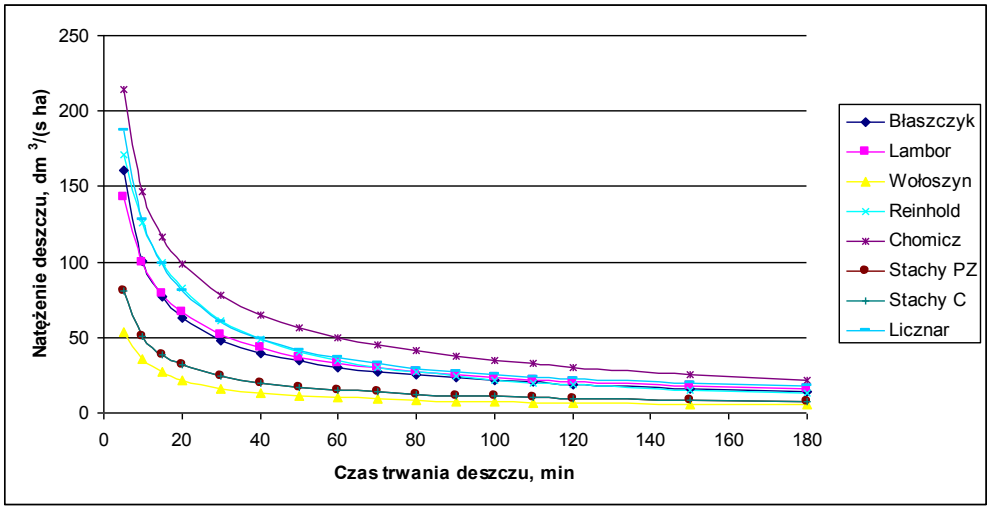
Trzecie kryterium podziału dotyczy metodologii tworzenia dyskutowanych modeli opadów. Zarówno modele o szerokim zasięgu terytorialnym, jak i ograniczone do Wrocławia, można podzielić na dwie klasy:

- modele fizykalne – oparte na empirycznym przyporządkowaniu częstości występowania zmierzonych szeregów wysokości opadów w czasie ich trwania, jak np. modele opadów: Błaszczyka, Chomicza czy Licznara-Łomotowskiego,
- modele probabilistyczne – opracowane na podstawie doboru teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa występowania zmierzonych szeregów częstości opadów, jak np. modele opadów: Sowińskiego, Stachy czy Bogdanowicz-Stachy.

Spośród 10 zaprezentowanych modeli opadów tylko 4 modele: Stachy oraz Bogdanowicz-Stachy - dla Polski oraz Sowińskiego oraz Licznara-Łomotowskiego - dla Wrocławia, zostało ustalonych w oparciu o przedziałowe (wyznaczane bądź odczytywane) wartości wysokości opadów. Modele te wykazują stosunkowo wysoką wzajemną zgodność wyników. Jednak

praktyczne znaczenie mają jedynie modele Bogdanowicz-Stachy (poza częstością C = 1 rok – przyczyny tego problemu zostaną wyjaśnione w pracy) oraz Licznara-Łomotowskiego.

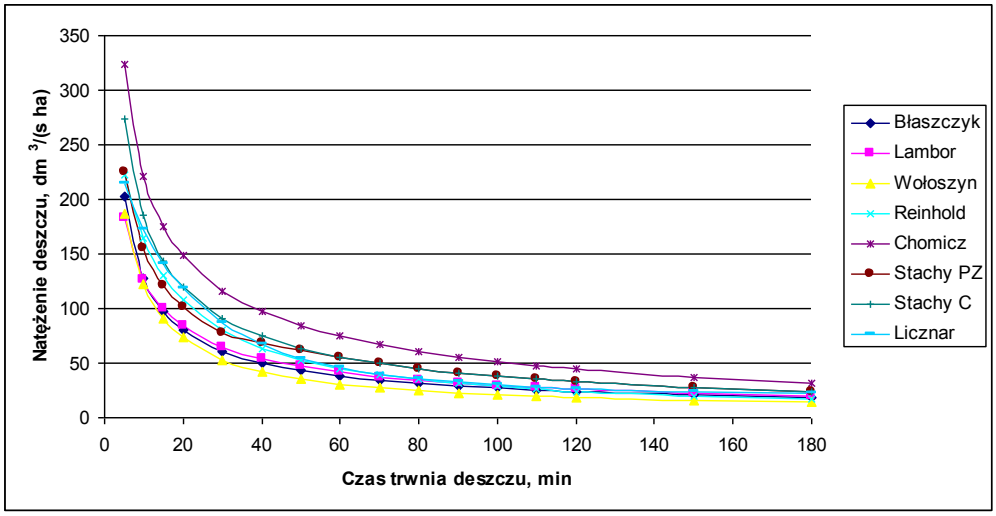
Wzajemne różnice jakościowe danych opadowych, a także założeń wyjściowych i metod badawczych zastosowanych do wyprowadzenia dotychczasowych modeli opadów doprowadziły w efekcie do znacznych wzajemnych różnic ilościowych. Świadczy to o złożoności omawianego tutaj problemu. Ilustrację wspomnianych różnic wyników obliczeń natężenia jednostkowego deszczy w zakresie czasu trwania $t \in [5; 180]$ minut oraz częstości występowania opadów $C \in [1; 10]$ lat podano na czterech rysunkach, przedstawiających krzywe typu IDF, w kolejności: na rys. 2.2 - dla C = 1 rok, na rys. 2.3 - dla C = 2 lata, na rys. 2.4 - dla C = 5 lat oraz na rys. 2.5 - dla C = 10 lat.



Rys. 2.2. Krzywe natężenia deszczu dla C = 1 rok (Skróty oznaczeń: „Stachy PZ" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu północno-zachodniego; „Stachy C" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu centralnego; „Licznar" - model Licznara-Łomotowskiego)

Na rysunku 2.2 przedstawiono zbiorcze zestawienie krzywych natężenia deszczy (typu IDF) dla częstości występowania C = 1 rok i czasach trwania t od 5 do 180 minut, obliczone ze wzorów: Reinholda (2.1), Błaszczyka (2.3), Chomicza (2.5), Lambora (2.6), Bogdanowicz-Stachy (2.11) – dla regionów północno-zachodniego i centralnego, Wołoszyna (2.23) oraz Licznara-Łomotowskiego (2.29). Opad średni roczny z wielolecia w modelu Błaszczyka i Lambora przyjęto na poziomie H = 600 mm; w modelu Reinholda jako natężenie deszczu wzorcowego przyjęto $q_{15,1}$ = 100 dm^3/(s·ha). Łatwo zauważyć znaczne różnice wyliczonych wartości z poszczególnych wzorów. Wśród wyznaczonych krzywych dla C = 1 wyraźnie od pozostałych odbiegają krzywe: Chomicza (in plus) oraz Bogdanowicz-Stachy i Wołoszyna (in minus). Przykładowo dla deszczy krótkotrwałych o czasie t = 15 minut otrzymamy z modelu Chomicza q = 116,7 dm^3/(s·ha), Reinholda - 100, Licznara-Łomotowskiego - 98,8, Lambora - 78,9 i Błaszczyka - 76,9, ale już z modelu Bogdanowicz-Stachy - 38,6 oraz Wołoszyna - 26,9 dm^3/(s·ha). Różnica wartości q jest w skrajnym przypadku ponad 4-krotna (rys. 2.2). Podobna sytuacja występuje w przypadku dłuższych czasów trwania deszczy. Przykładowo, natężenia opadów o czasie trwania t = 60 minut wyliczone z modeli: Chomicza (q = 50,0 dm^3/(s·ha)), Licznara-Łomotowskiego (36,3), Reinholda (34,8), Lambora (32,9) czy Błaszczyka (30,4) znacznie przewyższają wyniki otrzymywane z modelu Bogdanowicz-Stachy (15,2) czy też Wołoszyna (10,1). Różnica wartości q jest w skrajnym przypadku prawie 5-krotna. Dla deszczy trwających 3 godziny różnice te tylko nieznacznie maleją (rys. 2.2).

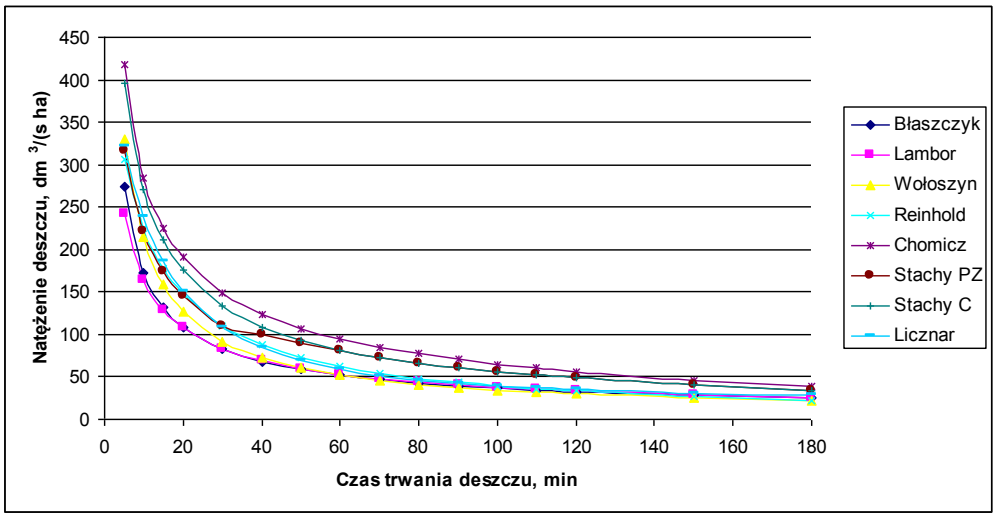
Na rysunku 2.3 przedstawiono krzywe IDF dla C = 2 lata. W porównaniu z C = 1 należy zauważyć większą zgodność wyników q otrzymywanych z poszczególnych modeli. Najbardziej odbiegającą od pozostałych (in plus) jest krzywa opisana modelem Chomicza. Dla przykładu dla deszczu o czasie trwania 15 minut natężenia obliczone z modeli Wołoszyna (q = 91,1 $dm^3/(s \cdot ha)$), Błaszczyka (96,8) czy Lambora (100) są znacznie mniejsze od obliczonych z modeli Bogaczewicz-Stachy (121,1 - region północno-zachodni i 144,1 - region centralny), Reinholda (130), Licznara-Łomotowskiego (141,3) czy Chomicza (175,6). Różnice są zatem w skrajnym przypadku niemal 2-krotne.



Rys. 2.3. Krzywe natężenia deszczu dla C = 2 lata (Skróty oznaczeń: „Stachy PZ" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu północno-zachodniego; „Stachy C" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu centralnego; „Licznar" - model Licznara-Łomotowskiego)

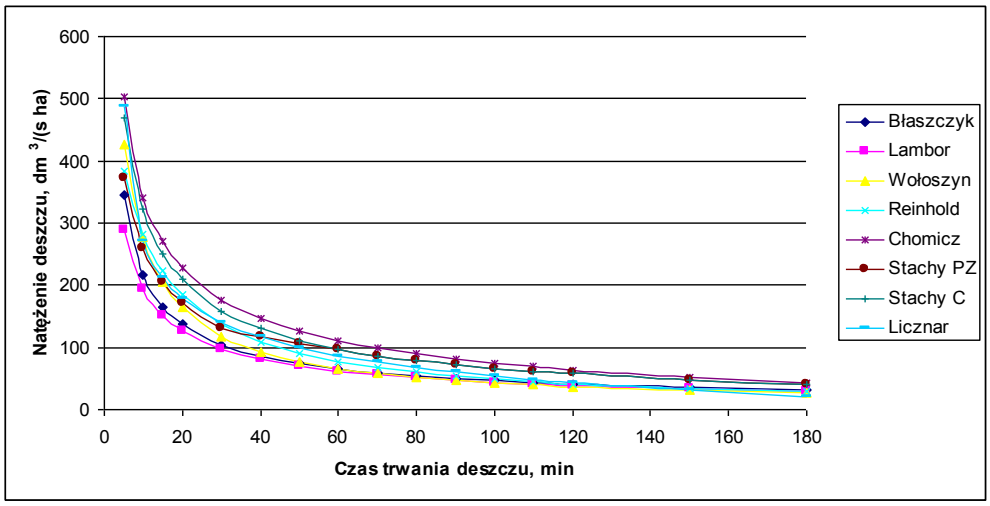
Podobna sytuacja występuje w przypadku deszczy dłużej trwających. Przykładowo dla deszczu trwającego 60 minut najmniejszą wartość q otrzymamy z modelu Wołoszyna (30,6), ale już z modeli Błaszczyka (38,3), Lambora (41,5), Reinholda (45,2) czy Licznara-Łomotowskiego (45,5) otrzymamy porównywalne wyniki, natomiast największe – z modeli Bogaczewicz-Stachy (55,7) oraz Chomicza (aż 74,5). Podobnie też, dla deszczy trwających 3 godziny różnice wartości q będą przeszło 2-krotne.

Na rysunku 2.4 przedstawiono krzywe natężenia deszczu dla C = 5 lat. Zaobserwować można tutaj większą zgodność wartości q, niż w przypadku krzywych wyznaczonych dla mniejszych wartości C. Wyniki otrzymywane z poszczególnych modeli nadal jednak znacznie się między sobą różnią. Dla deszczu o czasie trwania 15 minut najmniejsze natężenia otrzymamy z modeli Lambora (129,1) czy Błaszczyka (131,4), a największe z modeli Bogdanowicz-Stachy (173,6 i 211,1) oraz Chomicza (225,8). Podobna sytuacja występuje tutaj w przypadku deszczy dłużej trwających. W skrajnych przypadkach różnice q wynoszą 1,7÷1,8.



Rys. 2.4. Krzywe natężenia deszczu dla C = 5 lat (Skróty oznaczeń: „Stachy PZ" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu północno-zachodniego; „Stachy C" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu centralnego; „Licznar" - model Licznara-Łomotowskiego)

Na rysunku 2.5 przedstawiono krzywe IDF dla C = 10 lat. Krzywe te charakteryzują się również podobną (względną) zgodnością wyników, jak w przypadku C = 2 i 5 lat. Dla deszczu o czasie trwania 15 minut najmniejsze natężenia deszczu otrzymamy z modeli Lambora (151,7) i Błaszczyka (165,6), największe natomiast z modeli Bogdanowicz-Stachy (205,1 - region północno-zachodni i 251,3 - region centralny) oraz Chomicza (270,1). Różnice są rzędu 1,8. Ale już dla deszczy dłużej trwających np. 180 minut zdecydowanie najmniejsze wartości q wykazuje model Licznara-Łomotowskiego (21,1), a największe – modele Bogaczewicz-Stachy (40,7) oraz Chomicza (43,6). Różnice dla C = 10 są więc nadal 2-krotne.



Rys. 2.5. Krzywe natężenia deszczu dla C = 10 lat (Skróty oznaczeń: „Stachy PZ" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu północno-zachodniego; „Stachy C" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu centralnego; „Licznar" - model Licznara-Łomotowskiego)

Dla unaocznienia różnic ilościowych wyników obliczeń natężenia deszczy z modelu Błaszczyka (jak dotychczas najczęściej stosowanego w Polsce do wymiarowania kanalizacji) względem innych znanych modeli, wykonano odpowiednie zestawienie podane w tabeli 2.4.

Do celów porównawczych przyjęto wynik obliczeń natężenia opadu z modelu Błaszczyka ($q_{Bł}$) za 100% - odpowiednio dla czasów trwania deszczy t = 5, 10, 15, 30, 60, 120 i 180 minut i częstości występowania C = 1, 2, 5 i 10 lat. Względne przewyższenia wyników obliczeń (q) z innych modeli względem modelu Błaszczyka ($q/q_{Bł}$) zaznaczono pogrubioną czcionką. Z tabeli 2.4 wynika m.in., że zdecydowana większość analizowanych modeli (postaci fizykalnej bądź probabilistycznej), zarówno o zasięgu ogólnopolskim, jak i opracowanych dla Wrocławia, wskazuje na znacznie wyższe wartości natężenia deszczy miarodajnych do wymiarowania kanalizacji w porównaniu z obliczanymi tradycyjnie z modelu Błaszczyka. Przewyższenia te są ogólnie różne w różnych zakresach t i C. W skrajnych przypadkach sięgają nawet 90%, przeciętnie są jednak na poziomie o 40% większym. Wynika stąd wniosek o pilnej konieczności zastąpienia modelu Błaszczyka (z 1954 r.) w wymiarowaniu systemów kanalizacyjnych w Polsce, dokładniejszymi modelami, w tym o zasięgu lokalnym. Jedynie dla C = 1 rok, opierając się na wynikach obliczeń z większości modeli, można wskazać na znaczne bo o rząd 50% zaniżenie wyników z modelu (2.11) Bogdanowicz-Stachy, czy też aż o 65% z modelu (2.22) Wołoszyna, nawet względem modelu Błaszczyka (2.3).

Tak więc wspomniane różnice jakościowe danych o opadach, założeń wyjściowych i metod badawczych zastosowanych do wyprowadzania powyższych modeli doprowadziły w efekcie do znacznych wzajemnych różnic ilościowych. Przyczyny tego stanu rzeczy wymagają naświetlenia, a dotychczasowa wiedza w tym zakresie wymaga usystematyzowania, co jest też celem w pracy.

Tabela 2.4.

Porównanie natężeń deszczy obliczonych z modeli różnych autorów względem modelu Błaszczyka ($q/q_{Bł}$) - najczęściej stosowanego w Polsce do wymiarowania kanalizacji

Częstość deszczu C, lata	**Czas trwania deszczu t, min**	**Błaszczyk (2.3)** q_{Bl} = 1,0 = 100%	**Reinhold (2.1)** $q_{15,1}$ = 100 dm^3/(s·ha)	**Chomicz (2.5)**	**Lambor (2.6)**	**Bogdanowicz-Stachy (2.11)** - region pn.- zach.	**Bogdanowicz-Stachy (2.11)** - region centralny	**Stachy (2.21)** Wrocław	**Lambor (2.22)** Wrocław	**Wołoszyn (2.23)** Wrocław	**Sowiński (2.28)** Wrocław	**Licznar- Łomotowski (2.29)** Wrocław
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	5	1,00	**1,07**	**1,34**	0,89	0,50	0,50	*	**1,09**	0,33	*	**1,16**
	10	1,00	**1,25**	**1,45**	0,99	0,50	0,50	*	**1,18**	0,35	*	**1,27**
	15	1,00	**1,30**	**1,52**	**1,03**	0,50	0,50	*	**1,21**	0,35	*	**1,28**
***C* = 1**	30	1,00	**1,27**	**1,61**	**1,07**	0,50	0,50	*	**1,23**	0,34	*	**1,25**
	60	1,00	**1,15**	**1,65**	**1,08**	0,50	0,50	*	**1,23**	0,33	*	**1,20**
	120	1,00	0,98	**1,60**	**1,09**	0,50	0,50	*	**1,21**	0,35	*	**1,18**
	180	1,00	0,87	**1,50**	**1,09**	0,50	0,50	*	**1,07**	0,37	*	**1,20**
	5	1,00	**1,10**	**1,60**	0,90	**1,11**	**1,35**	**1,45**	**1,15**	0,92	*	**1,06**
	10	1,00	**1,29**	**1,74**	1,00	**1,22**	**1,46**	**1,44**	**1,24**	0,96	**1.34**	**1,36**
	15	1,00	**1,34**	**1,81**	**1,03**	**1,25**	**1,49**	**1,43**	**1,27**	0,94	**1.42**	**1,46**
***C* = 2**	30	1,00	**1,31**	**1,91**	**1,07**	**1,27**	**1,49**	**1,42**	**1,29**	0,87	**1.31**	**1,42**
	60	1,00	**1,18**	**1,95**	**1,08**	**1,46**	**1,46**	**1,41**	**1,30**	0,80	**1.09**	**1,19**
	120	1,00	**1,01**	**1,87**	**1,09**	**1,39**	**1,39**	**1,40**	**1,28**	0,76	*	**1,12**
	180	1,00	0,90	**1,73**	**1,09**	**1,30**	**1,30**	*	**1,27**	0,76	*	**1,25**
	5	1,00	**1,11**	**1,52**	0,88	**1,15**	**1,44**	**1,49**	**1,12**	**1,20**	*	**1,17**
	10	1,00	**1,31**	**1,65**	0,95	**1,28**	**1,57**	**1,48**	**1,44**	**1,24**	**1.45**	**1,38**
	15	1,00	**1,36**	**1,72**	0,98	**1,32**	**1,61**	**1,48**	**1,48**	**1,21**	**1.51**	**1,41**
***C* = 5**	30	1,00	**1,33**	**1,80**	**1,01**	**1,34**	**1,61**	**1,47**	**1,50**	**1,11**	**1.39**	**1,31**
	60	1,00	**1,20**	**1,82**	**1,02**	**1,57**	**1,57**	**1,46**	**1,50**	1,00	**1.15**	**1,13**
	120	1,00	**1,02**	**1,72**	**1,02**	**1,49**	**1,49**	**1,45**	**1,49**	0,91	*	**1,06**
	180	1,00	0,91	**1,57**	**1,02**	**1,38**	**1,38**	*	**1,47**	0,89	*	**1,13**
	5	1,00	**1,11**	**1,46**	0,84	**1,07**	**1,36**	**1,41**	**1,06**	**1,23**	*	**1,41**
***C* = 10**	10	1,00	**1,30**	**1,57**	0,90	**1,20**	**1,48**	**1,40**	**1,15**	**1,27**	**1.43**	**1,25**
	15	1,00	**1,35**	**1,63**	0,92	**1,24**	**1,52**	**1,39**	**1,17**	**1,24**	**1.47**	**1,28**
	30	1,00	**1,32**	**1,70**	0,94	**1,26**	**1,52**	**1,38**	**1,19**	**1,13**	**1.34**	**1,35**

	60	1,00	**1,19**	**1,70**	0,94	**1,48**	**1,48**	**1,37**	**1,19**	**1,01**	**1.11**	**1,32**
	120	1,00	**1,01**	**1,56**	0,94	**1,40**	**1,40**	**1,36**	**1,18**	0,90	*	**1,05**
	180	1,00	0,90	**1,39**	0,94	**1,30**	**1,30**	*	**1,17**	0,87	*	0,67

* - poza zakresem stosowalności wzoru; przewyższenia wzoru Błaszczyka pogrubiono

2.4. Doraźne zalecenia do projektowania odwodnień terenów w Polsce

W celu podwyższenia niezawodności działania systemów odwadniania terenów, w tym kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, projektowanych i budowanych w Polsce, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 752:2008 pilna staje się potrzeba uściślenia zasad ich wymiarowania w oparciu o ciągłe pomiary opadów z okresu kilkudziesięciu lat dla wychwycenia ewentualnego trendu zmian klimatycznych, zwłaszcza w ostatnich dziesięcioleciach. O wiarygodności każdej metody obliczeniowej, jak wynika z teorii niezawodności, decyduje najsłabsze ogniwo, w tym wypadku dokładność danych bądź algorytmów ich opracowywania.

Opracowane w latach 50 i 60-tych XX wieku i utrwalone w literaturze przedmiotu [2,3,36-46] zasady wymiarowania odwodnień terenów w Polsce, w tym zwłaszcza systemów kanalizacyjnych - z wyjściowym modelem Błaszczyka na natężenie deszczu są coraz częściej kontestowane jako nieodpowiednie, tzn. zaniżające wyniki obliczeń miarodajnych strumieni opadów, a tym samym prowadzące do niewłaściwego („zbyt oszczędnego") wymiarowania sieci i obiektów kanalizacyjnych [4-10,16,34,47-52]. Chodzi tutaj zwłaszcza o systemy ogólnospławne (przeżywające w wielu krajach swój renesans), a w tym w szczególności o podstawy projektowania zbiorników retencyjnych - wymiarowanych w oparciu o model Błaszczyka [53-58], czy też towarzyszących im przelewów burzowych [59-66], a także separatorów [67-70] i regulatorów przepływu ścieków [71-74] w systemach rozdzielczych (na kanalizacji deszczowej). Zasady te wymagają więc weryfikacji, a zwłaszcza pilnego zastąpienia modelu Błaszczyka nowymi dokładniejszymi modelami, w tym o zasięgu lokalnym, na podstawie których możliwe byłoby w przyszłości opracowanie szczegółowego atlasu opadów w Polsce - na wzór atlasu KOSTRA w Niemczech. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej zapoczątkował w tym zakresie współpracę z Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział we Wrocławiu.

Na podstawie analizy porównawczej istniejących modeli opadów, przeprowadzonej w niniejszej pracy, a także analiz stosowanych w Polsce zasad wymiarowania kanalizacji deszczowych i ogólnospławnych wraz ze zbiornikami retencyjnymi, przeprowadzonych w pracach [5-10], do czasu opracowania atlasu opadów maksymalnych w Polsce (w oparciu o modele lokalne) można sformułować doraźne zalecenia co do zasad projektowania systemów odwodnieniowych, w szczególności (tab. 2.5):

- odnośnie wymiarowania sieci kanalizacyjnych (wg wymagań PN-EN 752 - tab. 1.1):
  - dla częstości projektowej deszczu C = 1 rok można w dalszym ciągu stosować model Błaszczyka – jednak z niezbędną korektą częstości na C = 2 lata (- tak jak to jest obecnie zalecane dla kanalizacji ogólnospławnej wg [2,3]) lub zamiennie model Reinholda, bądź też wiarygodne modele lokalne (jak np. model Licznara-Łomotowskiego dla rejonu Wrocławia-Swojca);
  - dla częstości projektowych deszczy C = 2, 5 i 10 lat zaleca się stosowanie modelu Bogdanowicz-Stachy bądź wiarygodnych modeli lokalnych;
- odnośnie wymiarowania zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych, ze względu na ich wagę w zapewnieniu niezawodności działania systemów odwodnieniowych terenów, należy odpowiednio zwiększyć wartości przyjmowanych częstości projektowych opadów dla zbiorników $C_z > C$, w stosunku do zalecanych częstości projektowych do wymiarowania sieci kanalizacyjnych (na wzór zaleceń niemieckich) i korzystać tutaj z wyżej wymienionych, zalecanych doraźnie modeli opadów (tab. 2.5).

Tabela 2.5.

Zalecane doraźnie w Polsce modele opadów i częstości projektowe: C - deszczu do wymiarowania sieci odwodnieniowych oraz C_z - do wymiarowania zbiorników retencyjnych [9]

Kategoria terenu	**Wymagane częstości projektowe:**			**Doraźnie zalecane modele opadów i częstości deszczy:**	
	deszczu C wg [11]	**nadpiętrzenia C_n wg [14,21]**	**wylewów C_w wg [11]**	**C - do wymiarowania sieci odwodnieniowych**	**C_z - do wymiarowania zbiorników retencyjnych**
-	lata	lata	lata	lata	lata
I	1	2	10	Błaszczyk dla $C = 2$ lata (Reinhold dla $C = 1$ rok)	Błaszczyk dla $C_z \geq 5$ lat (Reinhold dla $C_z \geq 2$ lat)
II	2	3	20	Bogdanowicz-Stachy dla $C = 2$	Bogdanowicz-Stachy dla $C_z \geq 5$
III	5	rzadziej niż 5	30	Bogdanowicz-Stachy dla $C = 5$	Bogdanowicz-Stachy dla $C_z \geq 10$
IV	10	rzadziej niż 10	50	Bogdanowicz-Stachy dla $C = 10$	Bogdanowicz-Stachy dla $C_z \geq 20$

Projektowane systemy odwodnieniowe obejmujące zlewnie deszczowe o powierzchni $F > 2$ km^2 proponuje się dodatkowo sprawdzać pod kątem ich przepustowości hydraulicznej (sieci i obiektów) w oparciu o skalibrowane modele symulacyjne - dla spełnienia zaleceń co do akceptowalnych społecznie częstości nadpiętrzeń czy wylewów (tab. 1.1 i 2.5).

Brak zaleceń co do stosowania modelu Bogdanowicz-Stachy dla częstości $C = 1$ rok (tab. 2.5) wynika wprost z analizy wyników obliczeń natężeń jednostkowych deszczy (q) podanych w tabeli 2.6 (dla $t \in [5, 180]$ minut i $C = 1$ rok, $H = 600$ mm oraz $q_{15,1} = 100$ dm^3/(s·ha)). Z tabeli tej wynika też uzasadnienie konieczności korekty częstości deszczy w modelu Błaszczyka (2.3) dla $C = 1$ rok, mianowicie z $C = 1$ na $C = 2$. Uzyskamy wówczas wyższe wartości natężeń jednostkowych (q) - korespondujące już z wynikami większości modeli innych autorów dla $C = 1$ rok, tj. z modelami: Reinholda (2.1), Chomicza (2.5), Lambora (2.22) i Licznara-Łomotowskiego (2.29) (wzajemne różnice są rzędu ±10% - tab. 2.6).

Tabela 2.6.

Porównanie wyników obliczeń natężeń deszczy q z różnych modeli opadów dla $C = 1$ i 2 lat

Częstość deszczu	**Czas trwania deszczu, t**	**Błaszczyk (2.3)**	**Reinhold (2.1)**	**Chomicz (2.5)**	**Lambor (2.6)**	**Bogdanowicz-Stachy (2.11) – region pn.-zach.**	**Bogdanowicz-Stachy (2.11) - region centr.**	**Stachy (2.21)** Wrocław-Strachowice	**Lambor (2.22)** Wrocław	**Wołoszyn (2.23)** Wrocław	**Sowiński (2.28)** Wrocław	**Licznar-Łomotowski (2.29)** Wocław-Swojec
lata	min	dm^3/(s ha)						dm^3/(s ha)				
$C = 1$	5	160,5	171,4	214,4	142,8	**80,5**		*	174,9	53,5	*	186,7
	10	100,9	126,3	146,7	99,7	**50,6**		*	119,1	35,4	*	128,2
	15	76,9	100,0	116,7	78,9	**38,6**		*	92,8	26,9	*	98,8
	30	48,3	61,5	77,7	51,5	**24,2**		*	59,4	16,3	*	60,4
	60	30,4	34,8	50,0	32,9	**15,2**		*	37,4	10,1	*	36,3
	120	19,1	18,6	30,5	20,8	**9,6**		*	23,1	6,6	*	22,4
	180	14,5	12,7	21,8	15,8	**7,3**		*	15,5	5,4	*	17,4
$C = 2$	5	**202,2**	222,8	323,7	182,8	224,8	273,2	292,8	232,5	186,6	*	214,3
	10	**127,1**	164,2	221,0	126,7	154,7	185,2	182,8	157,6	121,8	170,4	172,3
	15	**96,8**	130,0	175,6	100,0	121,1	144,1	138,7	122,9	91,1	137,5	141,3
	30	**60,9**	80,0	116,3	65,0	77,2	90,9	86,6	78,6	53,1	79,9	86,3
	60	**38,3**	45,2	74,5	41,5	55,7		54,0	49,8	30,6	41,7	45,5
	120	**24,0**	24,2	44,8	26,2	33,4		33,7	30,7	18,2	*	26,8
	180	**18,3**	16,5	31,7	19,9	23,9		*	23,2	13,9	*	22,9

3. Metody badawcze i materiał pluwiograficzny Wrocławia-Strachowic

3.1. Ogólna charakterystyka opadów deszczu

Opady atmosferyczne będące nieciągłym elementem meteorologicznym charakteryzują się dużą zmiennością czasową i przestrzenną występowania oraz znacznym zróżnicowaniem sum wysokości. O zjawisku (reżimie) opadowym określonego obszaru decyduje szereg uwarunkowań środowiskowych, spośród których do najważniejszych zalicza się położenie geograficzne, odległość od mórz i oceanów, ukształtowanie powierzchni i wyniesienie obszaru nad poziomem morza, pokrycie i sposób użytkowania terenu i inne. Pomiar opadu odbywa się w sposób punktowy w określonej sieci stacji pomiarowych, co w odniesieniu do powyższego wymaga stosowania odpowiednich metod interpretacji uzyskanych wyników dla większych obszarów. Związki natężenia (intensywności czy wysokości) opadów deszczu z czasem trwania i częstością występowania, opracowane dla wielu regionów geograficznych świata (Ameryki, Azji czy Europy) są zbliżone do siebie jakościowo [18,75,76,77]. Nie znaczy to wcale, że są one identyczne ilościowo, zwłaszcza w mikroskali opadów lokalnych.

Tabela 3.1.

Ekstremalne sumy wysokości opadów atmosferycznych (i średnie intensywności) na świecie i w Polsce (wartości wybrane dla czasów trwania opadu od 1 minuty do 72 godzin)

Czas trwania opadu	Suma mm	Intensywność mm/min	Miejscowość (kraj)	Data opadu
1 min	38	38,00	Barot / Barst (Gwadelupa)	26-11-1970
2 min	**35,3**	**17,65**	**Szychowice (Polska)**	**13-06-1956**
5 min	63	12,60	Porto Bello (Panama)	01-05-1911
8 min	126	15,75	Füssen (Niemcy)	25-05-1920
15 min	198	13,20	Plumb Point (Jamajka)	12-05-1916
20 min	206	10,30	Curtea-de-Arges (Rumunia)	07-07-1889
30 min	280	9,33	Sikeshugou (Chiny)	03-07-1974
42 min	305	7,26	Holt (USA)	22-06-1947
60 min	401	6,68	Shangdi (Chiny)	03-07-1975
2 godz.	489	4,08	Yujiawanzi (Chiny)	19-07-1975
2 godz. 30 min	550	3,67	Bainaobao (Chiny)	25-06-1972
3 godz.	600	3,33	Duan Jiazhuang (Chiny)	28-06-1973
4 godz. 30 min	782	2,90	Smethport (USA)	18-07-1942
10 godz.	1400	2,33	Muduocaidang (Chiny)	01-08-1977
18 godz. 30 min	1689	1,52	Belouve (Reunion)	28/29-02-1964
24 godz.	**300**	**0,21**	**Hala Gąsienicowa (Polska)**	**30-06-1973**
24 godz.	1870	1,30	Cilaos (Reunion)	15/16-03-1952
48 godz.	**428,0**	**0,30**	**Masyw Śnieżnika Kłodzkiego**	**05/07-07-1997**
48 godz.	2500	0,87	Cilaos (Reunion)	15/17-03-1962
72 godz.	**557,0**	**0,13**	**Masyw Śnieżnika Kłodzkiego**	**05/07-07-1997**
72 godz.	3929	0,91	Cratere Commerson (Reunion)	24/26-02-2007

Źródła danych: Prokop P.: Maksymalne opady oraz czas ich trwania na świecie i w Polsce. Przegląd Geofizyczny 2006, R. LI, nr 2 ([77]); http://www.wou.edu (za R. K. Linsley Jr., M. A. Kohler and L. H. Paulhus. McGraw-Hill Book Company 1982); http://wmo.asu.edu/; http://ams.allenpress.com (A Wolrd Rekord Rainfall Rate At Holt, Missouri: Was It Due to Cold Frontogenesis Aloft?); http://australiasevereweather.com (Monthly Global Tropical Cyclone); http://www.webcitation.org (Cyclones – Gamede and Hyacinthe); http://docs.lib.noaa.gov (Indian Ocean and Taiwan Rainfalls set new Records); http://docs.lib.noaa.gov (Panama Rainfall).

Dane zamieszczone w tabeli 3.1 prezentują najwyższe, w skali monitorowanej instrumentalnie powierzchni globu ziemskiego, historycznie odnotowane sumy opadów o określonym czasie trwania. Analiza zamieszczonych danych informuje jednocześnie o

wielkości zagrożenia, jakie niesie ze sobą wystąpienie opadów o określonej intensywności, tj. wysokości w jednostce czasu. Szczególnie wysokim zagrożeniem charakteryzują się opady krótkotrwałe, których wystąpienie wywołuje utrudnienia funkcjonowania kanalizacji. Analizując zamieszczone w tabeli 3.1 przykłady opadów maksymalnych zauważalne jest, że większość przypadków odnosi się do stref klimatycznych innych, niż strefa umiarkowana, w której znajduje się obszar Polski, charakterystycznych dla strefy klimatów gorących i wilgotnych. W strefie klimatu monsunowego czy tropikalnego nasycone wilgocią, oceaniczne masy powietrza nie są rzadkością, a osiągane podczas długotrwałych opadów jedno lub kilkudniowe sumy wysokości opadów wielokrotnie przewyższają wielkości rocznych opadów dla Polski.

Odnosząc się do ekstremalnie wysokich opadów o długich czasach trwania występujących na obszarze Polski, należy zaznaczyć, że oficjalnym rekordem wysokości opadów za 24-godzinny okres czasu jest opad odnotowany w dniu 30 czerwca 1973 r., którego suma wyniosła 300,0 mm (Hala Gąsienicowa). Suma opadu za okres 48 godzin (29/30 VI) wyniosła wówczas 372,8 mm, a za przedział czasu 72 godzin (29 VI – 01 VII) zmierzono 384,5 mm. Podczas tych dni w regionie bardzo obfite deszcze wystąpiły także na innych stacjach - na Hali Kondratowej, odpowiednio: 269,4 mm, 326,1 mm i 333,7 mm oraz na Kasprowym Wierchu: 232,0 mm, 290,0 mm i 298,3 mm [78]. Wysokości opadów o czasie trwania powyżej 24-godzin wskazują, że to obszar Polski cechuje się wartościami najwyższymi wśród otaczających nas krajów. W Polsce najwyższe sumy opadów trwających 48- i 72-godziny wystąpiły w regionie Masywu Śnieżnika Kłodzkiego w dniach 05-07 lipca 1997 r. Sumy zmierzone zostały na stacji opadowej należącej do Uniwersytetu Wrocławskiego, funkcjonującej poza państwową siecią pomiarowo-obserwacyjną, reprezentowaną przez IMGW. Najwyższa 48- i 72-godzinna suma opadów wyniosła wówczas odpowiednio 428,0 i 557,0 mm [79]. Podczas pamiętnej powodzi z lipca 1997 r. na sieci IMGW najwyższa suma dobowa zmierzona została na stacji w Międzygórzu i wyniosła 200,1 mm (06 VII), suma 48-godzinna wyniosła 364,6 mm (04-07 VII), a suma za 72-godziny osiągnęła 431,2 mm (05-07 VII). Rekordowa była też wówczas miesięczna suma opadów wynosząca 702,0 mm (Kamienica) [80].

Z analizy maksymalnych wysokości opadów o czasach trwania od 5 minut do 72 godzin (tab. 3.2), charakterystycznych dla wybranych krajów europejskich w odniesieniu do warunków klimatycznych Polski (i na tle zmierzonych we Wrocławiu-Strachowicach), wynika, że należy liczyć się z możliwością występowania opadów o podobnej wysokości. Dla większości krajów europejskich wielkości, np. 24-godzinne, charakteryzują się zbliżonym do Polski (300 mm) poziomem, sięgającym nawet 350 mm. Jedynie dla Turcji wielkość ta i inne (dla innych czasów) dość istotnie odstają od pozostałych, co może świadczyć o przynależności reżimu opadowego tego kraju do cieplejszej strefy klimatów podzwrotnikowych, o znacznym udziale wilgotnych morskich mas powietrza. Ekstremalne wysokości opadów krótkotrwałych (8 czy 20 minut - tab. 3.1) pochodzących z obszaru Niemiec czy Rumuni wskazują także na możliwość wystąpienia opadów o zbliżonej wysokości na obszarze Polski. Wszak zmierzona w Polsce 2-minutowa ekstremalna wysokość opadu (35,3 mm), przeliczona na opad jednominutowy (17,7 mm), jest tylko o połowę niższa od notowanego rekordu światowego (38 mm). Nadmienić należy, że intensywne i obfite krótkotrwałe opady (najczęściej charakteru konwekcyjnego) w warunkach polskich nie różnią się znacząco pod względem wysokości od opadów notowanych w krajach ościennych. Tabela 3.2 dla opadów krótkotrwałych wskazuje na ich dużą porównywalność. W dostępnej literaturze odnaleźć można wiele szczegółowych opisów opadów ulewnych i nawalnych występujących na obszarze Polski [17,77,78,81-85], czy też na Dolnym Śląsku [79,80,86-88].

Tabela 3.2.

Maksymalne sumy opadów atmosferycznych (w mm) o czasie trwania od 5 minut do 72 godzin dla Wrocławia oraz wybranych krajów i miejscowości Europy

Kraj / miejscowość [źródło danych]	**Czas trwania opadu**															
	minuty					**godziny**										
	5	10	15	30	45	1	1,5	2	3	6	12	18	24	36	48	72
Wrocław (1960-2009)	**13,1**	**18,7**	**24,7**	**32,9**	**34,7**	**35,3**	**42,7**	**57,7**	**61,9**	**63,1**	**64,2**	**72,9**	**80,1**	**92,6**	**103,9**	**116,9**
Polska [1a-c]	25,3	80,0	79,8	126,0[a]	123,5[b]	176,1[c]	220,1	117,9	220	221,8[d]			300,0		428,0	557,0
Niemcy [2a-c]		126[e]		40		200	145	239	246[f]	112		248[g]	312,0[h]	300[i]	379,9	458
Czechy [3a-c]	29,8	39,8	50,2	79,9	91,1[j]	92,8	96,5	117,0	126,6	158,5	203,6	187,4	345,1		380,0	536,7
Norwegia [4]	17,9	31,5		60,0		64,9	100,0			105,0	142,2[k]		229,6		378,9	402,4
Szwecja [5]		28,5	50	49[l]			130	114[m]	185[n]				276			
Węgry [6]		64,2				120							260		288	
Wielka Brytania [7]	32			80		92	117	193	178				279			
Słowenia [8a,b]			56	84		141		147	191	275	297		363		584	
Turcja [9]	50,5	60,8	70,7	90,9		131,0		180,5	230,9	390,3	428,1	464,8	466,3			
Warszawa (Polska) [10]	20,6	21,9	28,0	36,6		40,8		49,5	50,4	57,0	68,0	69,2	80,1	99,0	109,7	113,3
Helsinki (Finlandia) [11]	10,7	16,7	22,0	26,0		32,3							83,9			
Lund (Szwecja) [12]	9,9	13,6	15,0	18,6	22,0[o]											

Uwagi: Polska ([a] – za okres 26 minut; [b] – za okres 40 minut; [c] – za okres 1 godz. 15 minut; [d] – za okres 6 godz. 30 minut); Niemcy ([e] – za okres 8 minut; [f] – za okres 4 godzin; [g] – za okres poniżej 17 godzin; [h] – dla doby opadowej 6^{00}-6^{00} (dla czasu 24 godzin poza dobą opadową zmierzono 352,7 mm); [i] – za okres 34 godzin); Czechy ([j] – za okres 40 minut); Norwegia ([k] – za okres 14 godzin); Szwecja ([l] – za okres 20 minut; [m] – za okres 2 godz. 30 min; [n] – za okres 3 godz. 30 min); Lund ([o] – za okres 40 minut).

Źródła danych: [1a] Prokop P.: Maksymalne opady oraz czas ich trwania na świecie i w Polsce. Przegl. Geofiz. 2006, nr 2 ([77]); [1b] http://www.klimat.geo.uj.edu.pl (Rekordy Klimatyczne w Polsce); [1c] http://www.imgw.pl (Rekordy Klimatyczne w Polsce); [2a] http://www.chr-khr.org (Extreme Niederschläge in Deutschland. Intern. Worksh. und Expertengespr. Bregenz. 18/19 IV 2005); [2b] http://www.met.fu-berlin.de (Starkniederschläge in Sachsen im August 2002. DWD. Offenbach. 2002); [2c] http://www.florian-bayern.de (Das Jahrhunderthochwasser der Elbe); [3a] Atlas Podniebi Ceska – Praha-Olomouc. 2007; [3b] http://www.chmu.cz (Rozłożeni a extremita pricinnych srazek); [3c] Trupl J.: Intensity Krátkodobých Deštů v Povodních Labe, Odry a Moravy. Výzkumný Ústav Vodohospodářský. Práce a studie 1958, Z. 97. Praha – Podbaba; [4] http://www.iwaponline.com (Estimation of Extreme Precipitation in Norway. Oslo. Norway. 1989); [5] http://www.smhi.se (Regnkatastrofen på Fulufjället 30-31 augusti 1997); [6] http://www.met.hu (Extreme precipitations, characteristics of daily precipitation sums); [7] http://www.metoffice.gov.uk (służba meteorologiczna Wlk. Brytanii); [8a] http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net (Characteristics of the extreme rainfall event and consequent flash floods in W Slovenia in September 2007); [8b] http://www.arso.gov.si (Slovenski Vremenski Rekordi); [9] http://www.balwois.com (The Mountains Influence On Turkey Climate); [10] Bogdanowicz E., Stachy J. (1998); [11] http://www.borenv.net (Climatological characteristics of summer precipitations in Helsinki during the period 1951-2000); [12] http://www.iwapoline.com (Areal Intensity-Duration-Frequences Curves for Short Term Rainfall Events in Lund).

Pierwsze historyczne już modele opadów, opisujące związki natężenia (intensywności bądź wysokości) z czasem trwania i częstością występowania deszczy, w postaci krzywych typu DDF czy IDF, powstawały w Polsce z pomiarów wysokości opadów za pomocą prostych rejestratorów typu deszczomierz Hellmanna, o małej dokładności, zwłaszcza dla opadów o czasach trwania od 5 do 60 minut. Często też wykorzystywano zarejestrowane sumy wysokości opadów godzinowych, przeliczane następnie na mniejsze interwały czasowe. Wzorowano się przy tym również na modelach radzieckich (Aleksiejewa i Gorbaczewa), niemieckich (Reinholda), francuskich (Guillota i Dubanda) czy też amerykańskich (Wislera i Bratera). Z tych względów modele te należy uznać z założenia za przybliżone.

Opady miarodajne do projektowania bezpiecznych systemów odwodnień terenów to zarówno deszcze krótkotrwałe - o dużym natężeniu jednostkowym (q, w $dm^3/(s \cdot ha)$), jak i deszcze długotrwałe - o znacznym zasięgu terytorialnym (A, w ha) i dużej wydajności ($Q = qA$, w dm^3/s). Wywołują one największe przepływy w kanałach deszczowych czy ogólnospławnych, a także w naturalnych czy sztucznych ciekach wodnych (odbiornikach). Deszcze nawalne i ulewne trwają zwykle od kilkunastu minut do kilku godzin i cechują się największą intensywnością o zróżnicowanym (najczęściej małym) zasięgu terytorialnym. Zjawiska opadowe trwające dłużej, nawet do kilku dni, składają się zwykle z kilku opadów, występujących bezpośrednio po sobie, przedzielonych okresami bez opadów. Natężenie deszczu nie jest jednak stałe ani w czasie jego trwania ani w przestrzeni objętej opadem. Chwilowe natężenie opadu może być wielokrotnie większe od średniego. Duża intensywność może też występować raz lub nawet kilkakrotnie podczas trwania opadu, pojawiając się w dowolnej sekwencji czasu. Zjawiska te zmienne z natury są trudne do jednostkowego opisu w czasie i przestrzeni. Opis ten jest jednak niezbędny do uogólnień, m. in. dla celów projektowych.

3.2. Materiał pluwiograficzny z lat 1960-2009

Do wyznaczenia zależności (1.1) typu $h_{max} = h_{max}(t, p) \equiv h_{max}(t, C)$ dla maksymalnych opadów we Wrocławiu-Strachowicach, będącej głównym celem pracy, dysponując jedynie zbiorem największych z wielolecia wysokości opadów - o różnych czasach trwania, czyli mając jedynie informacje o średnich natężeniach, nie możemy przypisać empirycznego prawdopodobieństwa (zamiennie częstości) występowania zmiennych w czasie chwilowych natężeń opadów. Niezbędna staje się zatem dyskretyzacja danych pluwiograficznych, odczytywanych z pluwiogramów, w określonych przedziałach czasu, np. 5, 10, 15, 30 minut, itd., aż do 72 godzin, dla rzeczywistego początku i końca trwania opadów, w tym zliczanie wysokości metodą sumy ruchomej. Wymagany jest do tego celu możliwie jak najdłuższy okres obserwacji opadów (min. 30 lat) i homogeniczność danych pluwiograficznych pod względem stosowanych przyrządów i technik pomiarowych (zwykle deszczomierz Hellmanna i pluwiograf z zapisem analogowym bądź cyfrowym), ale także niezmienność urbanistyczno-przyrodnicza otoczenia stacji meteorologicznej.

Materiałem badawczym wykorzystanym w pracy [11] były archiwalne pluwiogramy dla stacji IMGW we Wrocławiu za lata 1960-2009. Po zawierusze wojennej pomiary meteorologiczne we Wrocławiu rozpoczęto już z końcem 1945 roku. Początkowo lokalizacja stacji ulegała częstym zmianom, ale od końca 1949 r. pomiary i obserwacje prowadzone były na stacji zlokalizowanej w zachodniej części miasta, w rejonie ówczesnego lotniska cywilnego (osiedle Fabryczna – dzielnica Gądów Mały). Od wiosny 1960 r. rozpoczęto wykonywanie pomiarów opadów z wykorzystaniem pluwiografu pływakowego. Pod koniec roku 1962 stacja meteorologiczna IMGW została przeniesiona na teren położonego nieopodal nowego portu lotniczego na Strachowicach (współrzędne położenia stacji: 51-06 N, 16-54 E; wysokości terenu 120 m npm), gdzie funkcjonuje do chwili obecnej. Do roku 2006 pomiary

wykonywano za pomocą pluwiografu pływakowego (zegarowego), a w 2006 r. rozpoczęto także testowe pomiary opadów pluwiografem typu korytkowego z rejestratorem elektronicznym o nazwie SEBA. Od 2007 r. pomiary pluwiograficzne wykonywane są wyłącznie przez deszczomierz automatyczny SEBA. Standardowo pomiary wysokości opadów wykonywane są niezmiennie deszczomierzem Hellmanna, dla przedziałów 6-godzinnych, sumowanych następnie do wielkości dobowej.

Opracowując dostępne materiały archiwalne (pluwiogramy) ograniczono okres ich analizy do miesięcy od maja do października (V-X), bowiem dla kwietnia i listopada materiał był często niekompletny z powodu występujących przymrozków (zamarzanie wody), a co się z tym wiąże niewłaściwego odzwierciedlenia przebiegu opadów. Ponadto nie w każdym roku w tych miesiącach prowadzono pomiary. Przyjęcie stałego okresu V-X dla wszystkich analizowanych sezonów pluwiograficznych (1960-2009) pozwala z kolei na wykonanie wielu uzupełniających charakterystyk opadowych, takich jak np.: udział sumy wysokości opadów sezonu pluwiograficznego w sumie rocznej, częstość dni z opadem w sezonie względem częstości rocznej, wyznaczenie okresów (lat) suchych i mokrych oraz ich odchylenia względem wielkości średniej i innych.

Jak wykazano w pracy [27], 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 klasyfikacji i kryterium (1.3) Chomicza [17,18,22,27,85]. Analizując pod tym kątem dostępne materiały pluwiograficzne dla wybranych stacji z obszaru Dolnego Śląska, przykładowo w pracach [87,88] wykazano, że intensywność najsilniejszych opadów przekraczała 2-3 mm/min, czyli przewyższała intensywność deszczy nawalnych I stopnia – 6 klasy wg [26], a największa częstość ich występowania przypadała na miesiące półrocza ciepłego, ściślej VI-VIII. Udział opadów określanych wg klasyfikacji Chomicza jako silne ulewy i deszcze nawalne (pola pomiędzy krzywymi U_3 i U_5 – silne ulewy i powyżej krzywej U_5 – deszcze nawalne - rys. 1.1) sięgał 20% wszystkich analizowanych przypadków.

W IMGW opracowywanie pluwiogramów papierowych dokonuje się standardowo dla sztywnych przedziałów godzinowych, wyznaczając wysokość opadu i czas jego trwania [89]. Konsekwencją tego stanu rzeczy jest to, że „rzeczywista" wysokość opadu (z pluwiogramu) za kolejnych 60 minut jego trwania jest zawsze większa, bądź co najwyżej równa, wysokości opadu w sztywnym przedziale jednej godziny. Stosowane muszą być w tym przypadku współczynniki korekcyjne (>1) [27]. Dla potrzeb niniejszej pracy taka dokładność była niewystarczająca, w związku z czym wyznaczana była wysokość opadu z pluwiogramów dla przedziałów 5-minutowych. Dokładność taka wymagana jest obecnie m.in. do sporządzania opadów modelowych (typu Eulera) czy serii opadów nawalnych, bądź też deszczy syntetycznych generowanych losowo, niezbędnych obecnie dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego systemów odwodnień terenów [15,16,21]. Wyznaczenie z zapisu na pluwiogramie papierowym przedziałów czasowych krótszych niż 5-minutowe byłoby trudne i obarczone już znaczną niedokładnością. Sytuacja uległa zmianie w momencie zastosowania w meteorologii (na stacji IMGW Wrocław-Strachowice od sezonu 2007 r.) elektronicznego zapisu przebiegu opadów atmosferycznych. W pluwiografach automatycznych SEBA rejestracja opadu dokonywana jest dla każdego opróżnienia korytka przelewowego o małej objętości (0,1 mm opadu na 1 m^2 powierzchni), a czas przelewu rejestrowany jest z dokładnością sekundową. Taki sposób rejestracji pozwala na określenie wysokości opadu dla dowolnego odcinka czasu. Tak więc do opracowania opadów z cyfrowych pluwiogramów SEBA możliwe są do zastosowania 2 sposoby wyznaczania

maksymalnych sum opadów 5-minutowych: pierwszy - dla stałych 5-cio minutowych przedziałów czasowych oraz drugi - dla 5-cio minutowych interwałów kroczących, zaczynających się w na kolejnych minutach trwania opadu. Jak zostanie wykazane w pracy, ten drugi sposób daje lepsze wyniki, zwłaszcza dla najkrótszych, analizowanych przedziałów czasowych.

Dzięki pluwiogramom możliwe jest określenie całkowitej wysokości opadu w rzeczywistym czasie jego trwania, bądź w wybranych jego częściach – metodą ruchomej sumy. Wysokości opracowywanych opadów określano dla następujących 16 przedziałów czasu ich trwania: 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90 i 120 minut oraz 3, 6, 12, 18, 24, 36, 48 i 72 godzin.

3.3. Kryteria wyboru opadów do analiz statystycznych

Wyznaczenie powtarzalności - częstości *C* (w latach), bądź prawdopodobieństwa *p* (w ułamku lub w %), występowania opadów deszczu o danej lub większej wysokości *h* (w mm), bądź intensywności *I* (w mm/min), bądź też wartości natężenia jednostkowego *q* (w dm^3/s ha), odbywa się najczęściej na drodze szeregowania opadów wg malejących wartości tych wskaźników [1,14,19,23,27,29,30,31,34,90]. W ten sposób, w pierwszym wierszu znajdzie się opad o najwyższej zaobserwowanej wysokości (intensywności czy natężenia), a w ostatnim – o najniższej zmierzonej wartości wskaźnika. Odnosić to można zarówno do całego okresu trwania opadu - metoda „średnich wartości", jak i do poszczególnych jego fragmentów o znanych przedziałowych wartościach *h*, *I* czy *q* - metoda „chwilowych-maksymalnych wartości". Ta druga metoda jest właściwa do formułowania podstaw „bezpiecznego" projektowania systemów odwodnień terenów, a zwłaszcza kanalizacji.

Szeregowanie opadów wg nie rosnących przedziałowych wartości natężeń (intensywności czy wysokości) ma na celu przyporządkowanie odpowiednich statystycznych częstości (*C*), bądź zamiennie prawdopodobieństw (*p*), występowania danych natężeń opadów wraz z wyższymi, tworzonym w ten sposób szeregom częstości opadów syntetycznych (typu IDF). Jak ważne jest tutaj przyjęcie odpowiedniego kryterium wyboru opadów do analiz i w konsekwencji liczebność „próby statystycznej", będącej jednocześnie poziomem odniesienia wyników dla częstości występowania opadu $C = 1$ rok (czyli o prawdopodobieństwie $p = 1{,}0 = 100\%$), dobitnie ilustrują wyniki badań osiągnięte przez Błaszczyka i Chomicza. Dysponując tym samym materiałem badawczym deszczy w Warszawie, ściślej z tego samego okresu 67 lat obserwacji, Błaszczyk przyjął do opracowania swojego modelu 67 intensywnych deszczy i po uszeregowaniu ich w kolejności malejącej przyporządkował powtarzalności - częstości $C = 1$ rok (prawdopodobieństwu $p = 100\%$) deszcz na 67 pozycji. Chomicz przyjął tutaj tylko 37 najintensywniejszych deszczy i konsekwentnie deszcz na 37 pozycji otrzymał częstość $C = 1$ rok ($p = 100\%$). Rozbieżności interpretacyjne liczebności próby statystycznej i poziomu odniesienia wyników pomiarów dla częstości występowania deszczy $C = 1$ rok doprowadziły w efekcie do 50% wzajemnych różnic wyników otrzymywanych z modeli fizykalnych obu autorów (i w konsekwencji do jeszcze większych różnic dla $C = 2$, 5 i 10 lat - tab. 2.4).

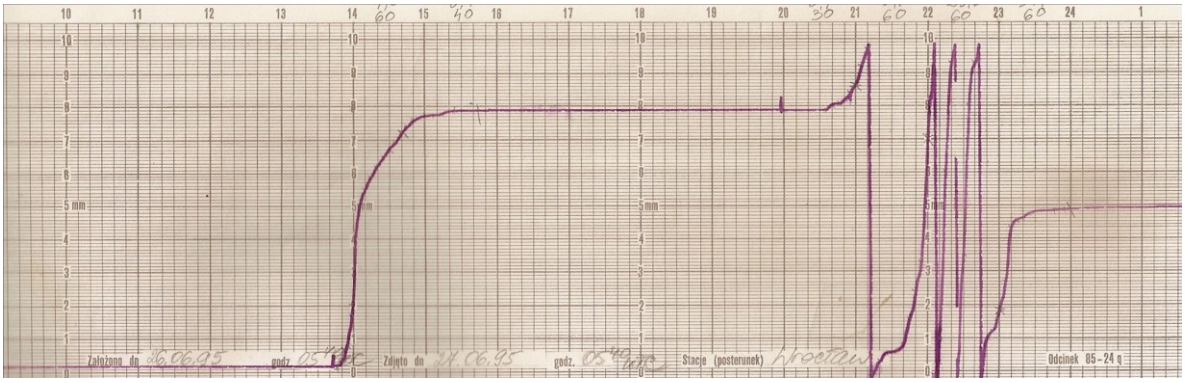
Bogdanowicz i Stachy, do sformułowania modelu probabilistycznego opadów maksymalnych, przyjęli za podstawę 31 syntetycznych deszczy rocznych z okresu 1960-1990 - po jednym największym z każdego roku obserwacji opadów (osobno dla każdej z 20 stacji meteorologicznych w kraju). Wykorzystali do tego celu dwie bazy danych o największych w roku opadach - o czasach trwania: 5, 10, 15, 30, 60 i 120 minut - odczytane bezpośrednio z pluwiogramów, oraz o czasach trwania: 1, 2, 3, 6, 12, 18, 24, 36, 48 i 72 godziny - ustalane metodą ruchomej sumy z zestawień pluwiograficznych dla przedziałów godzinowych i korygowane następnie współczynnikami zwiększającymi (np.: 1,13 dla 1-ej godz., 1,04 dla 2

godz., itp. [27]). W efekcie uszeregowania malejąco przedziałowych, największych rocznych wartości wysokości opadów syntetycznych z 31 lat obserwacji, przyjęli jako poziom odniesienia wyników - dla C = 1 rok - wartości z 31 wiersza. Szereg ten (typu DDF), jako najmniejszy z największych rocznych (z 31 lat), okazał się jednak wysoce różniący się (in minus) względem wyników badań innych autorów (p. 2. pracy).

Uwzględniając fakt, że w niektórych latach mogą nie występować bardzo intensywne opady, a w innych latach – wielokrotnie, eliminowanie a priori „lat suchych" (za Błaszczykiem i Chomiczem) jest jednak niewłaściwe, zwłaszcza, że badamy tutaj przedziałowe, maksymalne wartości wskaźników intensywnych opadów. Z kolei zastosowanie pracochłonnej metody przeglądu zupełnego opadów wydaje się również niecelowe (za Bogdanowicz i Stachy), bowiem interesują nas opady maksymalne, a analizowanie opadów o małej czy nawet średniej intensywności wydłużyłoby tylko listę szeregów częstości opadów znacznie poza interpretowany zakres. Należy więc ustalić odpowiednie - obiektywne kryterium wyboru próby losowej opadów do analiz, na tyle niskie, aby każdy rok był reprezentowany przez co najmniej kilka największych w danym roku opadów.

Do wyodrębnienia intensywnych deszczy do analiz statystycznych przyjęto własne kryterium wysokości opadów: $h \geq 0{,}75t^{0,5}$ - oparte na orientacyjnym kryterium (1.3) Chomicza: $h_{U0} \geq t^{0,5}$ - odnośnie granicznej wysokości opadu (U_0) dla silnych deszczy. Zaniżenie kryterium Chomicza o 25% (poniżej krzywej U_0 – rys. 1.1) miało na celu wyodrębnienie do rocznych zestawień większej liczby intensywnych deszczy – więc nie tylko silnych deszczy, ulew, silnych ulew czy deszczy nawalnych, tak aby każdy sezon pluwiograficzny był reprezentowany przez co najmniej kilka opadów (nawet w latach „suchych"). Tak więc wyodrębniano z pluwiogramów opady o wysokości: $h \geq 1{,}7$ mm dla interwału t = 5 min, i/lub $h \geq 2{,}4$ mm dla t = 10 min, i/lub $h \geq 2{,}9$ mm dla t = 15 min, i tak dalej, oraz $h \geq 10{,}0$ mm dla t = 180 min, aż do $h \geq 20{,}0$ mm dla $t \geq 720$ min (do 4320 minut włącznie). Tak więc dla zjawisk opadowych o $t \geq 12$ godz. (do 72 godz. włącznie) przyjęto, że zestawieniom będą podlegały opady o łącznej wysokości $h \geq 20{,}0$ mm - zliczane metodą ruchomej sumy. W przypadku opadów o długich czasach trwania, gdy w ich przebiegu na pluwiogramach występowały wyraźne braki przyrostów wysokości opadów (przerwy) wówczas wyodrębniane i opisywane były te fragmenty opadów o szczególnie wysokiej intensywności i traktowane jako tzw. epizody wewnętrzne. W tym przypadku, opadów o dobowej sumie wysokości < 2,0 mm nie analizowano.

Zaproponowane w pracy [11] kryteria miały za cel wyłonienie reprezentatywnej dla każdego roku liczby intensywnych opadów do uogólnień statystycznych. Przykład pluwiogramu (z dnia 26.06.1995 r.) i zestawienia opracowanych deszczy z 1995 roku podano na rysunku 3.1 i w tabeli 3.3.



Rys. 3.1. Fragment pluwiogramu z dnia 26 czerwca 1995 r. z zapisem epizodu opadu od godziny 20^{40} do 23^{35}, opisanym w tabeli 3.3 (poz. 6 i 6-1)

Tabela 3.3.

Zestawienie opracowanych reprezentatywnych deszczy z 1995 roku
(roczne maksima wysokości opadów w mm dla analizowanych interwałów czasowych pogrubiono) [11]

Rok obserwacji: 1995			**Nazwa stacji: Wrocław-Strachowice**						**Roczna suma opadów: 638,8 mm**						**Suma opadów w sezonie V-X: 489,6 mm**						**Suma opisanych opadów: 413,1 mm**				
Lp	Data	Początek opadu	Koniec opadu	Czas trwania min		Wysokość opadu mm	Suma opadu mm		Uwagi	**5**	**10**	**15**	**30**	**45**	**60** (1)	**90** (1,5)	**120** (2)	**180** (3)	**360** (6)	**720** (12)	**1080** (18)	**1440** (24)	36	48	72
										minuty								godziny							
				interwału	opadu	A	D	P																	
1	11-14 – 05	14-20	12-50	4320	4235	41,1	36,6	41,1		3,4	6,5	7,6	9,8	9,8	9,8	9,9	9,9	9,9	14,0	19,5	25,1	31,0	35,8	39,7	41,1
2	30-05 – 01-06	06-00	5-55	4320	3795	51,8	49,5	51,1		3,4	5,4	6,1	7,1	7,6	7,7	7,8	9,4	10,2	37,5	37,5	37,5	37,5	49,5	49,5	51,8
3	09-06	15-40	15-50		15	4,0	6,8	4,0	+	3,4	3,9	4,0													
4	11-13 - 06	6-00	5-55	4320	2720	66,7	60,5	66,7		2,4	4,0	5,0	8,7	11,1	13,5	19,9	25,2	32,1	36,8	37,5	44,7	44,9	**65,5**	**66,7**	**66,7**
5	21-06	17-30	19-40		135	19,5	18,4	19,5		3,6	5,6	7,6	13,4	16,5	17,8	19,2	19,4								
6	24-26 -06	6-00	5-55	4320	2685	48,1	45,3	48,1		5,0	8,4	9,7	18,6	26,5	29,4	**34,3**	**35,7**	**38,0**	38,3	45,8	46,0	46,0	47,1	48,1	48,1
7	12-07	18-05	18-50		50	10,3	9,8	10,3		3,2	5,9	7,4	9,8	10,3											
8	22-23 - 07	6-00	5-55	2880	695	51,5	49,7	51,5		**13,1**	**17,0**	**22,8**	**27,4**	**28,6**	**29,7**	30,1	30,1	35,9	**42,6**	**51,5**	**51,5**	**51,5**	51,5	51,5	
9	27-29 - 08	6-00	5-55	4320	3755	31,6	29,1	31,6		1,3	2,3	2,6	3,5	4,3	5,4	6,4	6,6	8,8	12,0	15,3	20,5	21,7	25,0	27,7	31,6
10	30-08 – 01-09	6-00	5-55	4320	2515	46,6	45,8	46,6		1,7	3,3	4,1	6,7	8,8	10,5	12,8	14,0	14,7	17,2	32,5	35,4	38,4	44,9	46,6	46,6
11	13-16 - 09	22-15	22-10	4320	3690	42,0	40,8	42,0		0,9	1,6	2,1	3,1	4,4	5,2	7,4	8,5	11,4	19,8	25,4	36,5	40,4	40,9	41,9	42,0
Epizody wewnętrzne:																									
1-1	13-05	16-55	17-20		30	9,9	24,7	9,9	+	3,4	6,5	7,6	9,8												
2-1	01-06	21-20	22-30		75	7,8	10,3	7,8	+	3,4	5,4	6,1	7,1	7,6	7,7										
4-1	11-06	17-10	19-40		155	15,0	19,5	15,0	+	1,1	2,1	3,1	5,1	6,6	7,4	11,5	14,0								
4-2	12/13-06	22-00	3-30		335	36,7	40,9	36,7	+	2,4	4,0	5,0	8,7	11,1	13,5	19,9	25,2	32,1							
6-1	26-06	20-40	23-35		180	38,0	43,6	38,0	+	5,0	8,4	9,7	18,6	26,5	19,4	34,3	35,7	38,0							
8-1	22-07	21-25	22-50		90	30,1	48,2	30,1	+	13,1	17,0	22,8	27,4	28,6	29,7	30,1									

Uwagi:

- A – suma opadów za opracowany czas trwania opadu; D – dobowa suma opadów z deszczomierza, P - suma opadów z pluwiogramu; (+) – w dobie opadowej wystąpiły inne opady poza okresem z opracowanego epizodu;
- (Ad 1, 11) – opad objął 4 doby opadowe; (Ad 2, 2-1) – w dn. 31V w godz. 13.37-17.10 GMT wystąpił opad o wysokości dobowej 37,5 mm (czas trwania 3 godz. 35 min.), jednakże nie został on zarejestrowany; wyznaczone sumy dla przedziałów czasowych opadów od 5 do 360 min wyznaczono z opadu, który wystąpił w dn. 01 VI; (Ad 8, 8-1) – opad objął 2 doby opadowe;

Przyjęte kryteria pozwoliły na wyselekcjonowanie dla każdego roku z okresu 1960-2009 od kilku do kilkunastu najbardziej intensywnych opadów, ściślej w sezonie V-X. Łącznie z okresu 50 lat obserwacji do szczegółowej analizy statystycznej wyselekcjonowano 514 opadów syntetycznych (co dało przeciętnie 10,3 przypadków na rok), które następnie były szeregowane według malejących wysokości opadów w poszczególnych przedziałach czasowych. Przyjęcie tutaj do analizy wszystkich opadów z pięćdziesięciolecia (bez kryterium intensywności) wydłużyłoby listę szeregów częstości analizowanych deszczy do liczby kilku tysięcy, lecz nie zmieniłoby ich kolejności na pierwszych pięćdziesięciu pozycjach, czyli nie zmieniłoby podstaw statystycznych opracowanych w efekcie modeli opadów [11].

Z rocznych zestawień tabelarycznych wyselekcjonowanych deszczy (patrz przykład w tab. 3.3 - dla 1995 r.) ustalano też maksymalne przedziałowe wartości wysokości opadów, z których tworzony był następnie syntetyczny opad roczny (o czasie trwania od 5 minut aż do 72 godzin). Największe roczne wysokości opadów w badanych 16 interwałach czasu w sezonie pluwiograficznym V-X w latach 1960-2009 dla stacji IMGW Wrocław-Strachowice zestawiono w tabeli 3.4.

Tabela 3.4.

Największe roczne wysokości opadów (w mm) w czasie od 5 minut do 72 godzin w sezonie pluwiograficznym V-X w latach 1960-2009 dla stacji IMGW Wrocław-Strachowice

Rok	**Czas trwania opadu, *t***															
	minuty					**godziny**										
	5	**10**	**15**	**30**	**45**	**1**	**1,5**	**2**	**3**	**6**	**12**	**18**	**24**	**36**	**48**	**72**
1960	9,2	14,5	20,0	28,4	32,1	33,6	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5	36,5	39,4	55,2	55,5	55,7
1961	11,4	18,0	20,7	24,3	24,5	24,6	29,3	29,3	29,3	29,3	30,2	50,9	56,4	56,4	59,5	59,8
1962	9,3	9,8	12,6	16,4	21,5	29,1	33,2	33,2	33,2	33,2	40,1	40,3	40,3	41,2	42,6	44,2
1963	7,7	12,4	14,0	15,3	15,6	15,9	16,1	16,3	16,4	21,3	27,8	27,8	28,8	35,8	48,1	61,2
1964	4,7	8,6	10,6	15,2	15,7	15,9	17,0	18,6	20,2	22,2	39,3	53,9	67,5	**92,6**	101,1	108,5
1965	7,9	9,1	9,2	9,5	10,1	11,0	12,8	13,8	16,7	21,7	29,5	39,6	45,3	45,3	45,3	45,5
1966	6,9	9,6	13,7	15,6	16,1	16,6	16,6	18,9	22,6	22,6	30,8	30,8	30,8	35,7	36,1	40,8
1967	9,8	14,6	16,6	17,5	17,7	17,7	17,7	17,7	19,2	19,2	24,1	25,9	28,3	47,3	49,0	51,1
1968	6,0	8,3	9,8	11,6	12,2	12,4	12,9	13,0	13,0	20,6	21,2	22,6	23,5	26,8	31,0	38,7
1969	8,3	13,3	16,5	19,8	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	27,0	28,5	28,5	28,5	29,9	30,3
1970	8,6	10,6	14,6	22,1	27,9	31,7	37,7	41,5	42,8	50,4	52,9	57,4	62,1	62,1	66,5	76,6
1971	6,0	10,2	10,3	14,3	16,0	16,6	19,6	22,2	27,0	38,5	39,0	44,1	47,8	48,0	56,3	84,0
1972	5,0	7,0	7,9	10,4	14,2	15,5	16,4	19,9	21,9	27,8	41,2	41,2	43,4	45,2	46,2	49,7
1973	6,9	12,9	13,2	15,2	16,3	16,9	17,1	17,9	21,5	21,7	22,2	29,2	29,2	38,0	39,8	44,8
1974	9,0	10,5	11,4	14,7	15,1	15,1	16,0	18,8	27,3	33,9	43,9	43,9	45,2	45,2	48,6	50,0
1975	9,9	15,7	20,2	**32,9**	34,1	34,7	34,7	34,9	38,4	46,0	46,5	60,4	68,0	86,9	96,2	101,9
1976	8,2	8,7	9,2	13,7	14,9	15,3	15,5	19,6	25,6	36,9	**64,2**	69,1	72,1	80,3	85,8	100,4
1977	6,0	10,7	14,0	15,1	18,3	18,5	18,8	18,8	18,9	24,9	31,6	44,4	61,0	73,1	73,1	90,0
1978	4,1	6,1	6,6	10,8	12,1	13,4	13,6	13,6	13,6	17,5	26,8	36,4	38,5	47,2	51,0	60,1
1979	5,8	8,6	11,9	18,0	20,7	24,0	27,9	28,7	32,8	32,8	38,0	39,3	41,0	46,4	51,6	60,4
1980	9,0	13,8	20,1	28,2	30,2	34,8	**42,7**	**57,7**	**61,9**	**63,1**	63,1	63,1	65,0	70,3	73,4	75,2
1981	7,8	8,1	9,3	13,7	19,6	23,5	30,6	32,4	32,4	32,4	37,6	45,0	61,9	69,2	76,2	82,9
1982	5,5	5,7	7,2	7,9	10,1	10,8	11,3	***11,3***	***12,4***	22,0	32,0	41,2	45,2	46,6	47,7	47,7
1983	9,6	**18,7**	**24,7**	28,6	29,0	30,5	33,7	36,1	36,7	41,0	48,4	56,8	56,9	56,9	58,5	58,5
1984	6,3	9,1	11,1	17,7	19,0	19,9	24,2	26,9	35,1	40,7	50,0	52,8	52,8	52,8	56,4	57,0
1985	4,7	5,2	***5,6***	***5,9***	***6,3***	***6,9***	***9,3***	11,9	14,8	20,4	27,8	39,3	48,3	57,0	61,1	97,5
1986	***3,3***	***4,7***	6,2	7,2	7,9	8,1	10,3	13,0	17,8	26,1	31,3	39,3	42,1	47,2	48,9	51,4
1987	10,4	13,8	14,6	15,1	15,1	15,1	15,1	17,9	20,4	23,1	35,2	37,9	37,9	38,0	38,0	38,0
1988	8,0	10,2	13,0	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	15,8	24,2	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1
1989	4,5	5,6	6,4	7,8	10,0	12,1	13,1	13,1	13,4	17,0	***17,7***	22,1	25,8	31,9	32,1	44,3
1990	3,8	6,4	7,7	10,6	11,8	12,3	13,3	15,2	15,5	***16,0***	18,4	***20,5***	***22,0***	***22,0***	***22,2***	***26,8***
1991	5,6	10,0	12,2	19,7	25,7	28,8	35,8	38,5	40,4	49,0	49,2	49,2	49,2	58,7	58,7	59,3
1992	6,7	12,3	16,3	28,0	**34,7**	**35,3**	35,4	35,4	35,4	35,7	40,8	45,3	47,1	47,2	60,8	63,4
1993	9,6	11,0	11,1	11,9	12,1	12,8	14,3	17,1	17,5	19,7	30,8	30,8	30,8	30,8	31,8	41,1
1994	4,3	5,6	5,7	8,4	8,8	11,6	15,7	17,5	18,8	19,2	24,3	24,3	24,4	26,3	31,1	31,1
1995	**13,1**	17,0	22,8	27,4	28,6	29,7	34,3	35,7	38,0	42,6	51,5	51,5	51,5	65,5	66,7	66,7

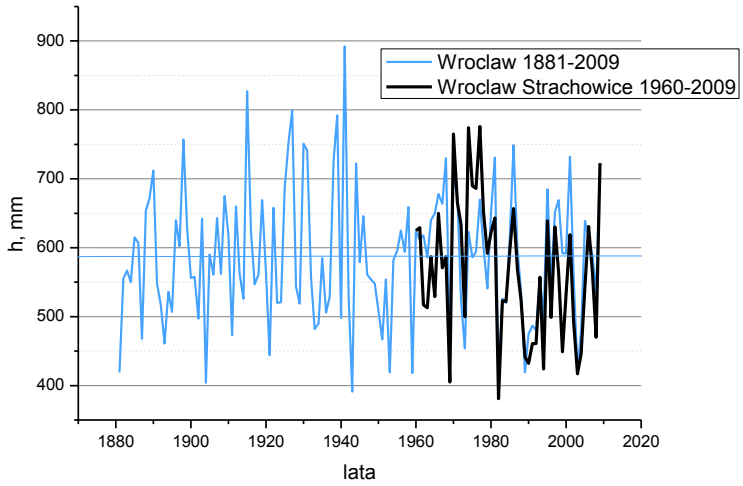
1996	5,8	9,2	11,2	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	16,2	29,5	38,7	42,7	49,0	59,3	59,3	59,3
1997	7,8	11,0	12,6	15,7	17,0	17,5	17,6	17,9	21,7	23,5	46,3	61,7	**80,1**	92,5	94,5	111,6
1998	4,2	7,0	8,9	11,6	13,7	14,9	16,0	16,2	16,6	24,9	30,0	32,3	40,2	43,8	59,6	60,0
1999	7,4	10,6	11,6	13,5	14,5	15,7	17,0	18,7	21,5	34,8	35,6	36,3	36,3	38,1	42,8	44,8
2000	9,1	10,2	13,9	19,9	30,2	32,7	33,9	34,6	35,2	35,2	35,2	35,2	35,4	35,4	44,6	44,6
2001	4,0	6,8	9,6	18,1	22,4	24,6	28,7	30,6	35,7	36,3	39,9	**72,9**	77,9	79,4	79,7	79,7
2002	11,6	13,6	17,7	25,7	28,8	29,2	29,3	29,5	29,8	32,2	32,9	32,9	36,4	45,8	48,1	49,5
2003	6,7	11,3	13,8	15,0	15,0	16,0	20,0	21,4	23,4	42,6	48,9	49,1	49,1	50,4	50,5	60,6
2004	8,0	11,6	12,7	14,0	15,8	16,1	16,1	16,1	16,5	16,8	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	29,4
2005	8,4	12,8	15,8	18,8	20,0	20,2	20,8	20,9	26,4	34,7	35,0	35,6	35,9	35,9	35,9	42,3
2006	8,4	10,7	16,7	22,4	22,8	23,3	24,6	26,2	26,2	38,7	54,4	71,5	75,2	85,5	**103,9**	**116,9**
2007	6,3	9,4	14,0	21,6	26,3	26,9	27,0	31,3	31,6	33,0	34,6	34,6	39,9	39,9	39,9	47,6
2008	x	x	x	x	x	x	x	x	x	16,2	19,7	24,7	25,8	27,4	34,4	36,4
2009	7,2	10,1	11,8	16,4	16,8	17,0	17,2	17,8	19,5	28,5	46,3	47,1	47,4	50,7	60,4	62,7
min	***3,3***	***4,7***	***5,6***	***5,9***	***6,3***	***6,9***	***9,3***	***11,3***	***12,4***	***16,0***	***17,7***	***20,5***	***22,0***	***22,0***	***22,2***	***26,8***
max	**13,1**	**18,7**	**24,7**	**32,9**	**34,7**	**35,3**	**42,7**	**57,7**	**61,9**	**63,1**	**64,2**	**72,9**	**80,1**	**92,6**	**103,9**	**116,9**

x - brak danych (awaria zapisu elektronicznego);
- wartości maksymalne pogrubiono, a minimalne zaznaczono pogrubioną kursywą

Maksymalne roczne wysokości opadów w przedziałach od 5 minut do 72 godzin dla stacji IMGW Wrocław-Strachowice (tab. 3.4) są zbliżone wartością do analogicznego zestawienia podanego w pracy [27] dla stacji IMGW Warszawa-Bielany - dla porównawczych okresów 1960-1990, które w pierwszej kolejności będą analizowane w dalszej części pracy.

3.4. Charakterystyka ilościowo-jakościowa materiału badawczego

Dla zobrazowania przebiegu opadów atmosferycznych na stacji IMGW we Wrocławiu-Strachowicach przeprowadzono analizę porównawczą względem dostępnej serii pomiarowej opadów dla Wrocławia za lata 1881-2009 [11,91-93]. Materiały dla 129-letniej „wrocławskiej serii opadowej" zawierają połączone przedwojenne wyniki pochodzące ze stacji zlokalizowanych w rejonie Uniwersytetu, Ogrodu Botanicznego, Krzyków i Gądowa Małego, a dla okresu powojennego z Biskupina (o wysokości terenu 116 m npm). Przebieg opadów dla porównywanych serii w okresie 1960-2009 jest zasadniczo zgodny (rys. 3.2), a występujące odstępstwa przypisać należy naturalnej zmienności przestrzennej opadów, a także lokalizacji stacji. Porównywane stacje zlokalizowane są bowiem w różnych częściach Wrocławia, a wzajemna odległość pomiędzy nimi wynosi ok. 20 km.



Rys. 3.2. Roczne wysokości opadów dla wrocławskiej serii opadowej w latach 1881-2009 oraz serii Wrocław IMGW-Strachowice za lata 1960-2009

Średnia roczna wysokość opadów w okresie 1960-2009 dla stacji IMGW Wrocław-Strachowice wyniosła 568 mm, a dla stacji na Biskupinie 590 mm. Względna różnica tych wielkości średnich wieloletnich wynosi ok. 4%. Średnia dla „wrocławskiej serii opadowej" za 129-letni okres obserwacji (1881-2009) wynosi natomiast 588 mm, czyli jest zbliżona do średniej z Biskupina (1960-2009). Z analizy rysunku 3.2 wynika, że dla serii opadowej Wrocław-Strachowice (1960-2009) mamy do czynienia z nieznacznie malejącym trendem zmian rocznych wysokości opadów w ostatnim pięćdziesięcioleciu. Jednakże, określone równanie linii trendu dla „wrocławskiej serii opadowej" postaci: H= 587,2+0,0061x, przy współczynniku korelacji R=0,0024, świadczy już o braku trendu zmian wysokości opadu normalnego (H) - globalnie we Wrocławiu na przestrzeni 129 lat. Tak więc przyczyn coraz częściej obecnie występujących wylewów z kanalizacji czy nawet powodzi należy upatrywać, zarówno we wzroście gwałtowności czy długotrwałości zjawisk opadowych (a nie we wzroście wysokości opadów), jak i w niekorzystnych przyrodniczo zmianach w infrastrukturze miejskiej, gdzie w miejsce naturalnych powierzchni terenu wprowadza się w nadmiarze powierzchnie nieprzepuszczalne (beton, bruk, asfalt) i zwartą zabudowę, przez co zwiększa się spływ powierzchniowy. Wówczas systemy odwodnieniowe, w tym kanalizacyjne, nie są często w stanie przyjąć i odprowadzić zwiększonej objętości wód opadowych. Niekorzystnym skutkiem takiej działalności jest także zjawisko obniżania się poziomów wód podziemnych w miastach [4,6,21,94,95].

W tabeli 3.5 podano szczegółowe informacje statystyczne charakteryzujące opady w okresie 1960-2009 obejmujące takie parametry, jak: suma wysokości opadów w danym roku (I-XII) i w sezonie pluwiograficznym V-X oraz procentowy udział wysokości opadów tego sezonu względem sumy rocznej. Okazało się, że przeciętnie dwie trzecie rocznej wysokości opadu występuje w półroczu letnim (V-X). W szczególności udział ten w latach 1960-2009 wynosił od 50 do 80% sumy rocznej. Następnie w tabeli 3.5 podano: sumę wysokości opadów opisanych i analizowanych w pracy w danym sezonie pluwiograficznym, procentowy udział opisanych wysokości opadów w sezonie V-X względem sumy rocznej (udział ten wyniósł od 11 do 65%, przeciętnie ok. 40%) oraz względem sumy sezonu pluwiograficznego (od 21 do 85%, przeciętnie ok. 60%). Podano również maksymalną sumę opadu dobowego w sezonie V-X, zarejestrowaną w sztywnym przedziale czasowym - z deszczomierza Hellmanna. Następnie podano liczbę dni z opadem ≥ 0,1 mm w roku (od 118 do 190) i w sezonie pluwiograficznym (od 56 do 102), oraz procentowy udział dni z opadem w sezonie V-X względem liczby dni z opadem w roku (udział ten wynosił od 37 do 59%, przeciętnie ok. 45%). Wartości maksymalne powyższych statystyk w tabeli 3.5 pogrubiono, a minimalne zaznaczono pogrubioną kursywą.

Tabela 3.5.

Charakterystyki opadowe dla roku i sezonu pluwiograficznego V-X w latach 1960-2009 dla Wrocławia (wartości maksymalne pogrubiono a minimalne zaznaczono pogrubioną kursywą)

Rok	Suma (wysokości) opadów, mm		Udział sumy opadów w V-X w roku, %	Suma opadów opisanych w V-X, mm	Udział opisanej sumy w roku, %	Udział opisanej sumy w V-X, %	Max suma opadu dobowego w V-X, mm	Liczba dni z opadem ≥ 0,1 mm		Udział dni z opadem V-X w roku, %
	w roku	w V-X						w roku	w V-X	
1960	625,0	453,7	72,6	194,5	31,1	42,9	36,5	161	88	54,7
1961	620,8	381,2	61,4	133,5	21,5	35,0	56,4	157	80	51,0
1962	516,8	316,2	61,2	115,7	22,4	36,6	38,7	150	77	51,3
1963	513,1	398,7	77,7	243,7	47,5	61,1	28,3	130	72	55,4
1964	586,5	391,5	66,8	240,3	41,0	61,4	67,5	134	64	47,8
1965	529,2	364,4	68,9	206,0	38,9	56,5	24,9	163	74	45,4
1966	649,7	435,0	67,0	309,1	47,6	71,1	30,8	164	70	42,7
1967	570,8	367,7	64,4	236,8	41,5	64,4	24,1	158	69	43,7
1968	586,5	396,6	67,6	174,5	29,8	44,0	22,3	180	95	52,8

1969	405,3	269,0	66,4	203,7	50,3	75,7	24,1	125	***56***	44,8
1970	765,1	498,6	65,2	312,7	40,9	62,7	62,1	**190**	85	44,7
1971	665,5	435,7	65,5	252,7	38,0	58,0	47,8	160	68	42,5
1972	633,9	449,9	71,0	238,8	37,7	53,1	27,8	145	77	53,1
1973	500,4	328,8	65,7	128,8	25,7	39,2	24,9	154	72	46,8
1974	773,7	532,5	68,8	332,4	43,0	62,4	43,9	174	**102**	58,6
1975	689,9	519,9	75,4	375,3	54,4	72,2	51,3	128	62	48,4
1976	685,7	444,7	64,9	280,3	40,9	63,0	70,2	146	58	39,7
1977	**776,2**	**540,7**	69,7	334,4	43,1	61,8	60,1	162	79	48,8
1978	650,8	452,9	69,6	254,3	39,1	56,1	33,0	161	88	54,7
1979	592,0	343,7	58,1	211,5	35,7	61,5	38,5	150	63	42,0
1980	622,1	447,5	71,9	341,9	55,0	76,4	62,6	168	85	50,6
1981	643,0	439,9	68,4	289,3	45,0	65,8	40,4	177	79	44,6
1982	***380,8***	236,0	62,0	110,2	28,9	46,7	27,2	119	57	47,9
1983	522,5	324,1	62,0	271,7	52,0	83,8	44,3	158	58	***36,7***
1984	522,4	417,2	**79,9**	235,0	45,0	56,3	41,5	155	90	58,1
1985	598,0	381,4	63,8	281,6	47,1	73,8	39,8	178	80	44,9
1986	657,0	477,7	72,7	273,8	41,7	57,3	40,1	156	75	48,1
1987	569,1	352,2	61,9	199,0	35,0	56,5	25,9	166	82	49,4
1988	524,1	307,5	58,7	204,3	39,0	66,4	33,9	170	73	42,9
1989	441,9	264,5	59,9	154,8	35,0	58,5	23,2	144	70	48,6
1990	431,8	262,5	60,8	123,7	28,6	47,1	19,0	163	78	47,9
1991	460,8	281,8	61,2	171,0	37,1	60,7	48,3	149	72	48,3
1992	461,1	229,1	***49,7***	95,1	20,6	41,5	36,2	154	57	37,0
1993	556,5	357,0	64,2	174,8	31,4	49,0	30,8	165	81	49,1
1994	423,9	***211,3***	49,8	93,1	22,0	44,1	18,9	163	70	42,9
1995	638,8	489,6	76,6	**413,1**	**64,7**	**84,4**	48,2	158	73	46,2
1996	498,6	394,3	79,1	165,0	33,1	41,8	37,7	152	89	**58,6**
1997	629,9	471,9	74,9	340,3	54,0	72,1	49,5	160	81	50,6
1998	565,2	384,4	68,0	197,6	35,0	51,4	30,3	167	89	53,3
1999	449,3	250,6	55,8	133,1	29,6	53,1	32,4	170	75	44,1
2000	533,1	327,4	61,4	165,1	31,0	50,4	34,2	158	73	46,2
2001	619,3	444,3	71,7	192,0	31,0	43,2	**74,4**	175	86	49,1
2002	493,2	333,1	67,5	237,8	48,2	71,4	29,7	142	73	51,4
2003	417,0	306,0	73,4	238,0	57,1	77,8	23,3	***118***	69	58,5
2004	446,2	249,4	55,9	135,8	30,4	54,5	19,4	160	82	51,3
2005	544,5	333,0	61,2	233,5	42,9	70,1	32,2	154	71	46,1
2006	631,0	412,3	65,3	306,3	48,5	74,3	62,5	157	74	47,1
2007	562,8	361,9	64,3	152,3	27,1	42,1	39,9	176	85	48,3
2008	470,4	252,8	53,7	***52,6***	***11,2***	***20,8***	***17,2***	153	66	43,1
2009	723,2	514,6	71,2	315,2	43,6	59,0	41,8	183	97	53,0

Średnioroczna wysokość opadów na stacji Wrocław-Strachowice w okresie 1960-2009 wyniosła 568 mm. Najniższa suma roczna wyniosła 380,8 mm w 1982 r., natomiast najwyższe opady odnotowano w 1977 roku – 776,2 mm (dwukrotnie wyższe od rocznego minimum). Przyjmując dziesięcioprocentowe dodatnie i ujemne odchylenia sumy opadów w danym roku względem wielkości średniej wieloletniej, w 50-letniej serii obserwacji wystąpiło 15 lat z odchyleniem plus 10% i 15 lat z odchyleniem minus 10% (szczególnie licznych w ostatnim dwudziestoleciu). Umownie można określić je jako lata „mokre" i lata „suche". W sąsiedztwie wielkości średniej mieściło się 20 lat („przeciętne"). Przykładowo lata wielkich powodzi na Dolnym Śląsku (1997 i 2001) okazały się dla Wrocławia latami przeciętnymi pod względem wysokości opadów (odpowiednio 629,9 i 619,3 mm).

W badanym wieloleciu 1960-2009 maksymalna dobowa suma wysokości opadów mierzonych deszczomierzem tradycyjnym w sztywnym przedziale czasu dla stacji Wrocław-Strachowice wyniosła 74,4 mm, natomiast najwyższa suma za ruchomy okres 24-godzinny wyniosła już 80,1 mm. W tabeli 3.6 zamieszczono najwyższe sumy opadów dla przedziałów

czasu 24, 48 i 72 godzin. Wyznaczone analogiczne wartości dla okresu 48 i 72 godzin wskazują, że różnice te nie są duże i zawierają się (dla badanej stacji) od ok. 3 do ok. 8%.

Tabela 3.6.

Najwyższe sumy wysokości opadów (w mm) o czasie trwania 24, 48 i 72 godzin w latach 1960-2009 dla Wrocławia-Strachowic

Czas, godz	Deszczomierz Hellmanna (suma stała)			Pluwiograf (suma ruchoma)		
	Suma, mm	Data	Godz. od - do	Suma, mm	Data	Godz. od - do
24	74,4	20 VII 2001	07.00-07.00	80,1	18-19 VII 1997	11.20-11.15
48	101,1	09-10 VIII 1964	07.00-07.00	103,9	06-08 VIII 2006	12.55-12.50
72	110,8	18-20 VII 1997	07.00-07.00	116,9	05-08 VIII 2006	10.50-10.45

Analizując szerzej opady występujące na terenie Wrocławia w latach 1960-2009 stwierdzono, że najwyższa dobowa suma wysokości opadów wyniosła 115,0 mm i zmierzona została w dn. 17 lipca 1965 r. na stacji opadowej Wrocław-Psie Pole. Nieznacznie niższa suma – 110,4 mm wystąpiła rok wcześniej, w dniu 10 sierpnia 1964 r. na stacji Wrocław-Oporów. Także w materiałach sprzed 1960 roku odnaleźć można dobową sumę przekraczającą 100 mm, np. 111,8 mm w dn. 6 sierpnia 1858 r.

Tabela 3.7.

Sumy wysokości opadów (w mm) o czasie trwania 24, 48 i 72 godz. na stacjach Wrocław-Oporów i Wrocław-Psie Pole dla najwyższych opadów dobowych w latach 1960-2009

Stacja Wrocław-Oporów: 09-11 VIII 1964 r.			Stacja Wrocław-Psie Pole: 16-18 VII 1965 r.		
24 godz.	48 godz.	72 godz.	24 godz.	48 godz.	72 godz.
110,4 mm	148,2 mm	159,0 mm	115,0 mm	119,0 mm	120,0 mm

Analiza czasoprzestrzennego zróżnicowania maksymalnych sum opadów dla przedziałów 24, 48 i 72 godzin na terenie Wrocławia (tab. 3.7) wskazuje, że różnice zmierzonej wysokości opadów dla różnych stacji istotnie się różnią, co w efekcie powodować może okresowe przeciążenia sieci kanalizacyjnej w różnych rejonach miasta. Fakt ten zobowiązuje do stałego monitorowania zjawiska opadów w gęstszej niż dotychczas sieci pomiarowo-obserwacyjnej.

3.5. Czasoprzestrzenne zróżnicowanie opadów atmosferycznych

3.5.1. Średnie roczne wysokości opadów w skali Polski

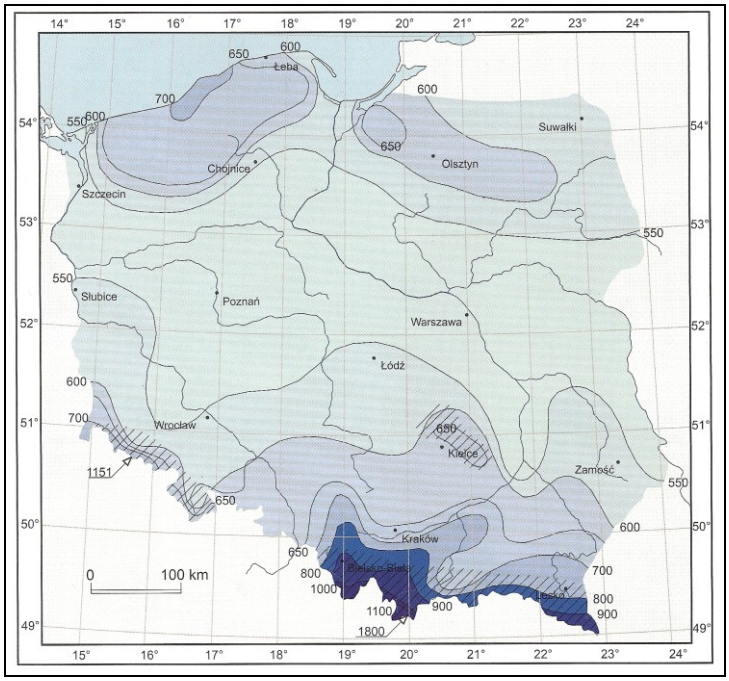
Opady atmosferyczne charakteryzują się dużym zróżnicowaniem wysokości w czasie i w przestrzenni. Pomiary opadów odbywają się w sposób punktowy w sieci stacji pomiarowych, co wymaga stosowania odpowiednich metod interpretacji uzyskanych wyników dla większych obszarów. W zależności od wielkości opracowywanego obszaru i zróżnicowania zakresu analizowanego zjawiska opadów (sumy roczne, miesięczne czy dobowe), w wyniku generalizacji zmieniać się będzie stopień dokładności odwzorowania ich przestrzennego rozkładu. Dla obszaru kraju czy regionu izohiety będą miały mniej lub bardziej regularny przebieg, podczas gdy w odwzorowaniach dla niewielkich obszarów (gmina czy miasto) przebiegi izolinii będą stawały się coraz bardziej zawiłe, silnie uzależnione od gęstości sieci pomiarowej wykorzystanej w opracowaniu. Stopniowo (w zależności od skali) wzrastała będzie także dokładność otrzymywanych informacji o opadach.

Z punktu widzenia modelowania hydrodynamicznego sieci odwodnieniowych w skali, np. dużego miasta lub jego części, niezwykle ważnym staje się posiadanie wiarygodnych informacji o reprezentatywności danych opadowych pochodzących z pojedynczych stacji lub sieci stacji zlokalizowanych na danym terenie, bądź w najbliższym sąsiedztwie. Wiedza ta jest bowiem podstawą niezbędnych analiz wykonywanych podczas prac projektowych

dotyczących budowy nowych czy modernizacji istniejących systemów kanalizacyjnych. Poniżej przedstawione spostrzeżenia i sugestie mają zwrócić uwagę na wagę problemu i pomóc w interpretacji posiadanych wyników na obszary położone w różnej odległości od stacji bazowej, na drodze interpolacji lub ekstrapolacji wyników pomiarów. Przykładowo, do projektowania kanalizacji, znajomość wysokości opadu normalnego na danym obszarze jest niezbędna do zastosowania do obliczeń strumienia deszczu, np. modelu opadów Błaszczyka, jak dotychczas najczęściej stosowanego, czy też modelu Lambora (p. 2.1. pracy).

Według dostępnych wydawnictw atlasowych i publikacji naukowych, w których do wyznaczenia wielości opadów w Polsce przyjmowane były różnorodne okresy wieloletnie i zróżnicowana liczba stacji, zamieszczane są różniące się bardziej lub mniej wartości średniego opadu rocznego dla obszaru całego kraju [26,96-102]. Z uogólnienia informacji zawartych w analizowanych pracach wynika, że średnia roczna suma wysokości opadów dla przeważającej części Polski zawiera się w granicach od 500 do 700 mm. Dla wartości wieloletnich najwyższa średnia roczna wysokość opadów wyniosła 1800 mm na Kasprowym Wierchu w Tatrach, natomiast najniższa to 500 mm na stacji Kujawy w Wielkopolsce. Bezwzględnie najwyższa roczna suma opadów osiągnęła wysokość 2770 mm w Dolinie Pięciu Stawów w Tatrach w 2001 r., a najniższą odnotowano w Poznaniu – 275 mm w 1982 r. [*www.twojapogoda.pl*].

Na rysunku 3.3 przedstawiono przykład zróżnicowania średnich rocznych sum wysokości opadów w Polsce w latach 1971-2000 [26]. Zbliżony do równoleżnikowego przebieg izohiet rocznych nawiązuje do ukształtowania hipsometrycznego kraju. Dla terenów o mało zróżnicowanej rzeźbie bądź równinnych, izolinie zbliżonych sum opadów obejmują duże obszary. Wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza zagęszczenie izohiet wzrasta, informując tym samym o większym zróżnicowaniu opadów. Jak zatem widać zmieniać się tu będzie także zasięg reprezentatywności stacji, który uzależniony będzie od jej położenia na terenie kraju.

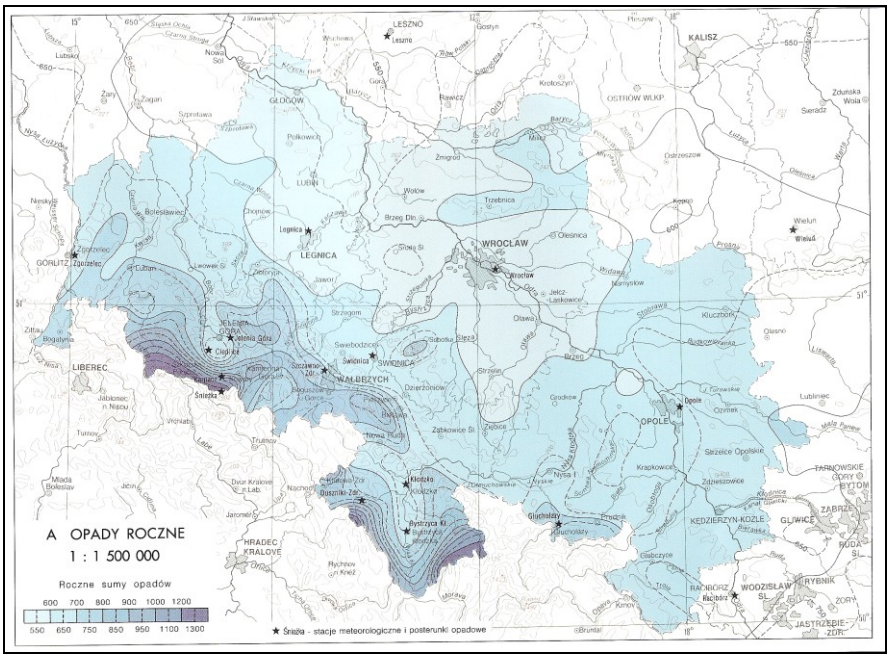


Rys. 3.3. Średnie roczne wysokości opadów (w mm) w Polsce w latach 1971-2000 [26]

Dla przyjętej skali kraju, z prezentowanej mapy (rys. 3.3) wynika, że w rejonie Wrocławia średnia roczna suma wysokości opadów wynosi około 550 mm.

3.5.2. Średnie roczne wysokości opadów w skali Dolnego Śląska

Przechodząc do przestrzennego zróżnicowania opadów w skali makroregionu, na Dolnym Śląsku sumy rocznych wysokości opadów z wielolecia uwarunkowane są wyraźnie wysokością wyniesienia obszaru nad poziomem morza i rzeźbą terenu. Średnie roczne sumy wysokości opadów podawane w publikacjach [103-109] kształtują się w granicach od nieco ponad 500 mm w dolinie Odry, wzrastając ku południowi, do powyżej 1350 mm w Karkonoszach i Górach Izerskich (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Średnie roczne wysokości opadów (w mm) na Dolnym Śląsku w latach 1951-1980 [103]

Według informacji podawanych przez [*www.twojapogoda.pl*] najniższa suma rocznych wysokości opadów dla województwa dolnośląskiego wynosi 381 mm (Wrocław w 1982 r.), natomiast najwyższa roczna, zmierzonych na Śnieżce w roku 1977, wyniosła 1909 mm [110].

Szacowana na podstawie mapy zamieszczonej na rysunku 3.4 wysokość średniego rocznego opadu w rejonie Wrocławia kształtuje się w zakresie 550-600 mm. Przebieg izohiety 600 mm na terenie Dolnego Śląska obejmuje znacznie mniejszy obszar niż jest to pokazane na rys. 3.3 (w skali kraju).

W ujęciu regionalnym, prezentacja przestrzennego zróżnicowania opadów atmosferycznych dla mniejszych obszarów charakteryzuje się wzrostem dokładności, która wynika bezpośrednio z gęstości sieci pomiarowo-obserwacyjnej zlokalizowanej na badanym obszarze. Przy opracowywaniu wieloletnich charakterystyk opadowych wykonanych dla mniejszych obszarów i jednostek terytorialnych, przy dużej liczbie stacji okazuje się, że przebieg izohiet staje się bardzo zawiły. Przebieg i kształt izolinii jest w tym przypadku także wynikiem przyjęcia określonej metody interpolacyjnej, możliwie najbardziej obiektywnej, uwzględniającej charakter analizowanego zjawiska meteorologicznego. W literaturze przedmiotu odnaleźć można wiele prac poświęconych problematyce zróżnicowania przestrzennego opadów na stosunkowo niewielkich obszarach o skali dorzecza, zlewni, regionu czy też aglomeracji miejsko-przemysłowej [111-116]. Złożony niekiedy przebieg izohiet na małych obszarach przedstawianych w dużej skali bywa czasami bardzo trudny do interpretacji, bowiem często trudno dopatrzyć się związku pomiędzy przebiegiem izolinii na

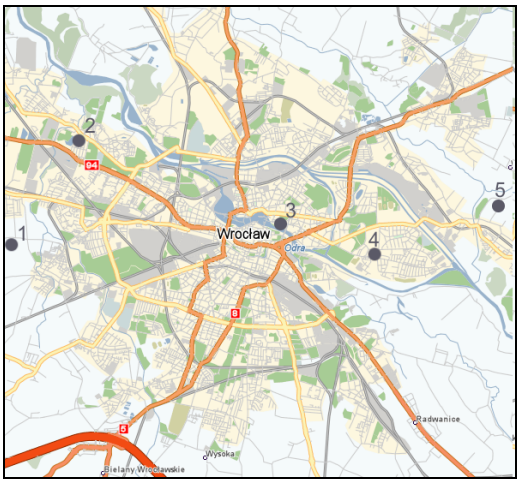
danym obszarze a miejscowymi warunkami środowiskowymi (rodzaj pokrycia terenu, sieć hydrograficzna, wysokość i gęstość zabudowy, itp.). Wymaga to najczęściej szczegółowych analiz i dodatkowych korekt.

3.5.3. Średnie roczne wysokości opadów w skali aglomeracji wrocławskiej

W przypadku aglomeracji miasta Wrocławia tematyka czasoprzestrzennego zróżnicowania opadów atmosferycznych podejmowana była wielokrotnie. Zagadnienie to analizowano w szerokim zakresie, od opisu wyników dla określonych stacji, po analizy syntetyczne dla całego obszaru miasta [30,32-34,107-111]. W długoletniej historii instrumentalnych pomiarów opadów atmosferycznych w rejonie i na terenie miasta Wrocławia, sięgającej roku 1799 r. [117], były one prowadzone na wielu stacjach [115].

W okresie analizowanych w pracy materiałów pluwiograficznych za lata 1960-2009, poza szczegółowo opisaną historią stacji IMGW na Strachowicach (w rejonie obecnego lotniska) w zachodniej części miasta, pomiary pluwiograficzne prowadzone były także na stacji Uniwersytetu Wrocławskiego na Biskupinie oraz na stacji Akademii Rolniczej (obecnie Uniwersytet Przyrodniczy) na Swojcu. Obie stacje zlokalizowane są we wschodniej części miasta (rys. 3.5). Poza prezentowanymi w niniejszej pracy, obszernymi wynikami przeprowadzonych badań i analiz materiałów archiwalnych pochodzących z obserwacji pluwiograficznych ze stacji IMGW Wrocław-Strachowice, rzetelnego opracowania pod kątem przydatności do celów projektowych, doczekały się jedynie materiały ze stacji Wrocław-Swojec [32-34]. Materiały zgromadzone w archiwum Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Wrocławskiego wciąż czekają na naukowe opracowanie, które mogłoby być pomocne do projektowania odwodnień terenów, w tym modelowania hydrodynamicznego kanalizacji miasta Wrocławia.

Obecnie na terenie miasta Wrocławia funkcjonują trzy stacje meteorologiczne w sieci IMGW: Strachowice, Stabłowice i Ogród Botaniczny, jedna stacja Uniwersytetu Przyrodniczego (UP): Swojec (od kilku lat funkcjonuje też stacja doświadczalna UP – na Placu Grunwaldzkim), a także jedna stacja Uniwersytetu Wrocławskiego (UWr.) - Biskupin. Lokalizację stacji zamieszczono na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Rozmieszczenie stacji pomiarowych na terenie Wrocławia omawianych w pracy (1 – IMGW Wrocław-Strachowice, 2 – IMGW Wrocław-Stabłowice, 3 – IMGW Wrocław-Ogród Botaniczny, 4 – UWr. Wrocław-Biskupin, 5 – UP Wrocław-Swojec)

Wyniki opracowań pomiarów opadów z rejonu aglomeracji wrocławskiej, w zależności od analizowanego okresu oraz lokalizacji stacji pomiarowej, są dość rozbieżne, co w części

wynika z samej natury badanego zjawiska. W świetle wykorzystanych w niniejszej pracy publikowanych wyników badań średnia roczna suma opadów dla Wrocławia przedstawiona została w tabeli 3.8. Z zestawienia tego wynika, że najwyższa średnia suma rocznych wysokości opadów z wielolecia we Wrocławiu wyniosła 669 mm (z lat 1963-1972 dla Karłowic), natomiast najniższa osiągnęła wysokość 516 mm (z lat 1951-1960 dla Gądowa Małego). Średnia dla okresu 100-letniego (1881-1980) wyniosła 593 mm.

Tabela 3.8.

Średnie roczne sumy wysokości opadów (w mm) we Wrocławiu z różnych okresów pomiarowych według różnych autorów

Nazwa stacji	**Okres analizy**	**Średnia roczna suma opadów, mm**	**Źródło danych**
Wrocław-Biskupin UWr.	1981-1995	552	[91]
Wrocław-Biskupin UWr.	1946-1980	590	[116]
Wrocław-Biskupin UWr.	1951-1960	554	[116]
Wrocław-Biskupin UWr.	1961-1970	635	[116,119]
Wrocław-Biskupin UWr.	1971-1980	592	[116,119]
Wrocław-Biskupin UWr.	1981-1990	564	[119]
Wrocław-Biskupin UWr.	1961-1990	597	[119]
Wrocław(1)	1981-2000	567	[118]
Wrocław(2)	1891-1930	592	[97]
Wrocław-Krzyki	1891-1930	585	[97]
Wrocław-Psie Pole	1891-1930	572	[97]
Wrocław-Stabłowice	1891-1930	599	[97]
Wrocław(3)	1881-1980	593	[117]
Wrocław(4)	1961-1970	635	[117]
Wrocław(4)	1951-1960	554	[117]
Wrocław-Strachowice	1971-2000	569	[120]
Wrocław-Ogród Botaniczny	1971-2000	576	[120]
Wrocław-Stabłowice	1971-2000	568	[120]
Wrocław-Gądów Mały	1931-1960	574	[99]
Wrocław-Gądów Mały	1951-1960	**516**	[99]
Wrocław-Swojec	1961-1970	566	[119]
Wrocław-Swojec	1971-1980	582	[119]
Wrocław-Swojec	1981-1990	572	[119]
Wrocław-Swojec	1961-1990	573	[119]
Wrocław-Strachowice	1961-1970	576	[119]
Wrocław-Strachowice	1971-1980	659	[119]
Wrocław-Strachowice	1981-1990	529	[119]
Wrocław-Strachowice	1961-1990	588	[119]
Wrocław-Swojec	1963-1972	586	[121]
Wrocław-Biskupin-IMGW(5)	1963-1972	639	[120]
Wrocław-Biskupin UWr.	1963-1972	632	[122]
Wrocław-Gądów Mały(5)	1963-1972	600	[120]
Wrocław-Karłowice	1963-1972	**669**	[120]
Wrocław-Ogród Botaniczny	1963-1972	667	[120]
Wrocław-Oporów	1963-1972	665	[120]
Wrocław-Psie Pole	1963-1972	645	[120]
Wrocław-Strachowice	1963-1972	598	[120]
Wrocław-Tarnogaj	1963-1972	620	[120]
Wrocław-Złotniki/Stabłowice	1963-1972	616	[120]
Wrocław-Strachowice	**1960-2009**	**568**	**[11]**
Wrocław-Biskupin UWr.	**1960-2009**	**590**	**[11,122]**
Wrocławska seria opadowa	**1881-2009**	**588**	**[11]**
Wrocław-Karłowice	1963-1972	669	MAX
Wrocław-Gądów Mały	1951-1960	516	MIN

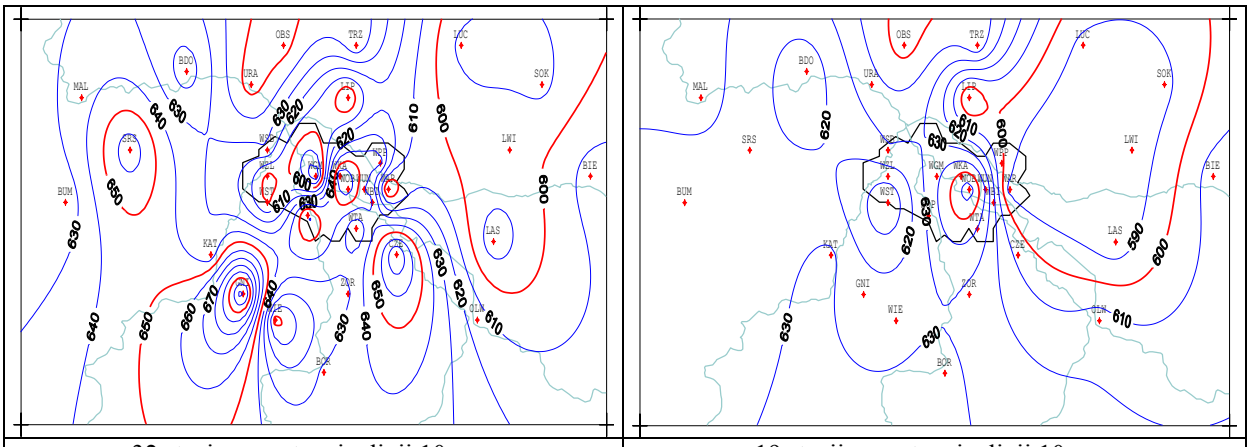
Opisy: (1) - autorzy nie podają nazwy stacji (prawdopodobnie jest to Wrocław-Biskupin, Uniwersytet Wrocławski); (2) – brak bliższej lokalizacji; (3) – stacje łączone („Wrocławska seria opadowa"); (4) – w pracy [117] podawane są średnie sumy w kolejnych 10-leciach – tu zamieszczono sumę najwyższą i najniższą dla okresu 10-letniego; (5) – materiał redukowany.

Należy zwrócić uwagę (tab. 3.8) na wielkości opadów dla czasowo bliskich 10-letnich okresów: 1951-1960 Wrocław-Gądów Mały (516 mm) i 1963-1972 Wrocław-Karłowice (669 mm), jako wysokości skrajnych średnich wieloletnich sum opadów dla Wrocławia. Różnica wysokości opadów średnich wyniosła tu 153 mm, co stanowi 25,8% średniej sumy rocznej wyznaczonej dla okresu 100-letniego (1881-1980). Z kolei zestawione wysokości opadów dla największej liczby wrocławskich stacji (11) funkcjonujących w jednakowym, wspólnym 10-leciu 1963-1972 wskazuje, że różnica średnich sum skrajnych na terenie Wrocławia wyniosła 83 mm (669-586 mm). Potwierdza to tym samym główne cechy charakteryzujące opady – ich dużą czasową i przestrzenną zmienność.

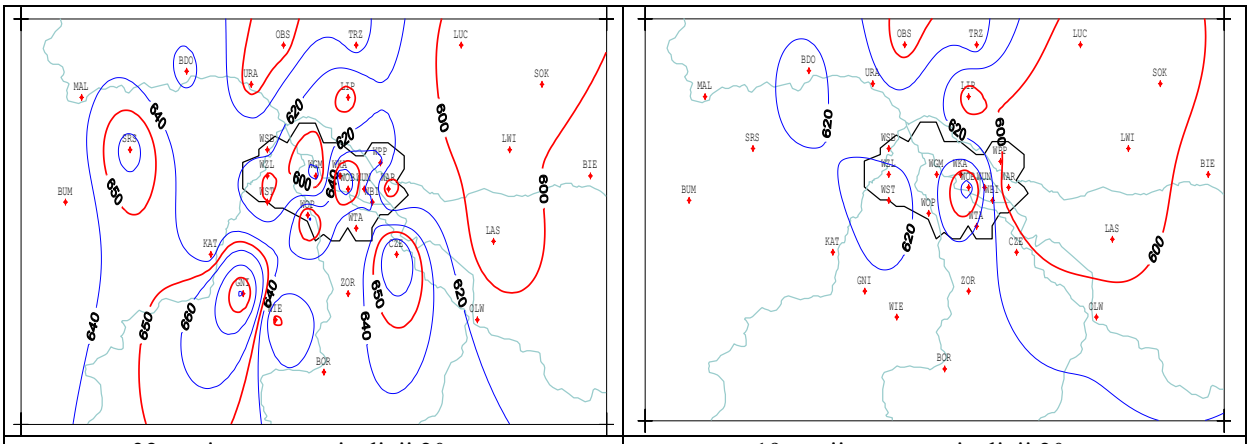
W pracy [119] podano porównanie wysokości opadów normalnych dla trzech stacji: na Strachowicach, Biskupinie oraz Swojcu i wykazano dla okresu 30-lecia 1961-1990 różnicę sięgającą 24 mm (Biskupin 597 mm, Strachowice 588 mm, Swojec 573 mm).

Wyżej zbadane relacje i wartości średnich uległy w ostatnich dziesięcioleciach zmianie. Z własnej analizy uzyskano dla stacji IMGW Wrocław Strachowice dla okresu 1960-2009 średnią 568 mm (porównaj: 588 mm dla lat 1961-1990 [119]). W tym samych okresie (1960-2009) średnia dla stacji Wrocław-Biskupin (UWr.) wyniosła 590 mm (porównaj: 597 mm wg [119] dla lat 1961-1990), a średnia dla „wrocławskiej serii opadowej" za 129-letni okres obserwacji (1881-2009) była zbliżona wartością do średniej z Biskupina (1960-2009), tj. wyniosła 588 mm. Oznacza to nieznaczny spadek rocznych wysokości opadów w ostatnich dwóch dziesięcioleciach dla obu analizowanych stacji (p. 3.4. pracy).

W badaniach przestrzennego zróżnicowania opadów w otoczeniu aglomeracji wrocławskiej, przeprowadzonych w pracy [115], wykorzystane zostały wyniki pomiarów opadów z 32 stacji funkcjonujących w latach 1963-1972 na terenie Wrocławia i w promieniu około 40 km wokół miasta. Porównanie przeprowadzono w odniesieniu do liczby funkcjonujących stacji po redukcji sieci IMGW przeprowadzonej w latach 90-tych (pozostało 17 stacji IMGW oraz Swojec-UP i Biskupin-UWr). Z wykorzystaniem różnych metod wykazano wpływ liczby stacji oraz stosowanego interwału wykreślania izohiet na dokładność przestrzennego obrazu rozkładu wysokości opadów (rys. 3.6). Podobne analizy wykonano dla kilku wybranych przypadków wysokich opadów dobowych (rys. 3.7).

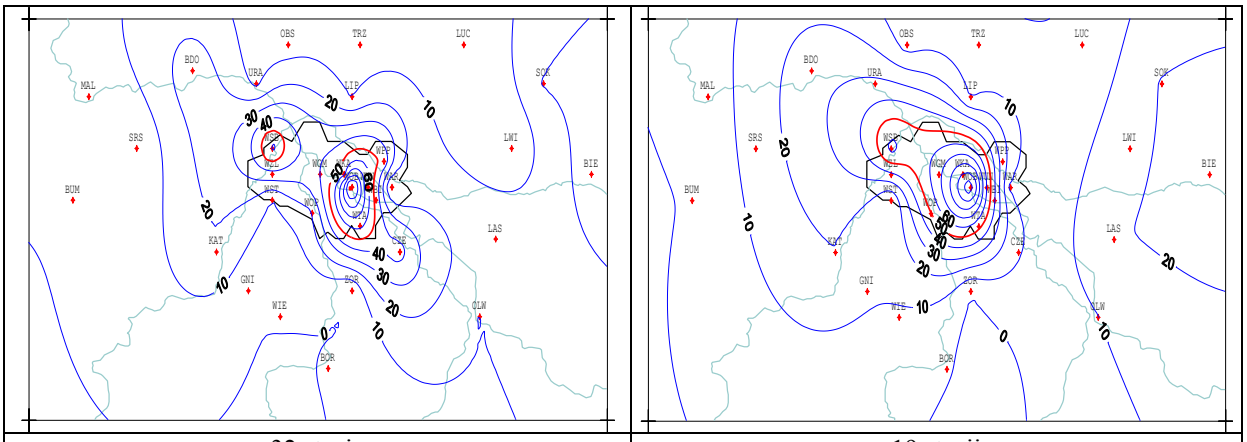


32 stacje - rozstaw izolinii 10 mm | 19 stacji - rozstaw izolinii 10 mm



32 stacje - rozstaw izolinii 20 mm | 19 stacji - rozstaw izolinii 20 mm

Rys. 3.6. Odwzorowania średnich rocznych wysokości opadów atmosferycznych (w mm) w rejonie aglomeracji miasta Wrocławia w latach 1963-1972 w zależności od liczby analizowanych stacji i przyjętego rozstawu izolinii



32 stacje | 19 stacji

Rys. 3.7. Odwzorowania dobowej wysokości opadów (w mm) z dnia 6.06.1971 r. w rejonie aglomeracji miasta Wrocławia w zależności od liczby analizowanych stacji

Zmniejszenie liczby wykorzystanych w opracowaniach stacji powoduje powstanie znacznych różnic w przebiegu izohiet i ich zasięgu. Uzyskane wyniki potwierdziły tezę, że mała liczba stacji pomiarowych może powodować znaczną utratę informacji o rzeczywistej wysokości opadów na badanym obszarze oraz zbyt dużą generalizację przebiegu izohiet. Ponadto nieodpowiednio dobrana wielkość interwału wykreślania izolinii może dodatkowo powodować, że dla obszarów nie objętych pomiarami wielkości opadów mogą się znacząco różnić. Wskazane jest zatem, aby dla obszarów zurbanizowanych liczba stacji pomiarowych opadów atmosferycznych była możliwie jak największa.

W przypadku prac projektowych nad rozbudową czy modernizacją istniejącej sieci kanalizacji ogólnospławnej czy deszczowej miasta Wrocławia, niezwykle istotne są charakterystyki natężeń deszczy o określonym czasie trwania, najczęściej poniżej 360 minut. Informacje takie dostępne są jedynie na tradycyjnych (papierowych) zapisach pluwiograficznych, a dopiero od kilku zaledwie lat są rejestrowane za pośrednictwem urządzeń automatycznych. Z trzech stacji IMGW obecnie funkcjonujących we Wrocławiu tylko na stacji na Strachowice była i jest nadal prowadzona ciągła rejestracja opadów. Sieć kilku zaledwie stacji pomiarowych opadów we Wrocławiu jest z pewnością za rzadka i należy dążyć do jej zagęszczenia (co najmniej podwojenia ich liczby), z uwzględnieniem przy lokalizacji nowych stacji, charakterystycznych cech zurbanizowanego środowiska. Szczególnie w części północnej, środkowej (najsilniej zurbanizowanej) i południowej miasta.

Przeprowadzona w pracy analiza maksymalnych dobowych wysokości opadów dla stacji Wrocław-Strachowice za 50-letni okres 1960-2009 wykazała, że najwyższa suma dobowa opadów wyniosła 74,4 mm (20.07.2001 r.), podczas gdy na innych wrocławskich stacjach kilkakrotnie notowane były w tych latach sumy przekraczające 100 mm na dobę, np. Wrocław-Psie Pole: 115,0 mm w dniu 17.07.1965 r. (na Strachowicach w tym czasie zarejestrowano tylko 22,0 mm) [11]. Różnica wysokości opadu maksymalnego wynosi aż 40,6 mm, co dla stacji na Strachowicach jest wielkością przewyższającą o 55% dotychczasową najwyższą dobową wysokość opadów. W przypadku intensywnego opadu, taka ilość deszczu może spaść w czasie poniżej jednej godziny i wówczas opady w krótszych odcinkach czasu mogą przybierać bardzo wysokie natężenia. Widać zatem, wyraźnie jak duże może być zróżnicowanie przestrzenne i wynikające z tego niedoszacowanie wielkości opadów w przypadku sum maksymalnych dobowych na obszarze dużych aglomeracji miejskich, gdy sieć stacji jest bardzo rzadka.

W zakresie potrzeb modelowania hydrodynamicznego sieci kanalizacyjnych na obszarze Wrocławia przeprowadzone studium czasoprzestrzennego zróżnicowania opadów pod kątem określenia reprezentatywności stacji, wykazało, że obecna sieć pomiarowo-obserwacyjna może nie spełnić zapotrzebowania na oczekiwane informacje. Odnosi się to głównie do wyników charakteryzujących wysokości opadów o zróżnicowanym czasie trwania, a w szczególności dotyczy to intensywnych opadów krótkotrwałych, niosących duże zagrożenie funkcjonowania kanalizacji. Dążyć należy zatem do optymalnego pokrycia obszaru miasta Wrocławia siecią stacji automatycznie rejestrujących wysokość opadu w czasie, co w lepszy sposób pozwoli projektować i modernizować miejską sieć kanalizacyjną. W efekcie tych działań znacznie poprawi się zabezpieczenie i ochrona terenów zurbanizowanych przed lokalnymi wylewami z kanalizacji czy podtopieniami, wywołanymi wystąpieniem intensywnych opadów deszczu.

4. Analiza błędów rejestracji wysokości opadów

4.1. Sezonowe i miesięczne wysokości opadów

Analizę dokładności pomiarów wysokości opadów deszczowych za pomocą tradycyjnego pluwiografu pływakowego (zegarowego) i pluwiografu nowej generacji typu korytkowego (SEBA), w porównaniu do standardowego deszczomierza Hellmanna, przeprowadzono z konieczności na materiale badawczym pochodzącym ze stacji meteorologicznej IMGW w Legnicy - o identycznych deszczomierzach i o zbliżonych do wrocławskich warunkach meteorologicznych, ponieważ nie dysponowano takim materiałem porównawczym dla Wrocławia (współrzędne stacji: 51-12 N, 16-13 E; rzędna wysokości: 122 m npm; opad normalny z lat 1971-2000: 515 mm). W okresie sezonu pluwiograficznego V-X 2009 r. na stacji w Legnicy prowadzone były równoczesne pomiary opadów atmosferycznych z wykorzystaniem trzech typów deszczomierzy: Hellmanna, pluwiografu pływakowego oraz automatycznego pluwiografu korytkowego SEBA (rys. 4.1). Urządzenia pomiarowe zlokalizowane są na terenie ogródka meteorologicznego, zgodnie z obowiązującymi wymogami, tj. we wzajemnej odległości pomiędzy deszczomierzami wynoszącej ok. 2 metry, a pomiar odbywa się na wysokości 1-go metra nad poziomem terenu.

Rys. 4.1. Deszczomierze na stacji meteorologicznej IMGW w Legnicy, od lewej: pluwiografy pływakowy i korytkowy SEBA oraz deszczomierz Hellmanna (fot. J. Jadach)

W całym sezonie pomiarowym V-X 2009 r. sumaryczna wysokość opadów zmierzona trzema deszczomierzami była podobnej wielkości (tab. 4.1). Najwyższe opady zmierzono jednak deszczomierzem Hellmanna 472,3 mm (ten wynik przyjęto za 100%), pośrednie - pluwiografem pływakowym 469,9 mm (P/H = 99,5%), natomiast najniższe uzyskano z pluwiografu korytkowego SEBA 467,3 mm (S/H = 98,9%). Dla pluwiografu SEBA największa bezwzględna różnica wyników pomiarów wyniosła więc 5,0 mm, co względem wskazań deszczomierza Hellmanna różni się o 1,1%. Natomiast wysokość opadów z pluwiografu pływakowego była niższa od wskazań standardowego deszczomierza o 2,4 mm, czyli różniła się o 0,5%.

Tabela 4.1.
Sumy miesięczne wysokości opadów (w mm) i ich odchylenia względem deszczomierza Hellmanna (100%) dla stacji IMGW w Legnicy w sezonie V-X 2009 r.

Miesiąc	Deszczomierz Hellmanna (H)	Pluwiograf pływakowy (P)	P/H %	Pluwiograf SEBA (S)	S/H %
V	81,5	82,1	100,7	79,7	97,8
VI	**141,4**	**140,3**	**99,2**	**141,3**	**99,9**
VII	126,3	124,9	98,9	124,0	98,2
VIII	52,3	53,5	102,3	52,4	100,2
IX	11,5	11,2	97,4	11,2	97,4
X	59,3	57,9	97,6	58,7	99,0
Sezon V-X	**472,3**	**469,9**	**99,5**	**467,3**	**98,9**

Najwyższe miesięczne sumy opadów wystąpiły w czerwcu 2009 r., przekraczając nieznacznie wysokość 140 mm, natomiast najniższe przypadły na wrzesień, sięgając nieco powyżej 11 mm. Analizując wysokości opadów zmierzone w poszczególnych miesiącach zauważalne są odchylenia sum wysokości opadów (tab. 4.1). Przykładowo, w czerwcu najwyższe sumy wysokości opadów wskazał deszczomierz Hellmanna - przyjęto za 100%, zaś pozostałe urządzenia notowały wielkości nieco niższe: 99,2% - pluwiograf pływakowy i 99,9% - SEBA. Jedynie w maju 2009 r. dla pluwiografu pływakowego oraz w sierpniu, dla obu pluwiografów, zmierzone sumy wysokości opadów były wyższe niż dla deszczomierza Hellmanna (maksymalnie o 2,3%). Największe, procentowe odchylenia miesięcznych sum wysokości opadów dla obu porównywanych pluwiografów, względem deszczomierza standardowego, nie przekraczały jednak ±2,6%.

Biorąc pod uwagą charakter zjawiska opadu, a zwłaszcza jego zróżnicowanie intensywności w czasie i w przestrzeni, analizowane w pracy urządzenia do rejestracji wysokości opadu (z ciągłym zapisem przebiegu) można uznać za równie dokładne - równorzędne.

4.2. Dobowe wysokości opadów

Liczba dni z opadem (≥ 0,1 mm) wskazana przez trzy deszczomierze w całym analizowanym sezonie była podobna i wyniosła 90 dni wg pluwiografu pływakowego i 91 dni wg pozostałych deszczomierzy. Dobowe sumy wysokości opadów (w mm) zarejestrowane w lipcu 2009 r. na stacji IMGW w Legnicy oraz ich odchylenia (w %) względem deszczomierza Hellmanna (wskazania którego przyjęto za 100%) podano w tabeli 4.2. Odchylenie dobowych wysokości opadów dla 16 dni z opadami w lipcu wahały się dla obu pluwiografów na podobnym poziomie: $P/H \in [92,3;\ 166,7]\%$ i $S/H \in [88,9;\ 114,3]\%$, a średnio dla całego miesiąca: P/H = 98,9% i S/H = 98,2%. Największe wartości względnych różnic dotyczą zwłaszcza małych wysokości opadów - w granicach dokładności przyrządów bądź samego odczytu zapisu.

Tabela 4.2.

Sumy dobowe wysokości opadów (w mm) w lipcu 2009 r. i ich odchylenia (w %) względem deszczomierza Hellmanna (100%) dla stacji IMGW w Legnicy

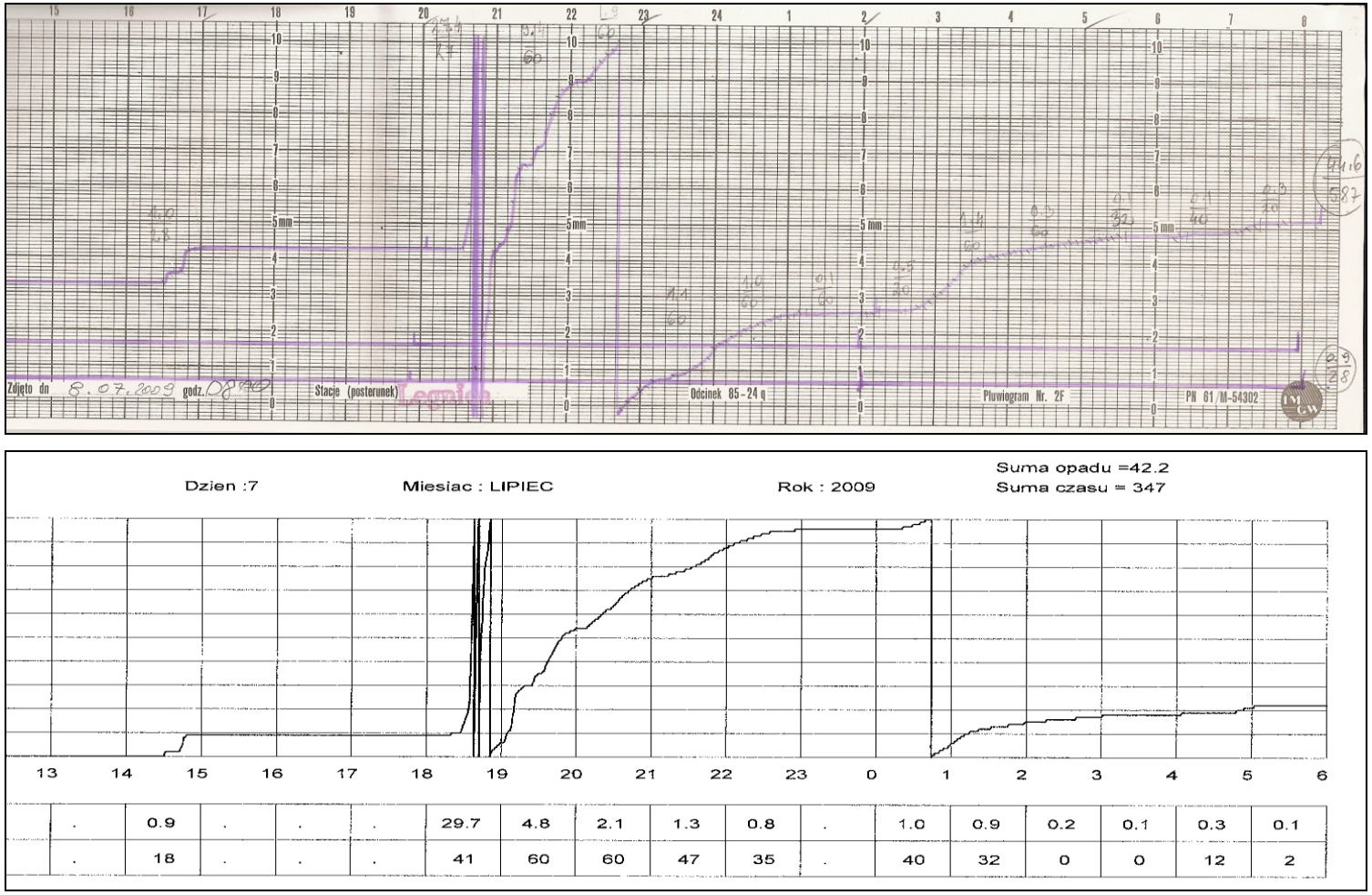
Data	Deszczomierz Hellmanna (H)	Pluwiograf pływakowy (P)	P/H %	Pluwiograf SEBA (S)	S/H %
2 VII	0,7	0,8	114,3	0,8	114,3
4 VII	18,6	18,6	100,0	19,3	103,8
5 VII	0,9	1,1	122,2	0,8	88,9
7 VII	**45,2**	**43,9**	**97,1**	**42,2**	**93,4**
8 VII	2,5	2,4	96,0	2,3	92,0
10 VII	9,3	8,7	93,5	8,5	91,4
11 VII	2,6	2,4	92,3	2,7	103,8
15 VII	2,8	2,8	100,0	2,8	100,0
18 VII	19,4	19,2	99,0	19,4	100,0
19 VII	0,3	0,5	166,7	0,3	100,0

20 VII	2,8	2,8	100,0	2,9	103,6
21 VII	1,0	1,0	100,0	1,0	100,0
23 VII	10,6	11,1	104,7	11,3	106,6
24 VII	5,5	5,5	100,0	5,5	100,0
25 VII	3,1	3,1	100,0	3,1	100,0
28 VII	1,0	1,0	100,0	1,1	110,0
Suma w lipcu	126,3	124,9	98,9	124,0	98,2
Udział sumy w sezonie V-X, %	26,7	26,5	-	26,6	-

Maksymalna dobowa wysokość opadów w całym analizowanym sezonie wystąpiła 7 lipca 2009 r., wynosząc dla poszczególnych deszczomierzy (tab. 4.2): Hellmanna - 45,2 mm (100%), pluwiografu pływakowego - 43,9 mm (P/H = 97,1%) oraz pluwiografu korytkowego SEBA - 42,2 mm (S/H = 93,4%). Są to odchylenia, odpowiednio, rzędu 3% i 7% - w odniesieniu do deszczomierza Hellmanna. Dla tak bardzo wysokich opadów dobowych pluwiograf SEBA jest zatem nieco mniej dokładny w porównaniu z tradycyjnym pluwiografem pływakowym.

Dla ilustracji przykładu, na rysunku 4.2 zamieszczono zapisy graficzne maksymalnego dobowego opadu z dnia 7.07.2009r. Przebieg opadu w czasie na obu pluwiogramach jest na pozór identyczny, jednak zsumowane wysokości opadów różnią się wzajemnie o ok. 4%, na niekorzyść pluwiografu SEBA (43,9 mm i 42,2 mm). Biorąc pod uwagę wszystkie wyniki dotychczasowych badań-porównań, dla dłuższych okresów czasu, można jednak uznać pluwiograf SEBA za dostatecznie dokładny i w przybliżeniu za równorzędny z tradycyjnym pluwiografem pływakowym, a na pewno mieszczący się w klasie dokładności opisu badanego zjawiska, również dla okresu doby (w odniesieniu do wskazań deszczomierza Hellmanna). Jednak dla krótkich (do 6 godzin) czasów trwania bardzo intensywnych opadów pluwiograf SEBA wykazuje już znaczące błędy, co zostanie wykazane w p. 4.3 pracy.

Z porównania dokładności innych typów deszczomierzy najnowszej generacji, tj. elektronicznego deszczomierza wagowego OTT Pluvio^2 i disdrometru laserowego Parsivel wynika, że wzajemne rozbieżności rejestracji dobowych wysokości opadów mogą sięgać nawet 50%, co wykazano w pracy [123].



Rys. 4.2. Fragmenty zapisów opadu w dniu 7.07.2009 r. z pluwiografów pływakowego (górny) oraz korytkowego SEBA (dolny) ze stacji IMGW w Legnicy (Sumy opadów za okresy 6-godzinne dla deszczomierza Hellmanna wg czasu GMT: $12^{01} \div 18^{00}$ – 0,9 mm; $18^{01} \div 24$ – 41,8 mm; $00^{01} \div 06^{00}$ – 2,5 mm) [11]

4.3. Przedziałowe wysokości opadów krótkotrwałych

Opracowanie tradycyjnych (papierowych) pluwiogramów dla uzyskania charakterystyk wysokości opadów o krótkim czasie trwania od 1 minuty do 360 minut nastręcza szereg trudności. Podstawowa podziałka paska pluwiogramu obejmuje przedziały godzinowe, podzielone na sześć 10-cio minutowych części. W standardowych opracowaniach pluwiograficznych stosuje się odczyty wysokości opadów dla przedziałów godzinowych [89]. Dla oceny deszczy krótkotrwałych (w tym zwłaszcza o czasie trwania 5, 10, 15, 30 czy 45-minut) taka dokładność jest jednak nie do przyjęcia. Podstawowa podziałka paska pluwiogramu pozwala jednak na wyodrębnienie fragmentów opadów o czasie trwania krótszym nawet niż 10 minut. Praktycznie, możliwe jest (dostatecznie dokładne) określanie wysokości opadów w minimalnych przedziałach 5-cio minutowych. Określanie przedziałów krótszych obarczone byłoby już dużą niedokładnością odczytu, zarówno wysokości opadu, jak i wydzielenia kolejnych minut czasu jego trwania.

Opracowywanie przedziałów 5-minutowych niesie jednak pewną niewygodę, którą jest standardowe narzucanie stałych przedziałów czasowych: 1÷5, 6÷10, 11÷15, …, aż do 56÷60 minuty. Ponadto, tak określony sposób wyodrębniania i interpretacji przedziałowych wysokości opadów w stałych 5-cio minutowych odcinkach czasu może powodować, że przy opracowywaniu pluwiogramów mogą nie zostać uchwycone maksymalne wysokości opadów o określonym (krótkim) czasie trwania. Z technicznego punktu widzenia wyodrębnienie 5-minutowych interwałów postępujących-kroczących (ruchomych [27]), które zaczynają i kończą się na kolejnych minutach jest jeszcze trudniejsze, nawet przy zastosowaniu graficznego powiększania opisywanego fragmentu pluwiogramu. Jednak ten drugi sposób - w oderwaniu od stałych 5-cio minutowych przedziałów czasowych nałożonych na podstawową podziałkę pluwiogramu, jest właściwy do interpretacji wyników pomiarów opadów (poprawny fizykalnie).

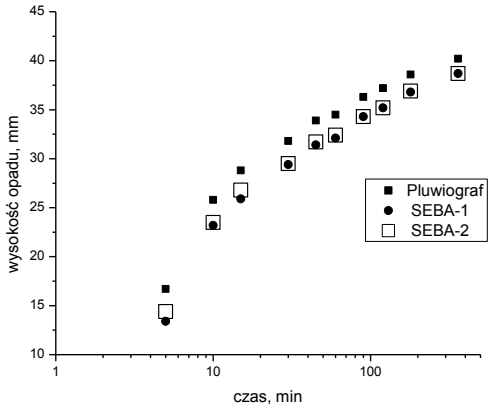
Zasadniczą zmianę jakościową dało wprowadzenie pluwiografów automatycznych z elektronicznym zapisem. W pluwiografie korytkowym SEBA - stosowanym obecnie powszechnie w sieci IMGW, rejestracja opadu dokonywana jest dla każdego opróżnienia korytka przelewowego o bardzo małej objętości, a czas przelewu rejestrowany jest z dokładnością sekundową. Taki sposób rejestracji pozwala na określenie wysokości opadu dla dowolnego odcinka czasu. Tak więc do opracowania opadów z pluwiogramów SEBA możliwe są do zastosowania 2 sposoby wyznaczania maksymalnych sum opadów 5-minutowych: pierwszy - dla stałych 5-cio minutowych przedziałów czasowych oraz drugi - dla 5-cio minutowych interwałów kroczących, zaczynających się w na kolejnych minutach trwania opadu. Jak zostanie wykazane, ten drugi sposób daje lepsze wyniki, zwłaszcza dla najkrótszych, analizowanych przedziałów czasowych.

W poddanym analizie okresie V-X 2009 r. na stacji w Legnicy odnotowano łącznie 40 dni z opadem ≥ 5,0 mm, w tym 13 dni z opadem o wysokości ≥ 10,0 mm (wg deszczomierza Hellmanna). W tabeli 4.3 zamieszczono dla przykładu opracowane wyniki wybranych 10 przypadków największych opadów - o wysokości dobowej ≥ 10,0 mm i o czasie trwania do 360 minut. Opracowanie odczytów z pluwiogramów wysokości opadów w 10 wybranych przedziałach czasu (5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 i 360 minut) wykonano oddzielnie dla pluwiografu pływakowego (zegarowego) oraz pluwiografu korytkowego SEBA. Dla pluwiografu elektronicznego SEBA ustalano dodatkowo wysokości opadów w interwale 1 minuty, a w pozostałych przedziałach czasu zastosowano dwa wspomniane już sposoby opracowania pluwiogramów, tj. odczyty przy stałych przedziałach czasowych (wyniki oznaczono: „SEBA-1” – tab. 4.3) oraz przy ruchomych przedziałach (wyniki: „SEBA-2”).

Analiza danych przedstawionych w tabeli 4.3 pozwala na sformułowanie następujących wniosków co do różnic rejestrowanych wysokości opadów przez porównywane pluwiografy, mianowicie:

- dla opracowywanych interwałów czasu trwania opadów od 5 do 360 minut wzajemne różnice przedziałowych wysokości opadów nie są na ogół znaczące. Dopiero istotne różnice występują przy wysokich opadach, jak w dniu 7.07.2009 r.;
- różnice przedziałowych wysokości opadów wykonane dla pluwiografu pływakowego i pluwiografu korytkowego SEBA przy identycznych, sztywnych przedziałach czasu trwania opadu wyniosły maksymalnie 3,3 mm (in minus) w interwale 5 minut i minimalnie 1,5 mm w interwale 360 minut (wyniki: SEBA-1 – tab. 4.3, rys. 4.3);
- różnice przedziałowych wysokości opadów dla pluwiografu pływakowego i pluwiografu SEBA przy ruchomych przedziałach czasu trwania opadu były mniejsze i wyniosły maksymalnie 2,3 mm (in minus) w interwale 5 minut i minimalnie 1,5 mm w interwale 360 minut (wyniki: SEBA-2 – tab. 4.3, rys. 4.3);
- sumy opadów krótkotrwałych wyznaczone z cyfrowych zapisów pluwiografu SEBA przy stałych i ruchomych przedziałach czasu trwania opadu różniły się wzajemnie maksymalnie o 2,4 mm w interwale 5 minut, a w pozostałych przedziałach czasu wyznaczone różnice nie przekraczały już ±1,0 mm (tab. 4.3);
- maksymalna jedno minutowa wysokość opadu odczytana z pluwiogramu SEBA wyniosła 3,6 mm (w dniu 7.07.2009 r.).

Na rysunku 4.3 zobrazowano wzajemne różnice ilościowe przedziałowych wysokości opadów dla pluwiografu pływakowego i pluwiografu SEBA – dla wyników SEBA-1 i SEBA-2, ustalonych z pluwiogramów (rys. 4.2) z dnia 7.07.2009 r.



Rys. 4.3. Różnice przedziałowych wysokości opadów dla pluwiografu pływakowego i pluwiografu SEBA – dla wyników SEBA-1 i SEBA-2 ustalonych z pluwiogramów z dnia 7.07.2009 r.

Największe różnice pomiędzy porównywanymi wynikami pomiarów wysokości opadów odnoszą się zwłaszcza do pierwszego 5-cio minutowego interwału czasu ich trwania (tab. 4.3). W przypadku intensywnych opadów osiągających w czasie 5 minut wysokość kilkunastu milimetrów (jak w dniu 7.07.2009r.), różnica 2-3 milimetrów wskazuje na niedoszacowanie wysokości opadu o 10÷20%. Zaznaczyć należy, że zagrożeniem dla funkcjonowania kanalizacji są zwykle krótkotrwałe i intensywne deszcze – opisane na początkowych odcinkach krzywych wysokości (typu DDF) czy natężeń (IDF) opadów w czasie. Niedoszacowanie sięgające 20% uznać należy za znaczące i w związku z tym celowe jest dalsze doskonalenie przyrządów i metod pomiarowych opadów, zwłaszcza o krótkim czasie trwania, miarodajnych do projektowania kanalizacji.

Tabela 4.3.

Zestawienie największych wysokości opadów o czasie trwania od 1 do 360 minut dla stacji IMGW w Legnicy z okresu V-X 2009 r.

Data	Deszczomierz	Suma opadu, mm	Czas wystąpienia opadu		Czas trwania, min	Interwały czasu trwania opadu, min										
			początek	koniec		1	5	10	15	30	45	60	90	120	180	360
20/21 V	Hellmann	15,5														
	Pluwiograf	15,7					2,8	4,3	4,6	5,8	5,9	5,9	5,9	7,3	9,8	15,4
	SEBA-1	15,3					2,5	3,6	4,4	5,4	5,6	5,6	5,6	7,2	9,7	14,8
	SEBA-2	15,3	01-50	06-16	266	1,2	3,4	3,9	4,4	5,5	5,6	5,6	5,6	7,3	9,8	14,8
15 VI	Hellmann	19,7														
	Pluwiograf	19,7					1,8	2,9	3,8	5,6	6,7	9,0	11,9	12,8	13,1	
	SEBA-1	20,5					1,6	3,0	4,0	6,0	7,1	9,4	12,0	13,1	13,4	
	SEBA-2	20,5	17-32	20-24	167	0,5	1,9	3,1	4,0	6,0	7,4	9,4	12,1	13,1	13,4	
24 VI	Hellmann	14,8														
	Pluwiograf	14,8					0,9	1,7	2,1	3,0	4,0	4,3	6,6	8,1	11,2	14,4
	SEBA-1	15,4					0,9	1,8	2,2	3,0	4,1	4,4	6,8	8,0	11,7	15,3
	SEBA-2	15,4	16-26	21-58	332	0,4	1,1	1,8	2,2	3,0	4,1	4,5	6,8	8,1	11,8	15,3
25 VI	Hellmann	18,1														
	Pluwiograf	17,8					5,0	6,9	7,0	7,2	7,3	7,3	8,3	8,5	13,0	16,1
	SEBA-1	18,4					4,6	6,8	7,3	7,3	7,3	7,3	8,6	8,6	13,5	16,8
	SEBA-2	18,4	11-26	17-50	384	1,3	4,6	7,0	7,3	7,3	7,3	7,3	8,6	8,6	13,5	16,8
04 VII	Hellmann	18,6														
	Pluwiograf	18,6					1,9	3,3	4,3	6,0	8,1	8,7	10,8	13,3	15,4	17,7
	SEBA-1	19,3					3,0	4,3	5,4	7,3	8,8	9,4	11,8	14,7	16,8	19,2
	SEBA-2	19,3	00-56	04-50	234	1,0	3,0	4,3	5,4	7,3	8,8	9,4	11,8	14,7	16,8	19,2
07 VII	Hellmann	**45,2**														
	Pluwiograf	**43,9**					**16,7**	**25,8**	**28,8**	**31,8**	**33,9**	**34,5**	**36,3**	**37,2**	**38,6**	**40,2**
	SEBA-1	**42,2**					**13,4**	**23,2**	**25,9**	**29,4**	**31,4**	**32,1**	**34,3**	**35,2**	**36,8**	**38,7**
	SEBA-2	**42,2**	**18-20**	**22-55**	**275**	**3,6**	**14,4**	**23,5**	**26,8**	**29,5**	**31,7**	**32,4**	**34,3**	**35,2**	**36,9**	**38,7**
18 VII	Hellmann	19,4														
	Pluwiograf	19,2					2,8	5,0	6,1	7,1	8,3	8,9	10,9	13,1	15,1	17,9
	SEBA-1	19,4					4,1	5,3	6,1	7,2	8,3	8,9	11,3	13,3	15,3	18,2
	SEBA-2	19,4	14-25	19-21	296	0,9	4,1	5,4	6,4	7,3	8,4	9,0	11,3	13,4	15,4	18,2
23 VII	Hellmann	10,6														
	Pluwiograf	11,1					6,1	8,7	9,6	10,1	10,2	10,2	10,2	10,2	10,4	11,1
	SEBA-1	11,3					3,5	6,8	9,2	10,4	10,5	10,5	10,5	10,5	10,7	11,3
	SEBA-2	11,3	16-51	21-45	294	2,0	5,9	7,8	9,5	10,4	10,5	10,5	10,5	10,5	10,7	11,3
02 VIII	Hellmann	13,6														
	Pluwiograf	13,3					0,8	1,5	2,1	4,0	5,7	7,1	9,2	9,9	10,2	
	SEBA-1	13,7					0,8	1,6	2,3	4,3	5,8	7,3	9,6	10,2	10,5	
	SEBA-2	13,7	00-10	03-29	199	0,2	0,8	1,6	2,4	4,3	5,8	7,3	9,6	10,2	10,5	
10 VIII	Hellmann	11,5														
	Pluwiograf	11,9					1,7	2,4	2,6	2,8	3,3	4,0	5,8	7,2	8,7	8,9
	SEBA-1	11,5					1,2	2,2	2,4	2,7	3,3	4,0	5,4	6,8	8,5	8,8
	SEBA-2	11,5	22-14	01-43	209	0,4	1,6	2,2	2,5	2,7	3,3	4,0	5,5	6,8	8,6	8,8

Uwagi: suma opadów obejmuje także opady występujące poza opisanym okresem; czas początku i końca opadu wg wskazań deszczomierza SEBA;
„SEBA-1" – dla stałych interwałów czasu trwania opadu (1-5, 6-10, 11-15, …, 56-60 min); „SEBA-2" – dla interwałów postępujących.

Występujące różnice rejestrowanych wysokości opadu w analizowanych deszczomierzach samozapisujących, w stosunku do wskazań deszczomierza Hellmanna, uwidoczniają się zwłaszcza dla krótkotrwałych intensywnych opadów, stosunkowo rzadko występujących, ale miarodajnych do wymiarowania kanalizacji. Spowodowane to może być wieloma przyczynami. W przypadku pluwiografu pływakowego (zegarowego) podczas intensywnego deszczu, w momencie opróżniania zbiorniczka retencyjnego za pomocą lewara, pewna wysokość opadu nie jest rejestrowana. Dowodem na to jest niecałkowicie pionowy wykres na pluwiogramie, rejestrujący moment opadania pływaka w zbiorniczku (patrz przykładowe pluwiogramy na rysunkach 3.1 i 4.2 - górny). Skutkuje to zaniżeniem sumarycznej wysokości opadu. W rejestratorach elektronicznych, ubytki opadów mogą występować podczas opadania korytek i rozchlapywania wody. Dochodzą do tego jeszcze przyczyny natury technicznej, jak nieregularność działania mechanizmu zegarowego czy spadek napięcia baterii zasilającej, przytkanie wylotu w zlewce, niedokładność założenia paska pluwiogramu i szereg innych (w tym sama rozdzielczość podziałki pluwiogramu i grubości linii zapisu), mających swój udział w niedokładności wyniku odczytu wysokości i czasu trwania opadu.

Zauważyć należy, że rejestratory elektroniczne mają też i inne wady. W odniesieniu do tradycyjnych pluwiografów pływakowych, które funkcjonują w zasadniczo niezmienionej postaci od kilkudziesięciu lat i rejestrują w miarę jednorodnie przebiegi opadów w czasie, urządzenia automatyczne już po paru latach funkcjonowania ulegają stopniowemu rozregulowaniu, a co za tym idzie ich wskazania stają się niemiarodajne. Godnym uwagi wydaje się zalecenie prowadzenia okresowo równoczesnych pomiarów opadów pluwiografami tradycyjnymi i elektronicznymi. Przestawiając system pomiarowy wyłącznie na rejestrację elektroniczną, nie można bowiem zapominać o okresowych kontrolach i kalibracji tych urządzeń na podstawie tradycyjnych metod pomiarowych (np. deszczomierzem Hellmanna). Stosując to zalecenie zachowana zostanie porównywalność uzyskiwanych wyników pomiarów względem wcześniejszych materiałów pomiarowo-obserwacyjnych.

4.4. Podsumowanie i wnioski z analizy dokładności urządzeń pomiarowych

Analizę dokładności rejestracji wysokości opadów za pomocą pluwiografu pływakowego oraz pluwiografu korytkowego SEBA, w porównaniu do standardowego deszczomierza Hellmanna, oparto na materiale pluwiograficznym ze stacji meteorologicznej IMGW w Legnicy z ciepłego półrocza (V-X) 2009 r. o identycznych urządzeniach pomiarowych jak we Wrocławiu. Porównań dokonano dla czterech typowych okresów bilansowych opadów, tj.: sezonu V-X, miesiąca, doby oraz do 6 godzin. Poniżej podsumowano syntetycznie wyniki i wnioski z badań.

Sumaryczna wysokość opadów w całym sezonie pluwiograficznym zmierzona trzema deszczomierzami była bardzo zbliżona. Jednak największą sumę wysokości opadów rejestrował deszczomierz Hellmanna, pośrednią - pluwiograf pływakowy, natomiast najniższą - pluwiograf korytkowy SEBA. Maksymalna różnica wyników (dla pluwiografu SEBA) względem deszczomierza Hellmanna wyniosła więc ok. 1%. Z analizy miesięcznych wysokości opadów zauważalna była również podobna tendencja odchylenia mierzonych sum opadów. Największe sumy opadów wskazywał deszczomierz Hellmanna, zaś pozostałe urządzenia z reguły notowały nieco niższe wartości. Procentowe odchylenia miesięcznych sum wysokości opadów zarówno dla pluwiografu SEBA, jak i pluwiografu pływakowego, względem deszczomierza Hellmanna, nie przekraczały jednak kilku procent.

W dobie, w której wystąpił największy opad, względna suma wysokości opadów wyniosła: 97,1% dla pluwiografu pływakowego oraz 93,4% dla pluwiografu korytkowego SEBA - w stosunku do 100% dla deszczomierza Hellmanna. Dla największego dobowego opadu w

sezonie pomiarowym, zsumowane wysokości opadów z deszczomierzy samozapisujących różniły się wzajemnie o ok. 4%, na niekorzyść pluwiografu SEBA.

Biorąc pod uwagą charakter zjawiska opadu, a zwłaszcza jego zróżnicowanie intensywności w czasie i w przestrzeni, oceniane urządzenia do rejestracji w czasie wysokości opadu można uznać za dostatecznie dokładne i w przybliżeniu za równorzędne, a na pewno mieszczące się w klasie dokładności opisu badanego zjawiska, zwłaszcza dla długich okresów czasu, takich jak sezon czy miesiąc, ale także dla doby. Jedynie analiza opadów krótkotrwałych - o czasie trwania od 1 minuty do 360 minut wykazała, że największe różnice wysokości opadów, zarejestrowane przez porównywane pluwiografy, występują zwłaszcza w pierwszym interwale 5 minutowym czasu trwania opadu. Wzajemne różnice przedziałowych wysokości opadów dla pluwiografu pływakowego i pluwiografu SEBA są najmniejsze przy zastosowaniu do interpretacji pluwiogramów ruchomych przedziałów czasu trwania opadu. W przypadku bardzo intensywnych opadów, osiągających w czasie 5 minut wysokość kilkunastu milimetrów, wykazano wzajemne różnice o wartości 2-3 milimetrów, co wskazało na niedoszacowanie wysokości opadu rzędu 15% przez pluwiograf SEBA w porównaniu do tradycyjnego pluwiografu pływakowego. Zagrożeniem dla funkcjonowania kanalizacji są zwykle krótkotrwałe i intensywne deszcze – opisane na początkowych odcinkach krzywych wysokości (DDF) czy natężeń (IDF) opadów.

Wnioski z powyższej analizy są głosem w dyskusji dotyczącej wyboru typu deszczomierza automatycznego nowej generacji jako następcy tradycyjnego pluwiografu pływakowego (zegarowego) do rejestracji przebiegu w czasie opadów atmosferycznych. Najistotniejszym kryterium powinno być tutaj uzyskanie jak najdokładniejszego zapisu rzeczywistej wysokości opadów w czasie, i to zarówno (jednocześnie) w długich okresach czasu: sezonu, miesiąca czy doby, a zwłaszcza w najkrótszych – od kilku minut do kilku godzin. Problem dotyczy więc dokładności, a zatem i przydatności różnych typów deszczomierzy automatycznych, dostępnych na rynku: typu korytkowego, jak pluwiograf SEBA – stosowany od 2007 r. na sieci obserwacyjnej IMGW, ale także wagowego czy laserowego - wszystkie o rozdzielczości czasowej rzędu jednej minuty. Nawiązuje to do prac [34,123,124], w których dokonano podobnych ocen dokładności różnych typów deszczomierzy, w tym urządzeń pomiarowych najnowszej generacji, takich jak elektroniczny deszczomierz wagowy OTT Pluvio^2 czy disdrometr laserowy Parsivel. Przykładowo z porównania dokładności tych ostatnich deszczomierzy, tj. wagowego i laserowego, wynika, że wzajemne rozbieżności rejestracji dobowych sum opadów sięgać mogą nawet 50%, co wykazano w pracy [123]. Celowe jest więc dalsze doskonalenie metod i przyrządów pomiarowych do rejestracji opadów, w tym zwłaszcza miarodajnych do projektowania kanalizacji.

5. Analiza i fizykalna interpretacja szeregów częstości opadów maksymalnych we Wrocławiu-Strachowicach

5.1. Testowy okres badawczy opadów 1960-1990

5.1.1. Seria czasowa $C = 1$ rok wg interpretacji Bogdanowicz i Stachy

W pierwszej kolejności dokonano analizy, dyskusji i interpretacji wyników badań maksymalnych wysokości opadów we Wrocławiu-Strachowicach dla testowego okresu obserwacji 1960-1990, dla którego można było porównać je z wynikami z modelu (2.12) Bogdanowicz i Stachy [27] dla $C = 1$ rok w odniesieniu do regionu centralnej Polski, do którego został zaliczony Wrocław (rys. 2.1).

Szeregowanie opadów, wg malejących przedziałowych wartości natężeń (wysokości czy intensywności), ma na celu przyporządkowanie odpowiednich statystycznych częstości (C), bądź zamiennie prawdopodobieństw (p) występowania (wraz z wyższymi), tworzonym w ten sposób seriom czasowym opadów syntetycznych. Do uszeregowanych już opadów możliwe do zastosowania są dwa odmienne metodologie interpretacji i uogólnień wyników badań. Pierwszy historyczny już sposób, zastosowany m.in. przez Błaszczyka [1], Chomicza [23] czy Licznara i Łomotowskiego [34], polega na przyjęciu hipotezy, iż uszeregowanym malejąco opadom (np. o danym natężeniu 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. Druga metodologia, zastosowana m.in. przez Bogdanowicz i Stachy [27] czy Sowińskiego [30], zakłada wygładzanie metodami probabilistycznymi zmierzonych serii czasowych opadów i na tej podstawie przypisywanie im statystycznych częstości występowania nawet w okresie dłuższym niż okres obserwacji opadów (np. w 100-leciu). Uogólnieniem wyników w tej metodologii jest model probabilistyczny opadu, np. w postaci wyestymowanego kwantyla przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa, którego dolne ograniczenie odpowiada wartości funkcji o częstości $C = 1$ rok.

W pierwszej kolejności poddano weryfikacji, na testowym materiale pluwiograficznym z Wrocławia-Strachowic z lat 1960-1990, założenie wyjściowe Bogdanowicz i Stachy o szeregowaniu maksymalnych rocznych opadów syntetycznych - po jednym największym z każdego roku obserwacji - w interwałach czasu trwania od 5 minut do 72 godzin. Następnie zastosowano odmienną interpretację próby losowej opadów - zakładającą szeregowanie największych (wg przyjętego własnego kryterium wyboru) opadów syntetycznych, niezależnie od ich rozkładu w tym samym okresie obserwacji, co praktycznie oznacza, że z niektórych lat uwzględniano ich kilka a z innych żadnego. Na powyższych podstawach sformułowane zostaną wzory na wysokość opadu dla częstości $C = 1$ rok - o strukturze analogicznej do wzoru (2.12) Bogdanowicz-Stachy (czy też postaci (2.4) Błaszczyka), do bezpośrednich porównań ilościowych obu zastosowanych interpretacji próby losowej opadów. W rezultacie, do opracowania opadów maksymalnych we Wrocławiu-Strachowicach, dla testowego okresu 1960-1990 obserwacji, zastosowane będą dwie odmienne metody interpretacyjne: podana przez Bogdanowicz i Stachy oraz własna. Na podstawie analizy i dyskusji wyników obu metod, do opracowania opadów we Wrocławiu-Strachowicach dla podstawowego okresu obserwacji 1960-2009 zostanie wybrana i zastosowana poprawniejsza pod względem ilościowym (i jednocześnie jakościowym) metoda interpretacji serii czasowych opadów syntetycznych, zwłaszcza o częstości $C = 1$ rok.

W tabeli 5.1 podano zestawienie wyników szeregowania wysokości opadów wg metody Bogdanowicz i Stachy, mianowicie dla danych źródłowych z tabeli 3.4, uszeregowano malejąco 31 największych rocznych opadów syntetycznych - o największych w danym roku

wysokościach (w mm) w przedziałach od 5 minut do 72 godzin z N = 31 lat obserwacji, przypisując im odpowiednie empiryczne (uproszczone) częstości występowania: $C(m, N) = N/m$, gdzie m - to numer wiersza (m = 1, 2, 3,…, 31). I tak deszcz syntetyczny w 1-ym wierszu odpowiada (w przybliżeniu) częstości występowania C = 31 lat, a deszcz w 31-ym wierszu odpowiada C = 1 rok. Do celów porównawczych, w wierszu 31* w tabeli 5.1, podano również deszcz syntetyczny o częstości występowania C = 1 rok, ustalony dla danych ze stacji Warszawa-Bielany z tego samego okresu obserwacji opadów (1960-1990), na podstawie materiałów źródłowych zamieszczonych w pracy [27].

Tabela 5.1.

Uszeregowanie największych rocznych przedziałowych wysokości opadów (w mm) z 31 lat obserwacji we Wrocławiu-Strachowicach w latach 1960-1990 - do metody Bogdanowicz i Stachy

Nr	Czas, min															
	5	**10**	**15**	**30**	**45**	**60**	**90**	**120**	**180**	**360**	**720**	**1080**	**1440**	**2160**	**2880**	**4320**
1	**11,4**	**18,7**	**24,7**	**32,9**	**34,1**	**34,8**	**42,7**	**57,7**	**61,9**	**63,1**	**64,2**	**69,1**	**72,1**	**92,6**	**101,1**	**108,5**
2	10,4	18,0	20,7	28,6	32,1	34,7	37,7	41,5	42,8	50,4	63,1	63,1	68,0	86,9	96,2	101,9
3	9,9	15,7	20,2	28,4	30,2	33,6	36,5	36,5	38,4	46,0	52,9	60,4	67,5	80,3	85,8	100,4
4	9,8	14,6	20,1	28,2	29,0	31,7	34,7	36,1	36,7	41,0	50,0	57,4	65,0	73,1	76,2	97,5
5	9,6	14,5	20,0	24,3	27,9	30,5	33,7	34,9	36,5	40,7	48,4	56,8	62,1	70,3	73,4	90,0
6	9,3	13,8	16,6	22,1	24,5	29,1	33,2	33,2	35,1	38,5	46,5	53,9	61,9	69,2	73,1	84,0
7	9,2	13,8	16,5	19,8	21,5	24,6	30,6	32,4	33,2	36,9	43,9	52,8	61,0	62,1	66,5	82,9
8	9,0	13,3	14,6	18,0	20,7	24,0	29,3	29,3	32,8	36,5	41,2	50,9	56,9	57,0	61,1	76,6
9	9,0	12,9	14,6	17,7	19,9	23,5	27,9	28,7	32,4	33,9	40,1	45,0	56,4	56,9	59,5	75,2
10	8,6	12,4	14,0	17,5	19,6	19,9	24,2	26,9	29,3	33,2	39,3	44,4	52,8	56,4	58,5	61,2
11	8,3	10,7	14,0	16,4	19,0	19,9	19,9	22,2	27,3	32,8	39,0	44,1	48,3	55,2	56,4	60,4
12	8,2	10,6	13,7	15,6	18,3	18,5	19,6	19,9	27,0	32,4	38,0	43,9	47,8	52,8	56,3	60,1
13	8,0	10,5	13,2	15,3	17,7	17,7	18,8	19,9	25,6	29,3	37,6	41,2	45,3	48,0	55,5	59,8
14	7,9	10,2	13,0	15,2	16,3	16,9	17,7	19,6	22,6	27,8	36,5	41,2	45,2	47,3	51,6	58,5
15	7,8	10,2	12,6	15,2	16,1	16,6	17,1	18,9	21,9	26,1	35,2	40,3	45,2	47,2	51,0	57,0
16	7,7	9,8	11,9	15,1	16,0	16,6	17,0	18,8	21,5	24,9	35,1	39,6	43,4	47,2	49,0	55,7
17	6,9	9,6	11,4	15,1	15,7	15,9	16,6	18,8	20,4	24,2	32,0	39,3	42,1	46,6	48,9	51,4
18	6,9	9,1	11,1	14,7	15,6	15,9	16,4	18,6	20,2	23,1	31,6	39,3	41,0	46,4	48,6	51,1
19	6,3	9,1	10,6	14,5	15,1	15,5	16,1	17,9	19,9	22,6	31,3	39,3	40,3	45,3	48,1	50,0
20	6,0	8,7	10,3	14,3	15,1	15,3	16,0	17,9	19,2	22,2	30,8	37,9	39,4	45,2	47,7	49,7
21	6,0	8,6	9,8	13,7	14,9	15,1	15,5	17,7	18,9	22,0	30,2	36,5	38,5	45,2	46,2	47,7
22	6,0	8,6	9,3	13,7	14,5	15,1	16,1	16,3	17,8	21,7	29,5	36,4	37,9	41,2	45,3	45,5
23	5,8	8,3	9,2	11,6	14,2	14,5	15,1	15,2	16,7	21,7	27,8	35,1	35,1	38,0	42,6	44,8
24	5,5	8,1	9,2	10,8	12,2	13,4	14,5	14,5	16,4	21,3	27,8	30,8	30,8	38,0	39,8	44,3
25	5,0	7,0	7,9	10,6	12,1	12,4	13,6	13,8	15,8	20,6	27,0	29,2	29,2	35,8	38,0	44,2
26	4,7	6,4	7,7	10,4	11,8	12,3	13,3	13,6	15,5	20,4	26,8	28,5	28,8	35,7	36,1	40,8
27	4,7	6,1	7,2	9,5	10,1	12,1	13,1	13,1	14,8	19,9	24,1	27,8	28,5	35,1	35,1	38,7
28	4,5	5,7	6,6	7,9	10,1	11,0	12,9	13,0	13,6	19,2	22,2	25,9	28,3	31,9	32,1	38,0
29	4,1	5,6	6,4	7,8	10,0	10,8	12,8	13,0	13,4	17,5	21,2	22,6	25,8	28,5	31,0	35,1
30	3,8	5,2	6,2	7,2	7,9	8,1	11,3	11,9	13,0	17,0	18,4	22,1	23,5	26,8	29,9	30,3
31	**3,3**	**4,7**	***5,6***	**5,9**	**6,3**	**6,9**	**10,3**	**11,3**	***12,4***	**16,0**	**17,7**	**20,5**	***22,0***	**22,0**	**22,2**	**26,8**
31*	2,0	3,4	3,8	5,6	-	7,2	-	10,1	11,4	14,5	16,2	16,2	17,9	27,2	27,2	27,5
1*	20,6	21,8	28,0	36,6	-	38,9	-	49,5	50,4	57,0	68,0	69,2	80,1	99,0	109,7	113,3

31* - trzydziesty pierwszy szereg dla danych ze stacji Warszawa-Bielany z okresu 1960-1990 podanych w pracy [27];
1* - pierwszy szereg dla danych ze stacji Warszawa-Bielany z okresu 1960-1990.

Z porównania serii czasowych opadów syntetycznych o przypisanej częstości C = 1 rok dla Wrocławia-Strachowic i dla Warszawy-Bielan (wiersze 31 i 31* - tab. 5.1) wynika, że różnią

się one znacznie przedziałowymi wartościami wysokości opadów: in minus dla interwałów czasu $t \leq 1440$ minut ($\leq$ 24 godz.) względem danych z Wrocławia, oraz tylko nieznacznie in plus dla interwałów czasu: 2160, 2880 i 4320 minut. Natomiast porównując wiersze 1 i 1* - największych zmierzonych wysokości w latach 1960-1990, należy zauważyć, że są one dla Warszawy nieco wyższe (wyjątkowo, dla interwału 5 minut – aż o 80% - 11,4 i 20,6 mm).

5.1.2. Seria czasowa C = 1 rok wg własnej interpretacji

W tabeli 5.2 przedstawiono zestawienie wyników szeregowania przedziałowych wysokości opadów wg własnej interpretacji liczebności próby losowej. Mianowicie do analizy statystycznej wzięto wszystkie wyselekcjonowane intensywne opady z okresu pomiarowego 1960-1990, w liczbie 348 - przewyższające wartością przyjęte w pracy kryteria przedziałowych wysokości opadów. W tabeli tej podano dodatkowo przykładowe serie czasowe opadów syntetycznych - w kolejności 86, 89 i 103, do statystycznej interpretacji częstości ich występowania.

Tabela 5.2.

Uszeregowanie największych przedziałowych wysokości opadów (w mm) z 348 wyselekcjonowanych deszczy z 31 lat obserwacji we Wrocławiu-Strachowicach w latach 1960-1990 - wg własnej metody

Nr	**Czas, min**															
	5	**10**	**15**	**30**	**45**	**60**	**90**	**120**	**180**	**360**	**720**	**1080**	**1440**	**2160**	**2880**	**4320**
1	11,4	18,7	24,7	32,9	34,1	34,8	42,7	57,7	61,9	63,1	64,2	69,1	72,2	92,6	101,1	108,5
2	10,4	18,0	20,7	30,3	32,1	34,7	37,7	41,5	42,8	50,4	64,2	69,1	72,1	86,9	96,2	101,9
3	9,9	16,6	20,2	28,6	31,9	33,6	36,5	36,5	41,3	46,0	63,1	63,1	68,0	80,3	85,8	100,4
4	9,8	15,7	20,1	28,4	30,2	32,4	34,7	36,2	38,4	43,9	52,9	60,4	67,5	75,3	83,9	97,5
5	9,6	14,6	20,0	28,2	29,0	31,7	33,7	36,1	36,7	41,0	50,0	57,4	65,0	73,1	76,2	90,1
6	9,6	14,5	19,8	26,7	28,8	30,5	33,2	34,9	36,5	40,7	48,4	56,8	63,1	70,3	73,4	90,0
7	9,3	14,3	19,2	24,3	27,9	30,3	33,2	33,2	35,1	38,5	46,5	56,8	62,1	69,2	73,1	84,0
8	9,2	13,8	17,8	22,3	24,5	29,1	32,3	33,2	34,9	36,9	44,6	53,9	61,9	65,6	66,5	82,9
9	9,0	13,8	17,0	22,1	24,3	27,5	31,7	33,2	34,4	36,9	44,5	53,5	61,0	65,4	66,4	76,6
10	9,0	13,3	16,6	21,1	23,8	24,6	30,6	32,4	33,2	36,5	43,9	52,8	56,9	62,1	65,6	75,2
11	8,6	12,9	16,5	19,8	21,5	24,5	29,3	29,3	32,8	34,9	41,5	50,9	56,4	62,1	65,1	74,5
12	8,5	12,4	14,6	18,0	20,7	24,0	27,9	28,7	32,4	34,4	41,3	48,9	54,1	57,0	62,1	73,9
13	8,3	12,4	14,6	17,9	19,9	23,5	24,7	26,9	29,3	33,9	41,2	45,2	54,1	57,0	61,1	68,5
14	8,2	11,3	14,4	17,7	19,6	19,9	24,2	25,6	27,3	33,2	40,1	45,0	52,8	56,9	61,1	68,2
15	8,2	11,2	14,0	17,5	19,0	19,9	21,0	23,6	27,0	32,8	39,3	44,4	51,2	56,4	59,5	65,7
16	8,2	10,7	14,0	16,4	18,3	19,2	19,9	22,2	25,6	32,4	39,0	44,1	48,3	55,2	58,5	62,1
17	8,0	10,6	13,7	15,6	17,7	18,5	19,6	21,1	25,6	30,8	38,0	43,9	48,3	52,8	56,5	61,2
18	7,9	10,6	13,4	15,6	17,2	17,7	18,8	20,3	25,0	30,5	37,6	41,2	47,8	51,2	56,4	60,4
19	7,9	10,5	13,2	15,3	16,5	17,3	18,1	19,9	23,0	30,4	36,5	41,2	45,8	51,0	56,3	60,1
20	7,8	10,4	13,0	15,2	16,3	16,9	17,7	19,9	22,6	29,3	35,2	41,0	45,3	50,9	55,5	59,8
21	7,8	10,2	13,0	15,2	16,1	16,6	17,1	19,6	21,9	29,3	35,1	40,6	45,2	50,1	52,8	59,4
22	7,7	10,2	12,6	15,1	16,0	16,6	17,0	19,6	21,5	28,0	34,9	40,3	45,2	48,1	51,6	58,5
23	7,0	9,8	11,9	15,1	15,8	15,9	16,9	19,0	21,1	27,9	34,5	39,6	44,4	48,0	51,1	57,9
24	7,0	9,7	11,4	14,7	15,7	15,9	16,7	18,9	20,4	27,8	33,9	39,3	43,5	47,3	51,0	57,0
25	6,9	9,6	11,1	14,7	15,6	15,9	16,6	18,8	20,3	26,2	32,8	39,3	43,4	47,2	49,0	55,9
26	6,9	9,2	10,6	14,5	15,6	15,6	16,4	18,8	20,2	26,2	32,0	39,3	42,3	47,2	48,9	55,7
27	6,8	9,1	10,5	14,3	15,2	15,5	16,3	18,6	19,9	26,1	31,6	39,3	42,1	46,6	48,6	51,4
28	6,8	9,1	10,3	14,2	15,1	15,3	16,1	17,9	19,2	24,9	31,3	39,0	41,7	46,4	48,6	51,1
29	6,6	8,9	10,3	13,9	15,1	15,3	16,1	17,9	19,1	24,3	30,9	38,0	41,0	45,8	48,1	50,5
30	6,6	8,9	10,0	13,8	14,9	15,1	16,1	17,9	18,9	24,2	30,8	37,9	40,3	45,3	48,1	50,0

31	**6,5**	**8,7**	***9,8***	**13,7**	**14,8**	**15,1**	**16,0**	**17,7**	***18,8***	**23,8**	**30,2**	**36,5**	***40,1***	**45,2**	**47,7**	**49,7**
86	3,6	5,1	6,2	7,8	8,8	9,0	10,0	11,2	12,6	16,0	18,6	20,5	***22,0***	23,0	24,9	28,5
89	3,5	5,1	6,0	7,7	8,7	8,8	10,0	11,0	***12,4***	15,8	18,5	20,1	21,8	22,8	24,3	28,0
103	3,1	4,7	***5,6***	7,1	7,8	8,1	9,4	10,5	10,9	14,2	17,2	18,0	19,6	21,0	22,9	26,0

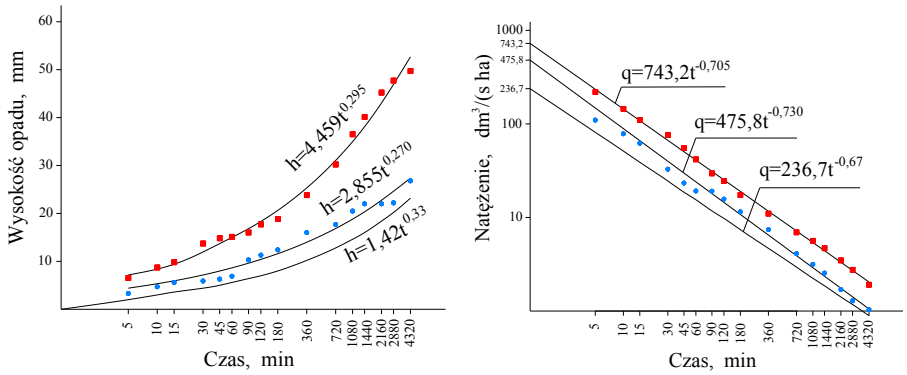
Jak łatwo zauważyć obie tabele (5.1 i 5.2) znacznie się różnią wynikami szeregowania przedziałowych wysokości opadów, zwłaszcza w dolnych ich częściach. W obu tabelach, 31. wiersz wskazuje na różne ilościowo syntetyczne szeregi opadów (typu DDF) dla Wrocławia, a przyporządkowane tej samej częstości występowania C = 1 rok (p = 100%). Wynika to z faktu, iż w przypadku tabeli 5.1, opracowanej wg metody Bogdanowicz i Stachy, przy szeregowaniu opadów nie uwzględniono znacznej liczby intensywnych deszczy, które jednak nie były największe w danym roku. Ma to duże znaczenie zwłaszcza w latach, w których silne deszcze, ulewy czy deszcze nawalne zdarzały się stosunkowo często. Zostały one ujęte natomiast w tabeli 5.2. Wydaje się zatem, iż pominięcie znacznej liczby intensywnych deszczy występujących w okresie 1960-1990 jest główną przyczyną zaniżenia wyników obliczeń z modelu opadów Bogdanowicz-Stachy dla częstości C = 1 rok, w porównaniu do modeli innych autorów, a także w porównaniu do rzeczywistych opadów występujących w tym okresie we Wrocławiu-Strachowicach. Przykładowo, z tabeli 5.1 (opracowanej wg metody Bogdanowicz-Stachy) dla t = 15 min i C = 1 rok mamy opad o wysokości $h_{15,1}$ = 5,6 mm, stąd otrzymamy natężenie $q_{15,1}$ = 62,2 dm^3/(s·ha), natomiast z tabeli 5.2 (wg własnej metody - z większą liczbą wyselekcjonowanych opadów) dla C = 1 jest już $h_{15,1}$ = 9,8 mm stąd $q_{15,1}$ = 108,9 dm^3/(s·ha). Wynika to stąd, że 31. największy deszcz 15 minutowy - biorąc pod uwagę tylko maksima roczne, jest dopiero w kolejności malejącej 103. deszczem 15 minutowym - biorąc pod uwagę wszystkie intensywne opady, które zdarzyły się w 31 letnim okresie badawczym (tab. 5.2, wiersz 103). Tak więc taki opad ma częstość C = 31/103 = 0,3, czyli występuje przeszło trzy razy częściej. Korzystając ze wzoru-modelu (2.12) Bogdanowicz-Stachy obliczymy dla Wrocławia: $h_{15,1}$ = 3,5 mm stąd $q_{15,1}$ = 38,9 dm^3/(s·ha). Względna różnica wyników wyniesie więc ok. 60% dla danych z tabeli 5.1 (wg metody Bogdanowicz-Stachy) oraz aż 180% (prawie 3-krotna) dla danych z tabeli 5.2 (wg własnej metody).

Podobna sytuacja jest w przypadku deszczy o innych czasach trwania. Przykładowo, 31. największy deszcz 3 godzinny biorąc pod uwagę tylko maksima roczne, jest dopiero 89. deszczem 3 godzinnym biorąc pod uwagę wszystkie intensywne opady syntetyczne, które zdarzyły się w 31-o letnim okresie badawczym (tab. 5.2, wiersz 89). W szczególności więc deszcz syntetyczny o czasie trwania t = 180 min i wysokości opadu $h_{180,1}$ = 12,4 mm (tab. 5.1, ostatni wiersz) czyli o natężeniu jednostkowym $q_{180,1}$ = 11,5 dm^3/(s·ha), jest deszczem o częstości występowania C = 31/89 = 0,35, a więc występuje prawie 3 razy w roku. Właściwy statystycznie opad o częstości C = 1 dla t = 180 min to deszcz o $h_{180,1}$ = 18,8 mm (tab. 5.2, wiersz 31) i $q_{180,1}$ = 17,4 dm^3/(s·ha), a więc o ok. 50% większej wartości h i q. Podobnie jest z największym opadem dobowym z tabeli 5.1, który znajduje się dopiero na 86 miejscu w tabeli 5.2 i w konsekwencji jest opadem nie o częstości występowania C = 1 rok, lecz o częstości C = 31/86 = 0,36, czyli występuje 2,8 razy częściej.

5.1.3. Porównanie ilościowe testowych serii czasowych

Wzajemne różnice jakościowe obu metod interpretacyjnych próby losowej opadów, zastosowanych do tego samego okresu obserwacji opadów (1960-1990) we Wrocławiu-Strachowicach, przekładają się bezpośrednio na znaczne różnice ilościowe wyników badań. Są one m.in. skutkiem, wspomnianego wcześniej, pominięcia części materiału badawczego przy szeregowaniu opadów wg metody Bogdanowicz i Stachy, ale także wskazują na dużą niedokładność samego modelu Bogdanowicz i Stachy – opracowanego dla całego obszaru

Polski (z pominięciem obszarów górskich – rys. 2.1) w odniesieniu do wysokości opadów we Wrocławiu-Strachowicach. Do graficznego zilustrowania powyższych różnic sporządzono rysunek 5.1, na którym przedstawiono: dwa szeregi częstości C=1 rok syntetycznych opadów we Wrocławiu-Strachowicach - wyznaczone dla okresu 1960-1990 obiema metodami, na tle wyników obliczeń z modelu (2.12) Bogdanowicz i Stachy.



Rys. 5.1. Zależność wysokości (h) oraz natężenia (q) opadu od czasu trwania (t) dla częstości C = 1 rok dla Wrocławia-Strachowic (1960-1990): wg własnej interpretacji - kolor czerwony, wg interpretacji Bogdanowicz-Stachy - kolor niebieski i wg modelu (2.12)

Do celów porównawczych, na podstawie wyników szeregowania opadów (podanych w tab. 5.1 i 5.2), wyznaczono wzory na maksymalną wysokość opadów syntetycznych o częstości występowania C = 1 rok postaci $h_{(\max)} = at^{0,33}$ - przyjętej przez Bogdanowicz i Stachy [27]. W przypadku metody Bogdanowicz i Stachy – dla 31 wiersza z tabeli 5.1 (gdyż mamy 31 lat obserwacji i 31 największych rocznych deszczy syntetycznych) wzór empiryczny z regresji metodą najmniejszych kwadratów, przy R = 0,969, przyjmie dla Wrocławia-Strachowic postać:

$$h_{(\max)} = 1{,}854t^{0,33}, \tag{5.1}$$

Dla porównania, model (2.12) Bogdanowicz-Stachy ma postać: $h_{(\max)} = 1{,}42t^{0,33}$ (rys. 5.1). Zatem wartości mnożników przy t w obu wzorach różnią się o 30%. Po przekształceniu (5.1) otrzymamy wzór na natężenie deszczu dla C = 1 rok (postaci przyjętej przez Błaszczyka):

$$q_{(\max)} = \frac{309{,}0}{t^{0,67}} \tag{5.2}$$

Model (2.4) Błaszczyka dla H = 590 mm i C = 1 rok, we Wrocławiu przyjmuje szczegółową postać: $q_{(\max)} = 466{,}5/t^{0,67}$. Różnice wartości liczników w obu wzorach sięgają tutaj 34%. Tak więc, przy zastosowaniu metody Bogdanowicz-Stachy, w przypadku wzoru postaci (5.1) mamy do czynienia z wyższymi wartościami wysokości opadów we Wrocławiu (w okresie 1960-1990), lecz porównując odpowiadające temu natężenia obliczane ze wzoru postaci (5.2) - indywidualnie dla Wrocławia - z zaniżeniem wyników w porównaniu do wzoru Błaszczyka.

W przypadku zastosowania własnej metody interpretacji próby losowej opadów, tj. dla 31-go wiersza z tabeli 5.2, będącego wynikiem uszeregowania wszystkich 348 wyselekcjonowanych intensywnych opadów z okresu 31 lat obserwacji (1960-1990), otrzymamy dla Wrocławia przy R = 0,991:

$$h_{(\max)} = 3{,}470t^{0,33}, \tag{5.3}$$

a stąd, po przekształceniu (5.3), wzór na natężenie deszczu przyjmie postać:

$$q_{(\max)} = \frac{578{,}3}{t^{0{,}67}} \tag{5.4}$$

W tym przypadku, wzory (5.3) i (5.4) wskazują już na znacznie wyższe wartości zarówno wysokości jak i natężenia opadów w porównaniu do wzorów (5.1) i (5.2). Przykładowo, wartość mnożnika (3,47) przy t we wzorze (5.3) różni się aż o 144% w stosunku do wartości „1,42" we wzorze (2.12) Bogdanowicz-Stachy. Model-wzór (2.12) po przekształceniu na q przyjmuje dla C=1, wspomnianą już w pracy, postać (2.19): $q_{(\max)} = 236{,}7/t^{0{,}67}$ (rys. 5.1). Wartość licznika (309) we wzorze (5.2) jest zatem większa o 30%, a we wzorze (5.4) aż o 144%, od wartości 236,7 = 100% ze wzoru (2.12).

Należy zauważyć, że stałe („średnie") dla Polski wartości wykładników potęgowych przy czasie trwania deszczy (t), zarówno w modelach (2.11) i (2.12) Bogdanowicz-Stachy na wysokość opadów (n = 0,33), jak i w modelach (2.3) i (2.4) Błaszczyka na natężenie (n = 0,67), nie muszą być właściwe do opisu opadów we Wrocławiu-Strachowicach. Ogólnie, według pracy [1], wartość tego wykładnika we wzorach na q może się zmieniać w granicach od 0,62 do 0,76. Odpowiada to zmianom wartości n we wzorach na h od 0,38 do 0,24. Poniżej wykazano, iż wyjściowe postacie wzorów (5.1) i (5.3) – ze stałym wykładnikiem potęgowym n = 0,33 przy t, a także wzorów (5.2) i (5.4) – z n = 0,67 przy t, są statystycznie niewłaściwe dla Wrocławia. Lepsze wyniki aproksymacji są do osiągnięcia przy innych wartościach n (ogólnie: $n < 0{,}33$ we wzorach na wysokość opadu lub $n > 0{,}67$ we wzorach na natężenie opadu). Stosując metodologię Bogdanowicz-Stachy otrzymamy wówczas (dla C = 1 - rys. 5.1):

$$h_{(\max)} = 2{,}855t^{0{,}270}, \tag{5.5}$$

przy R = 0,984, a po przekształceniu (5.5) na natężenie deszczu:

$$q_{(\max)} = \frac{475{,}8}{t^{0{,}730}} \tag{5.6}$$

Stosując natomiast własną metodę szeregowania opadów, otrzymano zależność:

$$h_{(\max)} = 4{,}459t^{0{,}295}, \tag{5.7}$$

przy R = 0,995, skąd po przekształceniu na natężenie deszczu otrzymamy (rys. 5.1):

$$q_{(\max)} = \frac{743{,}2}{t^{0{,}705}} \tag{5.8}$$

Wynik analizy dokładności powyższych wzorów empirycznych jest łatwy do przewidzenia. Przykładowo, z uszeregowania syntetycznych deszczy wg metody Bogdanowicz i Stachy dla C = 1 rok i t = 15 min, z pomiarów mamy (tab. 5.1, wiersz 31): $h_{15,1}$ = 5,6 mm, stąd po przeliczeniu otrzymamy $q_{15,1}$ = 62,2 dm^3/(s·ha) = 100%. Ze wzoru (5.2) obliczymy: $q_{15,1}$ = 50,3 dm^3/(s·ha), natomiast ze wzoru (5.6): $q_{15,1}$ = 65,9 dm^3/(s·ha). Błąd względny wyniesie odpowiednio: –19% i +6%. Dla uszeregowanych opadów syntetycznych wg własnej metody (i tych samych parametrów: C = 1 rok i t = 15 min), z

pomiarów mamy (tab. 5.2, wiersz 31): $h_{15,1}$ = 9,8 mm, stąd $q_{15,1}$ = 108,9 dm^3/(s·ha) = 100%, a ze wzoru (5.4) obliczymy: $q_{15,1}$ = 94,2 dm^3/(s·ha), natomiast ze wzoru (5.8): $q_{15,1}$ = 110,1 dm^3/(s·ha). Błąd względny wyniesie odpowiednio: –13,5% i +1,1%. Ze wzoru-modelu (2.11) Bogdanowicz-Stachy otrzymujemy tutaj niewiarygodnie małe wartości: $h_{15,1}$ = 3,5 mm i $q_{15,1}$ = 38,6 dm^3/(s·ha).

5.2. Podstawowy okres badawczy opadów 1960-2009

5.2.1. Serie czasowe o częstości występowania C = 1÷50 lat

Na podstawie wyników weryfikacji obu porównywanych w pracy metod interpretacji próby losowej opadów do analiz statystycznych - odmiennych w założeniach wyjściowych i prowadzących w rezultacie do różnych wyników (co wykazano na przykładzie serii czasowych opadów o częstości C = 1 rok z lat 1960-1990), do opracowania opadów we Wrocławiu-Strachowicach dla podstawowego okresu obserwacji 1960-2009, zastosowano własną metodę szeregowania opadów. Do analizy statystycznej wzięto pod uwagę wszystkie wyselekcjonowane intensywne opady syntetyczne z okresu 50 lat obserwacji, w liczbie 514, przewyższające wartością przyjęte w pracy kryteria przedziałowych wysokości opadów. Uwzględnienie tutaj wszystkich opadów z pięćdziesięciolecia (metodą przeglądu zupełnego, czyli bez kryterium intensywności) wydłużyłoby listę szeregów czasowych analizowanych deszczy do kilku tysięcy, lecz nie zmieniłoby to ich kolejności na pierwszych pięćdziesięciu pozycjach (w tym na 50-tej pozycji - interpretowanej jako C = 1 rok), gdyż opady te okazały się najwyższe. Wyniki szeregowania przedziałowych wysokości opadów syntetycznych dla podstawowego okresu obserwacji 1960-2009 przedstawiono w tabeli 5.3.

Jak już wspomniano, do uszeregowanych już opadów możliwe do zastosowania są dwie odmienne metodologie interpretacji i uogólnień wyników badań. W pierwszej metodologii – fizykalnej, przypisuje się (a priori) uporządkowanym nie rosnąco seriom czasowym opadów o zmierzonych (rzeczywistych) przedziałowych wysokościach wraz z większymi, empiryczną częstość występowania – lecz nie większą niż długość okresu obserwacji opadów. Jednak za wiarygodne, nawet dla okresu kilkudziesięciu lat obserwacji, uznaje się tutaj wyniki uogólnień, w postaci modeli fizykalnych, najczęściej dla częstości C = 1÷10 lat. W drugiej metodologii - probabilistycznej, serie zmierzonych przedziałowych wysokości opadów maksymalnych umożliwiają określenie rozkładu empirycznego i dobranie na tej podstawie parametrów najbardziej wiarygodnego rozkładu teoretycznego, umożliwiającego obliczenie wysokości opadów dla dowolnej wartości prawdopodobieństwa występowania - w praktyce nawet dla C = 100 lat, już dla 30 lat obserwacji opadów. Głównie dla celów poznawczych podane zostaną w pracy wyniki uogólnień obu stosowanych tutaj metodologii.

W tym rozdziale pracy zostanie zastosowany pierwszy - fizykalny sposób interpretacji i uogólnienia wyników badań maksymalnych wysokości opadów we Wrocławiu-Strachowicach dla podstawowego okresu obserwacji (1960-2009).

W tabeli 5.3 uszeregowano malejąco przedziałowe wysokości opadów (o czasach trwania od 5 minut do 72 godzin) z N = 50 lat obserwacji i poddano interpretacji 50 największych serii czasowych deszczy syntetycznych, przypisując im odpowiednie empiryczne częstości występowania: $C(m, N) = (N + 1)/m$, gdzie m - to numer wiersza (m = 1, 2, 3,…, 50,…, 100, …). I tak deszcz syntetyczny w 50-tym wierszu odpowiada częstości występowania C = 1 rok, i odpowiednio: deszcz w 25-tym wierszu odpowiada C = 2 lata, w 10-tym – C = 5 lat, w 5-tym – C = 10 lat, w 2-gim – C = 25 lat oraz w 1-szym – C = 50 lat. Dodatkowo, dla przykładu, podano 100-tny szereg czasowy odpowiadający częstości występowania C = 0,5 roku, czyli występujący dwa razy w roku.

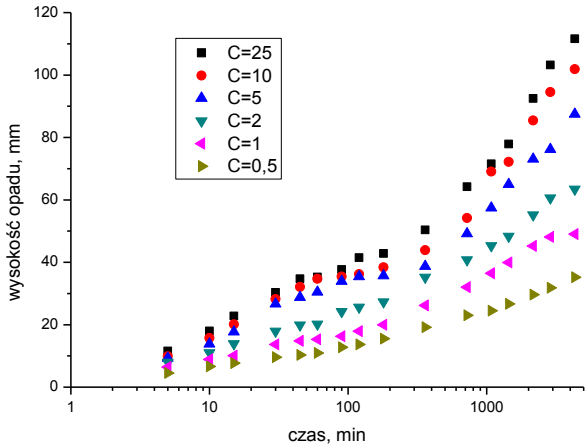
Tabela 5.3

Uszeregowanie największych przedziałowych wysokości opadów (*h*, w mm) z 514 wyselekcjonowanych deszczy syntetycznych z 50 lat obserwacji we Wrocławiu-Strachowicach w latach 1960-2009

Nr	Czas, min															
	5	10	15	30	45	60	90	120	180	360	720	1080	1440	2160	2880	4320
1	**13,1**	**18,7**	**24,7**	**32,9**	**34,7**	**35,3**	**42,7**	**57,7**	**61,9**	**63,1**	**64,2**	**72,9**	**80,1**	**92,6**	**103,9**	**116,9**
2	**11,6**	**18,0**	**22,8**	**30,3**	**34,7**	**35,3**	**37,7**	**41,5**	**42,8**	**50,4**	**64,2**	**71,5**	**77,9**	**92,5**	**103,2**	**111,6**
3	11,4	17,0	20,7	28,6	34,7	35,3	36,5	38,5	41,3	49,0	63,1	71,5	75,2	86,9	101,1	108,5
4	10,4	16,6	20,2	28,4	34,1	34,8	35,8	36,5	40,4	46,0	54,4	69,1	73,4	85,5	96,2	107,9
5	**9,9**	**15,7**	**20,1**	**28,2**	**32,1**	**34,7**	**35,4**	**36,2**	**38,4**	**43,9**	**54,2**	**69,1**	**72,2**	**85,4**	**94,5**	**101,9**
6	9,8	14,6	20,0	28,0	31,9	33,6	35,4	36,1	38,0	42,6	52,9	63,1	72,1	80,8	87,5	100,4
7	9,6	14,5	19,8	28,0	30,2	32,7	35,4	35,7	36,7	42,6	51,5	61,7	68,0	80,3	85,8	97,5
8	9,6	14,3	19,2	28,0	30,2	32,4	34,7	35,4	36,5	41,0	50,0	61,2	67,5	79,4	83,9	90,1
9	9,6	13,8	17,8	27,4	29,0	31,7	34,3	35,4	35,9	40,7	49,7	60,4	66,5	75,3	79,7	90,0
10	**9,3**	**13,8**	**17,7**	**26,7**	**28,8**	**30,5**	**33,9**	**35,4**	**35,7**	**38,7**	**49,2**	**57,4**	**65,0**	**73,1**	**76,2**	**87,5**
11	9,2	13,6	17,0	25,7	28,8	30,3	33,7	34,9	35,4	38,7	48,9	56,8	63,1	70,3	73,4	84,0
12	9,2	13,3	16,7	24,3	28,6	29,7	33,2	34,6	35,4	38,5	48,4	56,8	62,1	69,2	73,1	82,9
13	9,1	12,9	16,6	22,4	27,9	29,4	33,2	33,2	35,4	38,3	46,5	53,9	61,9	65,6	66,7	79,7
14	9,0	12,8	16,5	22,3	26,5	29,2	32,3	33,2	35,2	37,5	46,3	53,5	61,0	65,5	66,5	76,6
15	9,0	12,7	16,3	22,1	26,3	29,1	31,7	33,2	35,1	37,3	46,3	52,8	56,9	65,4	66,4	76,1
16	8,6	12,4	16,3	21,6	25,7	28,8	30,6	32,4	34,9	36,9	45,8	51,5	56,4	62,1	65,6	75,2
17	8,5	12,4	16,3	21,1	24,5	27,5	30,1	31,3	34,4	36,9	44,6	50,9	54,1	62,1	65,1	74,5
18	8,4	12,3	15,8	19,9	24,3	26,9	29,3	30,6	33,2	36,8	44,5	49,2	54,1	59,3	63,0	73,9
19	8,4	12,3	14,6	19,8	23,8	24,6	29,3	30,1	32,8	36,5	43,9	49,1	52,8	58,7	62,1	68,5
20	8,3	12,3	14,6	19,7	22,8	24,6	28,7	29,5	32,4	36,3	41,5	48,9	51,5	57,0	61,1	68,2
21	8,2	11,6	14,4	18,8	22,4	24,5	27,9	29,3	32,1	36,1	41,3	47,1	51,2	57,0	61,1	66,7
22	8,2	11,3	14,0	18,6	21,5	24,0	27,0	28,7	31,6	35,7	41,2	46,0	49,2	56,9	60,8	65,7
23	8,2	11,3	14,0	18,1	20,7	23,5	24,7	26,9	29,8	35,7	40,8	45,3	49,1	56,4	60,8	63,6
24	8,0	11,2	14,0	18,0	20,0	23,3	24,6	26,2	29,3	35,7	40,8	45,3	49,0	55,7	60,8	63,4
25	**8,0**	**11,0**	**13,9**	**17,9**	**19,9**	**20,2**	**24,2**	**25,6**	**27,3**	**35,2**	**40,8**	**45,3**	**48,3**	**55,2**	**60,6**	**63,4**
26	7,9	11,0	13,8	17,7	19,6	19,9	22,3	25,2	27,0	34,9	40,1	45,3	48,3	53,9	60,4	62,7
27	7,9	10,7	13,8	17,5	19,0	19,9	21,0	23,6	26,4	34,8	39,9	45,2	47,8	52,8	59,6	62,1
28	7,8	10,7	13,7	17,1	18,3	19,2	20,8	23,1	26,2	34,7	39,3	45,0	47,4	51,5	59,5	61,2
29	7,8	10,6	13,4	16,4	17,7	18,7	20,0	22,2	25,6	34,4	39,0	44,7	47,1	51,2	59,3	60,6
30	7,8	10,6	13,2	16,4	17,7	18,5	19,9	21,4	25,6	33,9	38,7	44,4	47,1	51,0	58,7	60,4
31	7,7	10,6	13,0	16,4	17,2	17,8	19,9	21,1	25,0	33,2	38,0	44,1	47,1	50,9	58,5	60,1
32	7,6	10,5	13,0	15,7	17,0	17,7	19,6	20,9	25,0	33,0	37,6	43,9	46,0	50,7	56,5	60,0
33	7,4	10,4	12,7	15,6	16,8	17,5	19,3	20,3	24,9	32,8	37,5	42,7	45,8	50,4	56,4	59,8
34	7,2	10,2	12,6	15,6	16,8	17,3	19,2	20,3	24,9	32,4	37,5	41,2	45,3	50,1	56,3	59,4
35	7,0	10,2	12,6	15,3	16,5	17,0	18,8	19,9	24,2	32,2	37,5	41,2	45,2	49,5	55,5	59,3
36	7,0	10,2	12,4	15,2	16,5	16,9	18,1	19,9	23,4	30,8	36,5	41,0	45,2	48,1	52,8	59,3
37	6,9	10,1	12,2	15,2	16,3	16,8	17,7	19,6	23,0	30,5	36,1	40,6	44,9	48,0	51,6	58,5
38	6,9	10,0	11,9	15,1	16,1	16,6	17,6	19,6	22,6	30,4	35,6	40,3	44,4	47,3	51,5	57,9
39	6,8	10,0	11,8	15,1	16,0	16,6	17,2	19,4	22,1	29,5	35,2	39,6	43,5	47,2	51,1	57,0
40	6,8	9,8	11,6	15,0	15,8	16,1	17,2	19,4	22,0	29,3	35,2	39,3	43,4	47,2	51,0	55,9
41	6,8	9,7	11,4	14,7	15,8	16,0	17,1	19,3	22,0	29,3	35,1	39,3	42,3	47,2	50,5	55,7
42	6,7	9,6	11,4	14,7	15,7	16,0	17,0	19,0	21,9	28,5	35,0	39,3	42,1	47,2	49,5	51,8
43	6,7	9,4	11,2	14,5	15,6	15,9	17,0	18,9	21,7	28,5	34,9	39,3	41,8	47,2	49,0	51,4
44	6,7	9,4	11,1	14,5	15,6	15,9	16,9	18,8	21,5	28,0	34,6	39,0	41,7	47,1	48,9	51,1
45	6,7	9,2	11,1	14,3	15,2	15,9	16,8	18,8	21,5	27,9	34,5	38,8	41,0	46,6	48,6	50,5
46	6,7	9,2	10,6	14,2	15,1	15,7	16,8	18,7	21,1	27,9	33,9	38,7	40,4	46,4	48,6	50,0
47	6,6	9,1	10,5	14,0	15,1	15,6	16,7	18,6	20,4	27,8	32,9	38,0	40,3	45,8	48,1	50,0

48	6,6	9,1	10,3	13,9	15,0	15,5	16,6	17,9	20,3	27,0	32,8	37,9	40,2	45,8	48,1	49,7
49	6,5	8,9	10,3	13,8	14,9	15,4	16,4	17,9	20,2	26,3	32,5	37,5	40,1	45,3	48,1	49,5
50	**6,4**	**8,9**	**10,1**	**13,7**	**14,8**	**15,3**	**16,3**	**17,9**	**20,0**	**26,2**	**32,0**	**36,5**	**39,9**	**45,2**	**48,1**	**49,0**
100	**4,5**	**6,6**	**7,7**	**9,6**	**10,3**	**10,9**	**12,8**	**13,7**	**15,5**	**19,2**	**23,0**	**24,5**	**26,7**	**29,6**	**31,8**	**35,2**

Na rysunku 5.2 zobrazowano trendy zmian zmierzonych przedziałowych wysokości opadów w czasie (DDF) dla serii czasowych opadów syntetycznych o częstości występowania C = 0,5, 1, 2, 5, 10 i 25 lat. Z rysunku wynika, że przykładowe zależności $h(t, C)$ stanowią rodzinę krzywych o ogólnym równaniu $h(t, C)=at^n$.



Rys. 5.2. Trendy zmian przedziałowych wysokości opadów (h) w czasie (t) dla serii czasowych (typu DDF) o częstości C = 0,5, 1, 2, 5, 10 i 25 lat (logarytmiczna skala czasu)

W tabeli 5.4 przedstawiono przeliczone przedziałowe wysokości opadów (z tab. 5.3) na natężenia jednostkowe q, w $dm^3/(s \cdot ha)$. Podobnie jak w tabeli 5.3, przedziałowe natężenia syntetycznego deszczu w 50-tym wierszu odpowiadają częstości występowania C = 1 rok, i analogicznie: natężenia deszczu w 25-tym wierszu odpowiadają C = 2 lata, w 10-tym – C = 5 lat i w 5-tym – C = 10 lat, itd. Dodatkowo w tabeli podano 100-ny szereg czasowy, odpowiadający częstości występowania deszczu C = 0,5, tj. dwa razy w roku.

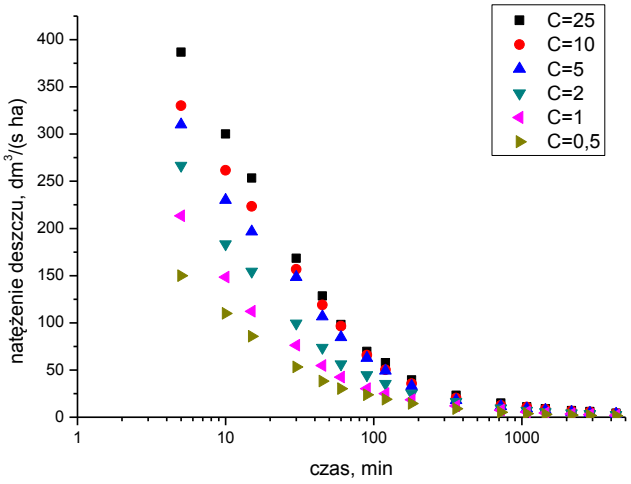
Tabela 5.4.

Uszeregowanie największych przedziałowych natężeń jednostkowych q (w $dm^3/(s \cdot ha)$) z 514 deszczy syntetycznych z 50 lat obserwacji we Wrocławiu w latach 1960-2009 (wyselekcjonowanych wg własnej metody)

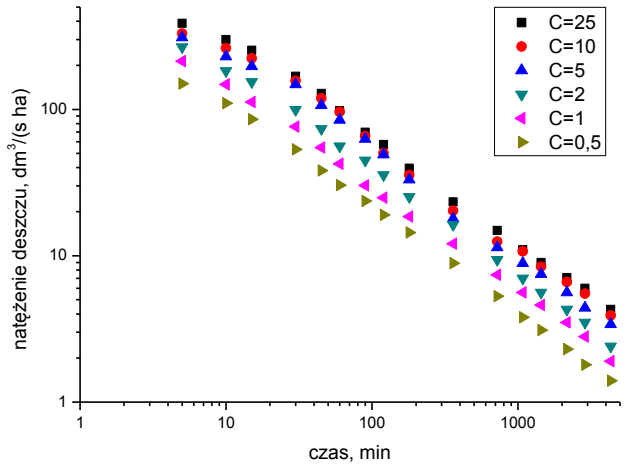
Nr	**Czas, min**															
	5	**10**	**15**	**30**	**45**	**60**	**90**	**120**	**180**	**360**	**720**	**1080**	**1440**	**2160**	**2880**	**4320**
1	**436,7**	**311,7**	**274,4**	**182,8**	**128,5**	**98,1**	**79,1**	**80,1**	**57,3**	**29,2**	**14,9**	**11,3**	**9,3**	**7,1**	**6,0**	**4,5**
2	**386,7**	**300,0**	**253,3**	**168,3**	**128,5**	**98,1**	**69,8**	**57,6**	**39,6**	**23,3**	**14,9**	**11,0**	**9,0**	**7,1**	**6,0**	**4,3**
3	380,0	283,3	230,0	158,9	128,5	98,1	67,6	53,5	38,2	22,7	14,6	11,0	8,7	6,7	5,9	4,2
4	346,7	276,7	224,4	157,8	126,3	96,7	66,3	50,7	37,4	21,3	12,6	10,7	8,5	6,6	5,6	4,2
5	**330,0**	**261,7**	**223,3**	**156,7**	**118,9**	**96,4**	**65,6**	**50,3**	**35,6**	**20,3**	**12,5**	**10,7**	**8,4**	**6,6**	**5,5**	**3,9**
6	326,7	243,3	222,2	155,6	118,1	93,3	65,6	50,1	35,2	19,7	12,2	9,7	8,3	6,2	5,1	3,9
7	320,0	241,7	220,0	155,6	111,9	90,8	65,6	49,6	34,0	19,7	11,9	9,5	7,9	6,2	5,0	3,8
8	320,0	238,3	213,3	155,6	111,9	90,0	64,3	49,2	33,8	19,0	11,6	9,4	7,8	6,1	4,9	3,5
9	320,0	230,0	197,8	152,2	107,4	88,1	63,5	49,2	33,2	18,8	11,5	9,3	7,7	5,8	4,6	3,5
10	**310,0**	**230,0**	**196,7**	**148,3**	**106,7**	**84,7**	**62,8**	**49,2**	**33,1**	**17,9**	**11,4**	**8,9**	**7,5**	**5,6**	**4,4**	**3,4**
11	306,7	226,7	188,9	142,8	106,7	84,2	62,4	48,5	32,8	17,9	11,3	8,8	7,3	5,4	4,2	3,2
12	306,7	221,7	185,6	135,0	105,9	82,5	61,5	48,1	32,8	17,8	11,2	8,8	7,2	5,3	4,2	3,2

13	303,3	215,0	184,4	124,4	103,3	81,7	61,5	46,1	32,8	17,7	10,8	8,3	7,2	5,1	3,9	3,1
14	300,0	213,3	183,3	123,9	98,1	81,1	59,8	46,1	32,6	17,4	10,7	8,3	7,1	5,1	3,8	3,0
15	300,0	211,7	181,1	122,8	97,4	80,8	58,7	46,1	32,5	17,3	10,7	8,1	6,6	5,0	3,8	2,9
16	286,7	206,7	181,1	120,0	95,2	80,0	56,7	45,0	32,3	17,1	10,6	7,9	6,5	4,8	3,8	2,9
17	283,3	206,7	181,1	117,2	90,7	76,4	55,7	43,5	31,9	17,1	10,3	7,9	6,3	4,8	3,8	2,9
18	280,0	205,0	175,6	110,6	90,0	74,7	54,3	42,5	30,7	17,0	10,3	7,6	6,3	4,6	3,6	2,9
19	280,0	205,0	162,2	110,0	88,1	68,3	54,3	41,8	30,4	16,9	10,2	7,6	6,1	4,5	3,6	2,6
20	276,7	205,0	162,2	109,4	84,4	68,3	53,1	41,0	30,0	16,8	9,6	7,5	6,0	4,4	3,5	2,6
21	273,3	193,3	160,0	104,4	83,0	68,1	51,7	40,7	29,7	16,7	9,6	7,3	5,9	4,4	3,5	2,6
22	273,3	188,3	155,6	103,3	79,6	66,7	50,0	39,9	29,3	16,5	9,5	7,1	5,7	4,4	3,5	2,5
23	273,3	188,3	155,6	100,6	76,7	65,3	45,7	37,4	27,6	16,5	9,4	7,0	5,7	4,4	3,5	2,5
24	266,7	186,7	155,6	100,0	74,1	64,7	45,6	36,4	27,1	16,5	9,4	7,0	5,7	4,3	3,5	2,4
25	**266,7**	**183,3**	**154,4**	**99,4**	**73,7**	**56,1**	**44,8**	**35,6**	**25,3**	**16,3**	**9,4**	**7,0**	**5,6**	**4,3**	**3,5**	**2,4**
26	263,3	183,3	153,3	98,3	72,6	55,3	41,3	35,0	25,0	16,2	9,3	7,0	5,6	4,2	3,5	2,4
27	263,3	178,3	153,3	97,2	70,4	55,3	38,9	32,8	24,4	16,1	9,2	7,0	5,5	4,1	3,4	2,4
28	260,0	178,3	152,2	95,0	67,8	53,3	38,5	32,1	24,3	16,1	9,1	6,9	5,5	4,0	3,4	2,4
29	260,0	176,7	148,9	91,1	65,6	51,9	37,0	30,8	23,7	15,9	9,0	6,9	5,5	4,0	3,4	2,3
30	260,0	176,7	146,7	91,1	65,6	51,4	36,9	29,7	23,7	15,7	9,0	6,9	5,5	3,9	3,4	2,3
31	256,7	176,7	144,4	91,1	63,7	49,4	36,9	29,3	23,1	15,4	8,8	6,8	5,5	3,9	3,4	2,3
32	253,3	175,0	144,4	87,2	63,0	49,2	36,3	29,0	23,1	15,3	8,7	6,8	5,3	3,9	3,3	2,3
33	246,7	173,3	141,1	86,7	62,2	48,6	35,7	28,2	23,1	15,2	8,7	6,6	5,3	3,9	3,3	2,3
34	240,0	170,0	140,0	86,7	62,2	48,1	35,6	28,2	23,1	15,0	8,7	6,4	5,2	3,9	3,3	2,3
35	233,3	170,0	140,0	85,0	61,1	47,2	34,8	27,6	22,4	14,9	8,7	6,4	5,2	3,8	3,2	2,3
36	233,3	170,0	137,8	84,4	61,1	46,9	33,5	27,6	21,7	14,3	8,4	6,3	5,2	3,7	3,1	2,3
37	230,0	168,3	135,6	84,4	60,4	46,7	32,8	27,2	21,3	14,1	8,4	6,3	5,2	3,7	3,0	2,3
38	230,0	166,7	132,2	83,9	59,6	46,1	32,6	27,2	20,9	14,1	8,2	6,2	5,1	3,6	3,0	2,2
39	226,7	166,7	131,1	83,9	59,3	46,1	31,9	26,9	20,5	13,7	8,1	6,1	5,0	3,6	3,0	2,2
40	226,7	163,3	128,9	83,3	58,5	44,7	31,9	26,9	20,4	13,6	8,1	6,1	5,0	3,6	3,0	2,2
41	226,7	161,7	126,7	81,7	58,5	44,4	31,7	26,8	20,4	13,6	8,1	6,1	4,9	3,6	2,9	2,1
42	223,3	160,0	126,7	81,7	58,1	44,4	31,5	26,4	20,3	13,2	8,1	6,1	4,9	3,6	2,9	2,0
43	223,3	156,7	124,4	80,6	57,8	44,2	31,5	26,3	20,1	13,2	8,1	6,1	4,8	3,6	2,8	2,0
44	223,3	156,7	123,3	80,6	57,8	44,2	31,3	26,1	19,9	13,0	8,0	6,0	4,8	3,6	2,8	2,0
45	223,3	153,3	123,3	79,4	56,3	44,2	31,1	26,1	19,9	12,9	8,0	6,0	4,7	3,6	2,8	1,9
46	223,3	153,3	117,8	78,9	55,9	43,6	31,1	26,0	19,5	12,9	7,8	6,0	4,7	3,6	2,8	1,9
47	220,0	151,7	116,7	77,8	55,9	43,3	30,9	25,8	18,9	12,9	7,6	5,9	4,7	3,5	2,8	1,9
48	220,0	151,7	114,4	77,2	55,6	43,1	30,7	24,9	18,8	12,5	7,6	5,8	4,7	3,5	2,8	1,9
49	216,7	148,3	114,4	76,7	55,2	42,8	30,4	24,9	18,7	12,2	7,5	5,8	4,6	3,5	2,8	1,9
50	**213,3**	**148,3**	**112,2**	**76,1**	**54,8**	**42,5**	**30,2**	**24,9**	**18,5**	**12,1**	**7,4**	**5,6**	**4,6**	**3,5**	**2,8**	**1,9**
100	**150,0**	**110,0**	**85,6**	**53,3**	**38,2**	**30,3**	**23,7**	**19,0**	**14,4**	**8,9**	**5,3**	**3,8**	**3,1**	**2,3**	**1,8**	**1,4**

Na rysunkach 5.3 i 5.4 zobrazowano trendy zmian przedziałowych jednostkowych natężeń opadów (uzyskanych z przeliczenia wysokości opadów z tab. 5.3) dla serii czasowych syntetycznych deszczy o częstości występowania C = 0,5, 1, 2, 5, 10 i 25 lat.



Rys. 5.3. Trendy zmian jednostkowych natężeń (q) deszczy w czasie (t) dla syntetycznych opadów o częstości występowania C = 0,5, 1, 2, 5, 10 i 25 lat (w układzie pół logarytmicznym)



Rys. 5.4. Trendy zmian jednostkowych natężeń (q) deszczy w czasie (t) dla syntetycznych opadów o częstości występowania C = 0,5, 1, 2, 5, 10 i 25 lat (w układzie podwójnie logarytmicznym)

Z rysunków 5.3 i 5.4 wynika, że zmierzone zależności $q(t, C)$ stanowią rodzinę krzywych (typu IDF) o ogólnym równaniu $q(t, C) = 166{,}7at^{n-1}$. Świadczy o tym zwłaszcza równoległość linii $q(t)$ dla C = 0,5, 1, 2, 5, 10 i 25 lat na rysunku 5.4. Szerzej ujmując, zarówno z uszeregowania największych przedziałowych wysokości opadów (w tab. 5.3 - rys. 5.2), jak i z uszeregowania największych przedziałowych natężeń opadów (w tab. 5.4 - rys. 5.3 i 5.4) wynika, że zależności $h(t)$ i $q(t)$ dla przykładowych częstości-powtarzalności opadów C = 0,5, 1, 2, 5, 10 i 25 lat stanowią rodziny krzywych (odpowiednio typu DDF bądź IDF).

5.2.2. Modele fizykalne opadów maksymalnych

5.2.2.1. Adaptacja modeli literaturowych

Jak wykazano w rozdziale 5.1 pracy, wyjściowe postacie wzorów (2.12), (5.1) i (5.3) na wysokość opadów - ze stałym wykładnikiem potęgowym n = 0,33 przy t, czy też wzorów (2.4), (5.2) i (5.4) na jednostkowe natężenie deszczy - ze stałym wykładnikiem potęgowym

n = –0,67 przy t, są niewłaściwe do opisu opadów maksymalnych we Wrocławiu-Strachowicach, co udowodniono dla częstości C = 1 rok. W celu sformułowania modelu fizykalnego na maksymalną wysokość opadów (dla różnych częstości występowania) w okresie 1960-2009, przyjęto wstępnie dwuparametrowe równanie wyjściowe na badaną rodzinę zależności h od t i C, postaci:

$$h_{\max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}, \tag{5.9}$$

zwanej w literaturze modelem Lindley'a, dla której należy ustalić z pomiarów wartości współczynników a i n w funkcji C. Na tej podstawie, dla każdego z 50-ciu wierszy w tabeli 5.3 - o przyporządkowanej malejącej częstości serii czasowych opadów od C = 50 do C = 1 wyestymowano wartości współczynników a i n (metodą najmniejszych kwadratów). Ponadto uwzględniono dodatkowo 50 kolejnych wierszy, aż do 100-ego – tj. dla C = 0,5. Wyniki tych obliczeń zamieszczono w tabeli 5.5.

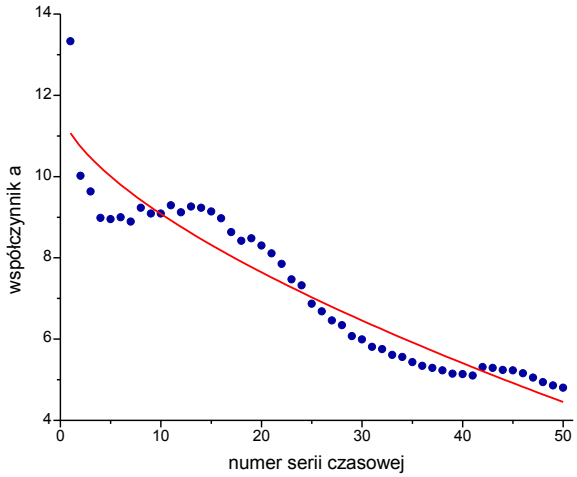
Tabela 5.5.

Wyniki estymacji wartości współczynników a i n równania $h_{max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 100 serii czasowych o C = 50÷0,5

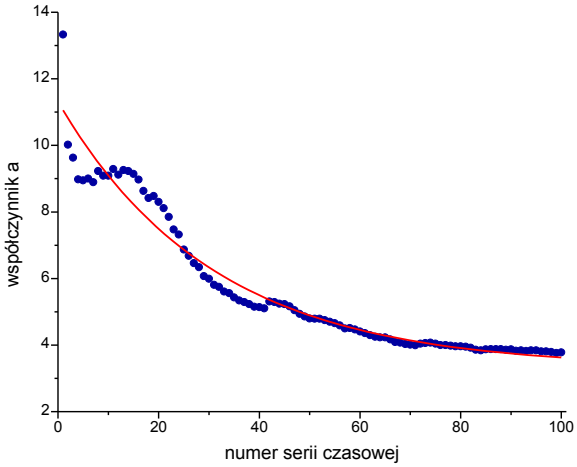
Nr	*C*	*a*	*n*	Nr	*C*	*a*	*n*
1	**50,000**	**13,33**	**0,255**	**51**	0,980	4,79	0,286
2	**25,000**	**10,02**	**0,288**	**52**	0,962	4,79	0,284
3	16,670	9,63	0,289	**53**	0,943	4,75	0,284
4	12,500	8,98	0,294	**54**	0,926	4,70	0,285
5	**10,000**	**8,95**	**0,291**	**55**	0,909	4,66	0,286
6	8,330	9,00	0,285	**56**	0,893	4,59	0,287
7	7,140	8,89	0,283	**57**	0,877	4,50	0,289
8	6,250	9,23	0,274	**58**	0,862	4,51	0,287
9	5,560	9,09	0,273	**59**	0,847	4,47	0,287
10	**5,000**	**9,09**	**0,268**	**60**	0,833	4,41	0,289
11	4,550	9,29	0,261	**61**	0,820	4,36	0,289
12	4,170	9,12	0,262	**62**	0,806	4,30	0,290
13	3,850	9,26	0,254	**63**	0,794	4,25	0,291
14	3,570	9,23	0,253	**64**	0,781	4,23	0,290
15	3,330	9,14	0,252	**65**	0,769	4,23	0,289
16	3,130	8,97	0,252	**66**	0,758	4,17	0,290
17	2,940	8,63	0,256	**67**	0,746	4,09	0,292
18	2,780	8,42	0,256	**68**	0,735	4,07	0,291
19	2,630	8,48	0,251	**69**	0,725	4,03	0,291
20	2,500	8,30	0,252	**70**	0,714	4,01	0,291
21	2,380	8,11	0,253	**71**	0,704	3,99	0,290
22	2,270	7,85	0,256	**72**	0,694	4,04	0,286
23	2,170	7,47	0,260	**73**	0,685	4,06	0,285
24	2,080	7,32	0,262	**74**	0,676	4,07	0,284
25	**2,000**	**6,87**	**0,270**	**75**	0,667	4,04	0,284
26	1,920	6,68	0,272	**76**	0,658	4,00	0,284
27	1,850	6,46	0,275	**77**	0,649	4,00	0,283
28	1,790	6,34	0,276	**78**	0,641	3,98	0,281
29	1,720	6,07	0,281	**79**	0,633	3,96	0,282
30	1,670	5,99	0,282	**80**	0,625	3,96	0,281
31	1,610	5,81	0,285	**81**	0,617	3,95	0,280
32	1,560	5,75	0,284	**82**	0,610	3,92	0,281
33	1,520	5,61	0,287	**83**	0,602	3,86	0,282
34	1,470	5,56	0,287	**84**	0,595	3,84	0,282
35	1,430	5,43	0,289	**85**	0,588	3,87	0,279
36	1,390	5,34	0,289	**86**	0,581	3,88	0,277
37	1,350	5,29	0,289	**87**	0,575	3,88	0,277
38	1,320	5,23	0,289	**88**	0,568	3,88	0,276
39	1,280	5,15	0,289	**89**	0,562	3,86	0,276
40	1,250	5,14	0,288	**90**	0,556	3,87	0,274

41	1,220	5,10	0,288	**91**	0,549	3,83	0,275
42	1,190	5,31	0,280	**92**	0,543	3,84	0,273
43	1,160	5,29	0,280	**93**	0,538	3,82	0,273
44	1,140	5,24	0,280	**94**	0,532	3,84	0,271
45	1,110	5,23	0,279	**95**	0,526	3,84	0,270
46	1,090	5,16	0,280	**96**	0,521	3,81	0,271
47	1,060	5,05	0,282	**97**	0,515	3,81	0,270
48	1,040	4,94	0,284	**98**	0,510	3,79	0,270
49	1,020	4,86	0,286	**99**	0,505	3,76	0,270
50	**1,000**	**4,80**	**0,286**	**100**	**0,500**	**3,78**	**0,268**

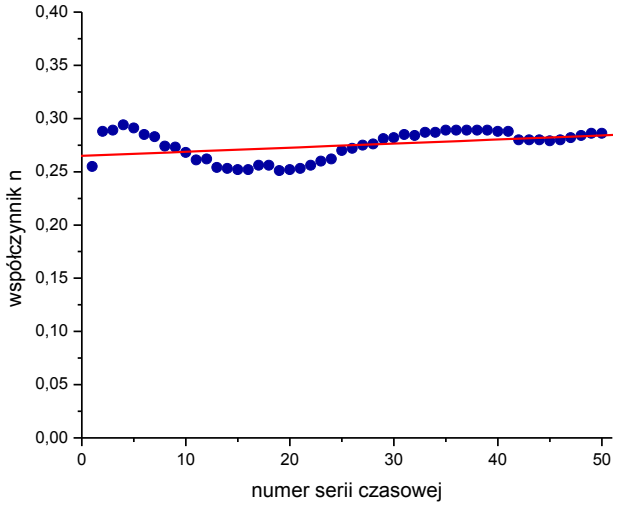
Dla danych z tabeli 5.5 opracowano graficzną ilustrację trendów zmian wartości badanych współczynników a(C) i n(C) zależności (5.9), które przedstawiono kolejno na rysunkach 5.5÷5.8, odpowiednio dla 50-ciu największych i łącznie dla 100-u analizowanych serii czasowych deszczy syntetycznych.



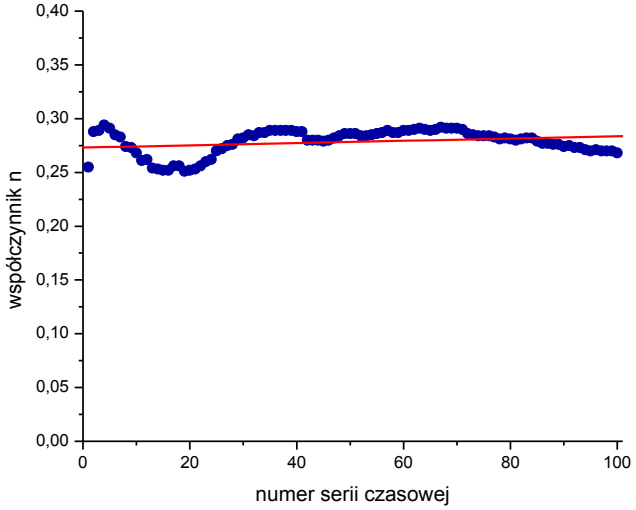
Rys. 5.5. Trend zmian wartości współczynnika a w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 50-ciu największych opadów syntetycznych o częstości występowania od $C = 50$ do $C = 1$



Rys. 5.6. Trend zmian wartości współczynnika a w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 100 opadów syntetycznych o częstości występowania od $C = 50$ do $C = 0,5$



Rys. 5.7. Trend zmian wartości współczynnika n w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 50-ciu największych opadów syntetycznych o częstości występowania od $C = 50$ do $C = 1$



Rys. 5.8. Trend zmian wartości współczynnika n w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 100 opadów syntetycznych o częstości występowania od $C = 50$ do $C = 0,5$

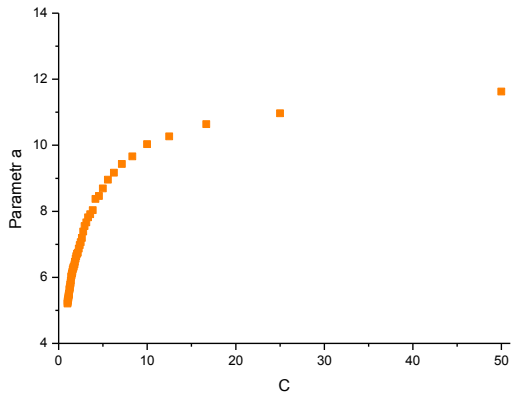
Za miarodajne do uogólnień wyników analiz uznano trendy badanych zależności $a(C)$ i $n(C)$ w równaniu (5.9) postaci $h(t, C) = a(C)t^{n(C)}$, określone dla 100 szeregów częstości od $C = 50$ do $C = 0,5$ (z 50 lat obserwacji opadów – tab. 5.5). Współczynnik $a(C)$ ma wyraźnie krzywoliniowy-wykładniczy trend zmian badanej zależności, zarówno dla 50-ciu szeregów (rys. 5.5), jak i dla 100-u szeregów częstości występowania opadów syntetycznych (rys. 5.6). Współczynnik $n(C)$ nie ma natomiast wyraźnego trendu zmian badanej zależności - zarówno dla 50-ciu szeregów (rys. 5.7), a zwłaszcza dla 100-u szeregów (rys. 5.8). Średnia wartość wykładnika n w równaniu (5.9) dla 100 deszczy syntetycznych (o częstości od $C = 50$ do $C = 0,5$) wynosi $n = 0,2784$ (zmiany od 0,251 do 0,294), a dla 50 największych deszczy syntetycznych (od $C = 50$ do $C = 1$) wynosi natomiast $n = 0,2747$. Średnie te są niemal identyczne. Tę drugą średnią przyjęto jako stałą wartość wykładnika potęgowego $n = 0,275$ w równaniu wyjściowym (5.9), które przyjmuje teraz postać:

$$h_{\max}(t, C) = a(C)t^{0,275} \tag{5.10}$$

Dla wstępnie uszczegółowionej postaci (5.10) równania wyjściowego (5.9) wyznaczono nowe wartości parametru - współczynnika $a(C)$. Wyniki obliczeń, przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów, zamieszczono w tabeli 5.6 i przedstawiono graficznie na rys. 5.9.

Tabela 5.6.
Wyestymowane nowe wartości współczynnika $a(C)$
przy ustalonym n = 0,275 dla C = 50÷1

Nr	*C*	*a*	Nr	*C*	*a*
1	**50,000**	**11,627**	**26**	1,920	6,562
2	**25,000**	**10,969**	**27**	1,850	6,472
3	16,670	10,637	**28**	1,790	6,394
4	12,500	10,268	**29**	1,720	6,328
5	**10,000**	**10,030**	**30**	1,670	6,288
6	8,330	9,660	**31**	1,610	6,240
7	7,140	9,430	**32**	1,560	6,162
8	6,250	9,165	**33**	1,520	6,115
9	5,560	8,953	**34**	1,470	6,063
10	**5,000**	**8,691**	**35**	1,430	6,015
11	4,550	8,462	**36**	1,390	5,899
12	4,170	8,371	**37**	1,350	5,828
13	3,850	8,030	**38**	1,320	5,775
14	3,570	7,912	**39**	1,280	5,700
15	3,330	7,815	**40**	1,250	5,660
16	3,130	7,664	**41**	1,220	5,624
17	2,940	7,548	**42**	1,190	5,509
18	2,780	7,389	**43**	1,160	5,479
19	2,630	7,190	**44**	1,140	5,451
20	2,500	7,063	**45**	1,110	5,405
21	2,380	6,977	**46**	1,090	5,364
22	2,270	6,871	**47**	1,060	5,310
23	2,170	6,747	**48**	1,040	5,282
24	2,080	6,713	**49**	1,020	5,246
25	**2,000**	**6,639**	**50**	**1,000**	**5,205**



Rys. 5.9. Zależność współczynnika $a(C)$ w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50 quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów (C = 1 ÷ C = 50)

W pierwszej próbie do opisu zależności $a(C)$ (przedstawionej na rys. 5.9) wykorzystano model Błaszczyka (2.3), sprowadzony do postaci:

$$h_{\max}(t, C) = a_1 \sqrt[3]{C} t^{0,33}, \tag{5.11}$$

gdzie

$$a(C) = a_1 C^{0,333}, \tag{5.12}$$

i ogólnie dla dowolnej wartości wykładnika m_i

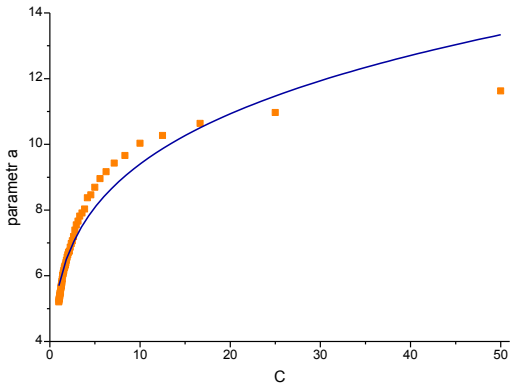
$$a(C) = a_1 C^{m_1} \tag{5.13}$$

Dla danych z tabeli 5.6 uszczegółowiono postać (5.13) przy R = 0,965 (rys. 5.10)

$$a(C) = 5{,}698 \ C^{0,217}, \tag{5.14}$$

skąd uzyskano I model fizykalny postaci:

$$h_{\max}(t, C) = 5{,}698 C^{0,217} t^{0,275} \tag{5.15}$$



Rys. 5.10. Próba dopasowania funkcji $a(C) = 5{,}698C^{0,217}$ w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50-ciu quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów (C = 1 ÷ C = 50)

Jak wynika z rysunku 5.10, przyjęte na wstępie i uszczegółowione równanie (5.13) nie jest odpowiednie do opisu badanej zależności $a(C)$ w warunkach wrocławskich.

W drugiej próbie do opisu zależności $a(C)$ wykorzystano postać wzoru (2.21) na wysokość opadów maksymalnych, zaczerpniętą z Atlasu hydrologicznego Polski z 1986 r. [29]:

$$h_{\max}(t, p) = \{a_1 - a_2 [-\ln(-\ln(1-p))]\} t^{-n} \tag{5.16}$$

skąd otrzymano

$$a(p) = a_1 - a_2[-\ln(-\ln(1-p))], \tag{5.17}$$

a po przekształceniu względem C

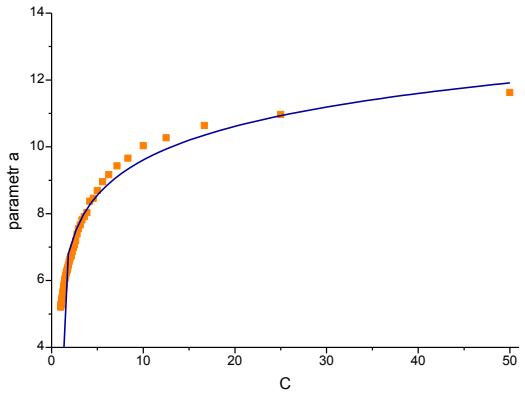
$$a(C) = a_1 - a_2[-\ln(-\ln(1-1/C))] \tag{5.18}$$

Dla postaci (5.18) i danych z tabeli 5.6 otrzymano przy R = 0,984 równanie (rys. 5.11):

$$a(C) = 6{,}417 + 1{,}396\,[-\ln(-\ln(1-1/C))] \quad , \tag{5.19}$$

skąd uzyskano II model fizykalny (przy ograniczeniu $C > 1$) postaci:

$$h_{\max}(t,C) = \{6{,}417 + 1{,}396[-\ln(-\ln(1-1/C))]\}\, t^{0{,}275} \tag{5.20}$$



Rys. 5.11. Próba dopasowania funkcji $a(C)$ = 6,417-1,396[-ln(-ln(1-1/C))] w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50-ciu quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div C = 50$)

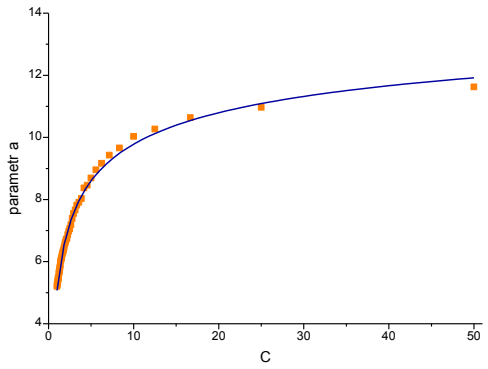
5.2.2.2. Własne modele fizykalne opadów maksymalnych

Próby opisu zależności $a(C)$ oparte na modelach literaturowych nie przyniosły zadowalających rezultatów. Zaproponowano zatem własną postać ogólną poszukiwanego równania:

$$a(C) = a_1 C^{m_2} + a_2 \tag{5.21}$$

W wyniku estymacji parametrów dla danych z tabeli 5.6 uzyskano dla III modelu fizykalnego funkcję

$$a(C) = -11{,}928\, C^{-0{,}218} + 17{,}0 \tag{5.22}$$



Rys. 5.12. Próba dopasowania funkcji $a(C)$ = -11,93$C^{-0,218}$+17,0 w równaniu $h_{max}(t,C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50-ciu quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div C = 50$)

Wzór (5.22), uzyskany przy R = 0,998, najlepiej z dotychczasowych przybliża charakter badanej zależności $a(C)$ (rys. 5.12). Zatem III model fizykalny na maksymalną wysokość opadów we Wrocławiu-Strachowicach przyjmuje postać:

$$h_{\max}(t,C) = a(C)\ t^{0,275} = \left(-11{,}928\ C^{-0,218} + 17{,}0\right) t^{0,275} \tag{5.23}$$

a po przekształceniach :

$$q_{\max}(t,C) = \frac{166{,}67\ h(t,C)}{t} = \left(-1988\ C^{-0,218} + 2834\right) t^{-0,725} \tag{5.24}$$

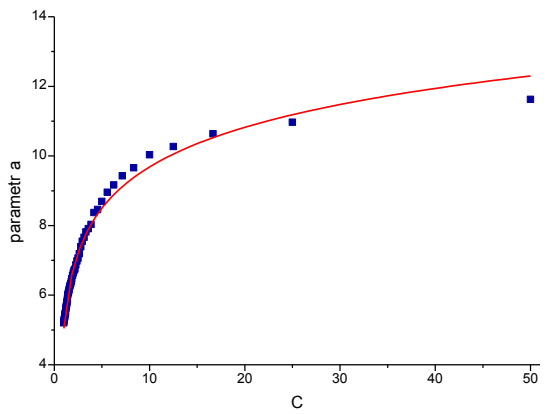
W czwartej próbie sprawdzono przydatność innej niż przyjęta na wstępie tego podrozdziału - wyjściowa dwuparametrowa postać modelu (5.9) opadów maksymalnych we Wrocławiu. Mianowicie zaproponowano trójparametrowy model (IV) postaci:

$$h_{\max}(t,C) = a(C)(t - b(C))^{n(C)}, \tag{5.25}$$

dla której wyznaczono parametry a, b i n w sposób analogiczny jak we wcześniej opisanych próbach. Dla IV modelu fizykalnego przyjęto również (jak w poprzednich) stałą wartość wykładnika potęgowego n(C). Mianowicie, dla postaci (5.25) ustalono n = 0,265, oraz stałą wartość współczynnika b = 3,45, stąd ostatecznie uzyskano model postaci:

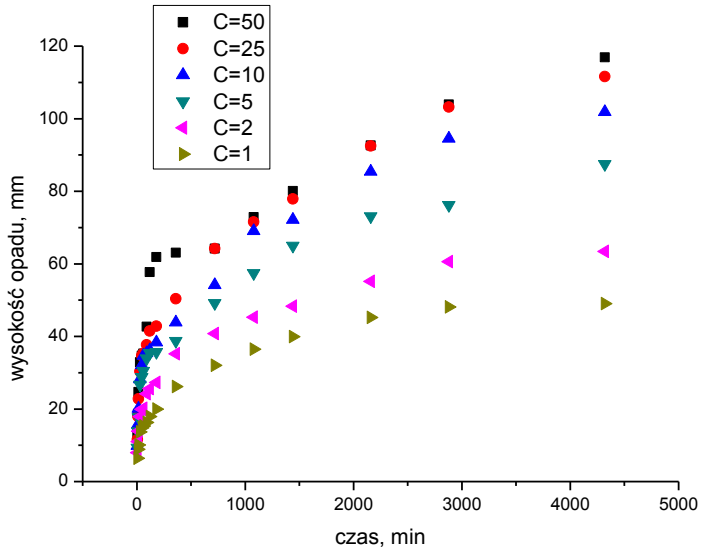
$$h_{\max}(t,C) = \left(6{,}670 + 1{,}677\ln(C - 0{,}530)\right)(t - 3{,}45)^{0,265} \tag{5.26}$$

Wynik czwartej próby, dopasowania funkcji $a(C)$ = 6,670+1,677ln(C - 0,530) przy R = 0.995 - tutaj do równania wyjściowego postaci (5.25), nie zwiększył jednak ogólnej dokładności statystycznej modelu (rys. 5.13) względem poprzedniego – III modelu, gdzie dla $a(C)$ uzyskano R = 0,998 i w rezultacie też znacznie dokładniejsze opisanie zwłaszcza szeregu o częstości C = 50 lat (porównaj rys. 5.12 i 5.13). Jednak IV model fizykalny okazał się dokładniejszy w opisie również dwóch pierwszych interwałów (5 i 10 minut) czasu trwania opadów, co zostanie wykazane w p. 5.2.3 pracy.

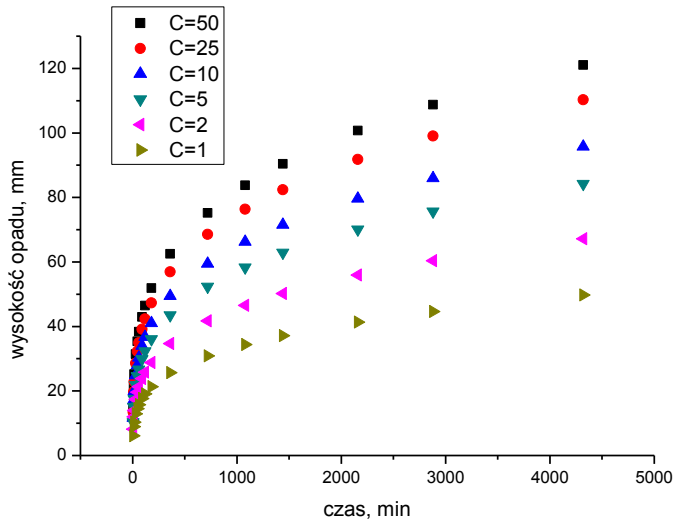


Rys. 5.13. Próba dopasowania funkcji $a(C)$ = 6,670+1,677ln(C - 0,530) w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)(t - 3{,}45)^{0,265}$ dla 50 quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów (C = 1 ÷ C = 50)

Na rysunkach 5.14 i 5.15 przedstawiono odpowiednio: zbiorcze zestawienie zmierzonych (niewygładzonych) szeregów częstości maksymalnych wysokości opadów syntetycznych we Wrocławiu-Strachowicach z okresu 1960-2009 oraz zbiorcze zestawienie krzywych typu DDF - wygładzonych modelem (5.26).

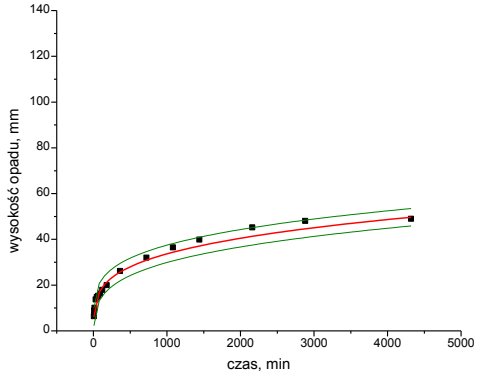


Rys. 5.14. Zbiorcze zestawienie zmierzonych (niewygładzonych) szeregów częstości maksymalnych wysokości opadów syntetycznych we Wrocławiu-Strachowicach z okresu 1960-2009

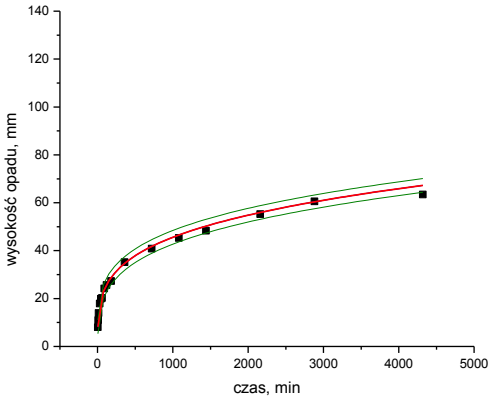


Rys. 5.15. Zbiorcze zestawienie krzywych typu DDF - maksymalnych wysokości opadów z okresu 1960-2009 wygładzonych modelem (5.26) dla Wrocławia-Strachowic

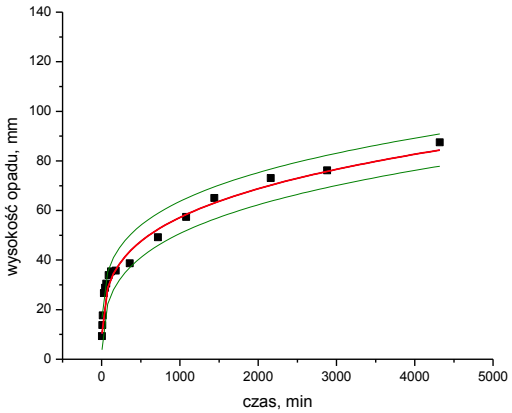
Na rysunkach 5.16÷5.21 podano krzywe typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) z wynikami pomiarów i przedziałami ufności, odpowiednio dla C = 1÷50 lat.



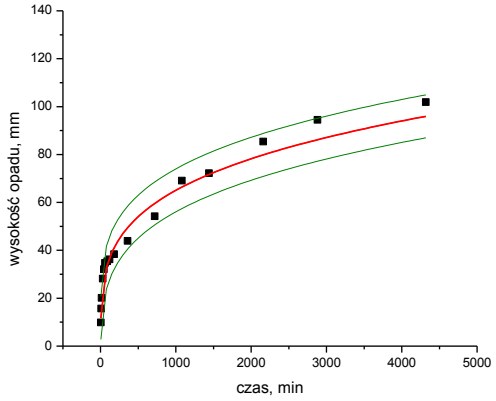
Rys. 5.16. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 1 rok wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,993)



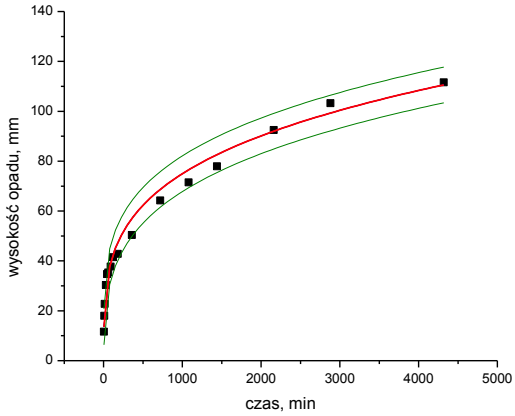
Rys. 5.17. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 2 lata wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,997)



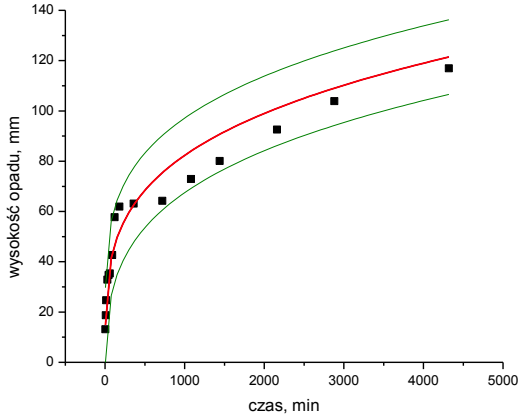
Rys. 5.18. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 5 lat wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,991)



Rys. 5.19. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 10 lat wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,989)



Rys. 5.20. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 25 lat wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,994)



Rys. 5.21. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 50 lat wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,974)

5.2.3. Ocena ilościowa uzyskanych modeli fizykalnych opadów maksymalnych

Poniżej zestawiono cztery modele fizykalne opadów maksymalnych, uzyskane z 50 lat obserwacji na stacji IMGW Wrocław-Strachowice, przy zastosowaniu pierwszego sposobu

interpretacji wyników pomiarów, który polega m.in. na uogólnieniu statystycznym niewygładzonych probabilistycznie zmierzonych serii czasowych opadów syntetycznych o $t \in [5; 4320]$ minut i $C \in [1; 50]$ lat:

- Model I (5.15): $h_{\max}(t,C) = 5{,}698 C^{0{,}217} t^{0{,}275}$;
- Model II (5.20): $h_{\max}(t,C) = \{6{,}417 + 1{,}396[-\ln(-\ln(1-1/C))]\} t^{0{,}275}$;
- Model III (5.23): $h_{\max}(t,C) = \left(-11{,}928\ C^{-0{,}218} + 17{,}0\right)\ t^{0{,}275}$;
- Model IV (5.26): $h_{\max}(t,C) = \left(6{,}670 + 1{,}677 \ln(C - 0{,}530)\right)(t - 3{,}45)^{0{,}265}$;

dla których ogólnie:

$$q_{\max}(t,C) = 1000 h_{\max}(t,C)/(6t) \tag{5.27}$$

W tabeli 5.7 przedstawiono porównanie wyników zmierzonych maksymalnych wysokości opadów h (w mm) we Wrocławiu-Strachowicach w okresie 1960-2009 dla C = 1, 2, 5, 10, 25 i 50 lat oraz t od 5 minut do 72 godzin, przeliczonych następnie wg (5.27) na natężenia jednostkowe q (w dm^3/(s·ha)), z obliczonymi wg czterech opracowanych i analizowanych w pracy fizykalnych modeli opadów.

Tabela 5.7.

Porównanie zmierzonych maksymalnych wysokości opadów (h, w mm) we Wrocławiu-Strachowicach, przeliczonych na natężenia jednostkowe (q, dm^3/(s·ha)), z obliczonymi dla czterech analizowanych fizykalnych modeli opadów

***C*, lata**	***t*, min**	**Dane pomiarowe**		**Model I (5.15)**		**Model II (5.20)**		**Model III (5.23)**		**Model IV (5.26)**	
		h	***q***	***q***	***Δq***	***q***	***Δq***	***q***	***Δq***	***q***	***Δq***
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
***C* = 1**	5	6,4	213,3	295,7	38,6%	222,2	4,2%	263,3	23,4%	202,6	**-5,2%**
	10	8,9	148,3	178,9	20,6%	134,4	-9,4%	159,3	7,4%	148,4	**-0,1%**
	15	**10,1**	**112,2**	**133,3**	**18,8%**	**100,2**	**-10,7%**	**118,7**	**5,8%**	**114,8**	**2,3%**
	30	13,7	76,1	80,7	6,0%	60,6	-20,4%	71,8	-5,7%	71,7	**-5,9%**
	45	14,8	54,8	60,1	9,7%	45,2	-17,5%	53,5	-2,4%	53,8	**-2,0%**
	60	15,3	42,5	48,8	14,8%	36,7	-13,6%	43,5	2,4%	43,8	**2,8%**
	90	16,3	30,2	36,4	20,5%	27,3	-9,6%	32,4	7,3%	32,7	**7,9%**
	120	17,9	24,9	29,5	18,5%	22,2	-10,8%	26,3	5,6%	26,5	**6,4%**
	180	20,0	18,5	22	18,9%	16,5	-10,8%	19,6	5,9%	19,7	**6,5%**
	360	26,2	12,1	13,3	9,9%	10	-17,4%	11,9	-1,7%	11,9	**-1,7%**
	720	32,0	7,4	8,1	9,5%	6,1	-17,6%	7,2	-2,7%	7,2	**-4,1%**
	1080	36,5	5,6	6	7,1%	4,5	-19,6%	5,3	-5,4%	5,3	**-5,4%**
	1440	39,9	4,6	4,9	6,5%	3,7	-19,6%	4,3	-6,5%	4,3	**-6,5%**
	2160	45,2	3,5	3,6	2,9%	2,7	-22,9%	3,2	-8,6%	3,2	**-8,6%**
	2880	48,1	2,8	2,9	3,6%	2,2	-21,4%	2,6	-7,1%	2,6	**-7,1%**
	4320	49,0	1,9	2,2	15,8%	1,7	-10,5%	2	5,3%	1,9	**0,0%**
***C* = 2**	5	8,0	266,7	343,7	28,9%	359,5	34,8%	350,1	31,3%	273,8	**2,7%**
	10	11,0	183,3	207,9	13,4%	217,5	18,7%	211,8	15,5%	200,5	**9,4%**
	15	13,9	154,4	155	0,4%	162,1	5,0%	157,9	2,3%	155,4	**0,7%**
	30	17,9	99,4	93,8	-5,6%	98,1	-1,3%	95,5	-3,9%	96,9	**-2,5%**
	45	19,9	73,7	69,9	-5,2%	73,1	-0,8%	71,2	-3,4%	72,7	**-1,2%**
	60	20,2	56,1	56,7	1,1%	59,3	5,7%	57,8	3,0%	59,2	**5,5%**
	90	24,2	44,8	42,3	-5,6%	44,2	-1,3%	43,1	-3,8%	44,2	**-1,3%**
	120	25,6	35,6	34,3	-3,7%	35,9	0,8%	35	-1,7%	35,8	**0,8%**
	180	27,3	25,3	25,6	1,2%	26,8	5,9%	26,1	3,2%	26,7	**5,5%**
	360	35,2	16,3	15,5	-4,9%	16,2	-0,6%	15,8	-3,1%	16,1	**-1,2%**
	720	40,8	9,4	9,4	0,0%	9,8	4,3%	9,5	1,1%	9,7	**3,2%**
	1080	45,3	7,0	7	0,0%	7,3	4,3%	7,1	1,4%	7,2	**2,9%**
	1440	48,3	5,6	5,7	1,8%	5,9	5,4%	5,8	3,6%	5,8	**3,6%**
	2160	55,2	4,3	4,2	-2,3%	4,4	2,3%	4,3	0,0%	4,3	**0,0%**
	2880	60,6	3,5	3,4	-2,9%	3,6	2,9%	3,5	0,0%	3,5	**0,0%**
	4320	63,4	2,4	2,6	8,3%	2,7	12,5%	2,6	8,3%	2,6	**8,3%**

***C* = 5**	5	9,3	310,0	419,3	35,3%	441,6	42,5%	446,5	44,0%	343,2	**10,9%**
	10	13,8	230,0	253,7	10,3%	267,2	16,2%	270,1	17,4%	251,4	**9,5%**
	15	17,7	196,7	189,1	-3,9%	199,1	1,2%	201,3	2,3%	194,8	**-0,8%**
	30	26,7	148,3	114,4	-22,9%	120,5	-18,7%	121,8	-17,9%	121,4	**-18,0%**
	45	28,8	106,7	85,2	-20,1%	89,8	-15,8%	90,8	-14,9%	91,1	**-14,4%**
	60	30,5	84,7	69,2	-18,3%	72,9	-13,9%	73,7	-13,0%	74,2	**-12,3%**
	90	33,9	62,8	51,6	-17,8%	54,3	-13,5%	54,9	-12,6%	55,4	**-11,8%**
	120	35,4	49,2	41,9	-14,8%	44,1	-10,4%	44,6	-9,3%	44,9	**-8,5%**
	180	35,7	33,1	31,2	-5,7%	32,9	-0,6%	33,2	0,3%	33,4	**1,2%**
	360	38,7	17,9	18,9	5,6%	19,9	11,2%	20,1	12,3%	20,1	**12,8%**
	720	49,2	11,4	11,4	0,0%	12	5,3%	12,2	7,0%	12,1	**6,1%**
	1080	57,4	8,9	8,5	-4,5%	9	1,1%	9,1	2,2%	9,0	**1,1%**
	1440	65,0	7,5	6,9	-8,0%	7,3	-2,7%	7,4	-1,3%	7,3	**-2,7%**
	2160	73,1	5,6	5,1	-8,9%	5,4	-3,6%	5,5	-1,8%	5,4	**-3,6%**
	2880	76,2	4,4	4,2	-4,5%	4,4	0,0%	4,5	2,3%	4,4	**0,0%**
	4320	87,5	3,4	3,1	-8,8%	3,3	-2,9%	3,3	-2,9%	3,2	**-2,9%**
***C* = 10**	5	9,9	330,0	487,3	47,7%	496	50,3%	507,6	53,8%	390,0	**18,5%**
	10	15,7	261,7	294,8	12,6%	300,1	14,7%	307,1	17,3%	285,7	**9,4%**
	15	20,1	223,3	219,7	-1,6%	223,7	0,2%	228,9	2,5%	221,4	**-0,7%**
	30	28,2	156,7	132,9	-15,2%	135,3	-13,7%	138,5	-11,6%	138,0	**-11,7%**
	45	32,1	118,9	99,1	-16,7%	100,8	-15,2%	103,2	-13,2%	103,6	**-12,7%**
	60	34,7	96,4	80,4	-16,6%	81,9	-15,0%	83,8	-13,1%	84,3	**-12,3%**
	90	35,4	65,6	59,9	-8,7%	61	-7,0%	62,4	-4,9%	62,9	**-3,8%**
	120	36,2	50,3	48,7	-3,2%	49,5	-1,6%	50,7	0,8%	51,1	**1,8%**
	180	38,4	35,6	36,3	2,0%	36,9	3,7%	37,8	6,2%	38,0	**7,0%**
	360	43,9	20,3	21,9	7,9%	22,3	9,9%	22,9	12,8%	22,9	**12,8%**
	720	54,2	12,5	13,3	6,4%	13,5	8,0%	13,8	10,4%	13,8	**10,4%**
	1080	69,1	10,7	9,9	-7,5%	10,1	-5,6%	10,3	-3,7%	10,2	**-4,7%**
	1440	72,2	8,4	8	-4,8%	8,2	-2,4%	8,4	0,0%	8,3	**-1,2%**
	2160	85,4	6,6	6	-9,1%	6,1	-7,6%	6,2	-6,1%	6,1	**-6,1%**
	2880	94,5	5,5	4,9	-10,9%	4,9	-10,9%	5,1	-7,3%	5,0	**-9,1%**
	4320	101,9	3,9	3,6	-7,7%	3,7	-5,1%	3,8	-2,6%	3,7	**-5,1%**
***C* = 25**	5	11,6	386,7	594,5	53,7%	564,7	46,0%	575,4	48,8%	449,3	**16,2%**
	10	18	300,0	359,7	19,9%	341,6	13,9%	348,1	16,0%	329,1	**9,7%**
	15	22,8	253,3	268,1	5,8%	254,6	0,5%	259,5	2,4%	255	**0,7%**
	30	30,3	168,3	162,2	-3,6%	154	-8,5%	157	-6,7%	159	**-5,5%**
	45	34,7	128,5	120,9	-5,9%	114,8	-10,7%	117	-8,9%	119,3	**-7,2%**
	60	35,3	98,1	98,1	0,0%	93,2	-5,0%	95	-3,2%	97,1	**-1,0%**
	90	37,7	69,8	73,1	4,7%	69,5	-0,4%	70,8	1,4%	72,5	**3,9%**
	120	41,5	57,6	59,4	3,1%	56,4	-2,1%	57,5	-0,2%	58,8	**2,1%**
	180	42,8	39,6	44,2	11,6%	42	6,1%	42,8	8,1%	43,8	**10,6%**
	360	50,4	23,3	26,8	15,0%	25,4	9,0%	25,9	11,2%	26,4	**13,3%**
	720	64,2	14,9	16,2	8,7%	15,4	3,4%	15,7	5,4%	15,9	**6,7%**
	1080	71,5	11,0	12,1	10,0%	11,5	4,5%	11,7	6,4%	11,8	**7,3%**
	1440	77,9	9,0	9,8	8,9%	9,3	3,3%	9,5	5,6%	9,5	**5,6%**
	2160	92,5	7,1	7,3	2,8%	6,9	-2,8%	7,1	0,0%	7,1	**0,0%**
	2880	103,2	6,0	5,9	-1,7%	5,6	-6,7%	5,7	-5,0%	5,7	**-5,0%**
	4320	111,6	4,3	4,4	2,3%	4,2	-2,3%	4,3	0,0%	4,3	**0,0%**
***C* = 50**	5	13,1	436,7	691	58,2%	615,6	41,0%	618,4	41,6%	493,2	**12,9%**
	10	18,7	311,7	418,1	34,1%	372,5	19,5%	374,2	20,1%	361,3	**15,9%**
	15	24,7	274,4	311,6	13,6%	277,6	1,2%	278,9	1,6%	279,9	**2,0%**
	30	32,9	182,8	188,5	3,1%	167,9	-8,2%	168,7	-7,7%	174,5	**-4,5%**
	45	34,7	128,5	140,5	9,3%	125,2	-2,6%	125,7	-2,2%	131	**1,9%**
	60	35,3	98,1	114	16,2%	101,6	3,6%	102,1	4,1%	106,6	**8,7%**
	90	42,7	79,1	85	7,5%	75,7	-4,3%	76,1	-3,8%	79,6	**0,6%**
	120	57,7	80,1	69	-13,9%	61,5	-23,2%	61,8	-22,8%	64,6	**-19,4%**
	180	61,9	57,3	51,4	-10,3%	45,8	-20,1%	46	-19,7%	48,1	**-16,1%**
	360	63,1	29,2	31,1	6,5%	27,7	-5,1%	27,8	-4,8%	28,9	**-1,0%**
	720	64,2	14,9	18,8	26,2%	16,8	12,8%	16,8	12,8%	17,4	**16,8%**
	1080	72,9	11,3	14	23,9%	12,5	10,6%	12,6	11,5%	12,9	**14,2%**
	1440	80,1	9,3	11,4	22,6%	10,1	8,6%	10,2	9,7%	10,5	**12,9%**
	2160	92,6	7,1	8,5	19,7%	7,6	7,0%	7,6	7,0%	7,8	**9,9%**
	2880	103,9	6,0	6,9	15,0%	6,1	1,7%	6,2	3,3%	6,3	**5,0%**
	4320	116,9	4,5	5,1	13,3%	4,6	2,2%	4,6	2,2%	4,7	**4,4%**

Z przedstawionej w tabeli 5.7 oceny dokładności czterech fizykalnych modeli opadów względem wyników pomiarów sformułować można następujące wnioski-stwierdzenia:

- wszystkie analizowane modele dostatecznie dokładnie opisują wyniki pomiarów opadów maksymalnych dla czasu *t* od 15 minut do 72 godzin i częstości *C* od 1 do 50

lat - interpretowanych jako linie trendów krzywych typu DDF w 95% przedziałach ufności (patrz przykłady na rys. 5.16-5.21);

- stwierdzono bardzo duże odchylenia wyników obliczeń względem danych pomiarowych dla dwóch najkrótszych interwałów czasowych trwania deszczy - dla trzech pierwszych modeli, a zwłaszcza dla interwału 5-cio minutowego - rzędu +(20÷50)% i nieco mniejsze dla 10-cio minutowego - rzędu +(10÷20)%;
- w pozostałych 14-u interwałach czasowych opadów syntetycznych (od 15 do 4320 minut) wyniki obliczeń z trzech pierwszych modeli są w miarę zgodne z wynikami pomiarów, a różnice rzędu ±15%, z wyjątkiem przypadków, gdzie dane pomiarowe wizualnie odbiegają w zdecydowany sposób od wyznaczonych linii trendów lecz i wówczas mieszczą się one w 95% przedziałach ufności uzyskanych modeli (co zostało wykazane na rysunkach 5.16-5.21, przedstawiających krzywe typu DDF - maksymalnych wysokości opadów dla modelu (5.26), odpowiednio dla częstości deszczy C = 1, 2, 5, 10, 25 i 50 lat).
- czwarty model fizykalny (5.26) ma największe znaczenie praktyczne, jako najdokładniejszy w porównaniu z trzema pierwszymi (różnice z wynikami pomiarów rzędu ±10%), zwłaszcza w opisie najczęściej stosowanego zakresu częstości opadów C = 1÷10 lat i czasu ich trwania do 2÷3 godzin.

Znaczne odchylenia wyników obliczeń q z trzech pierwszych modeli w najkrótszych interwałach czasowych opadów (zdecydowanie mniejsze w przypadku czwartego modelu) wynikać mogą w części z przyjętego „zbyt prostego" modelu fizykalnego $h_{max}(t, C) = at^n$ badanego zjawiska, ale w części też z „klasy dokładności" rejestratora opadów - pluwiografu z lewarowym opróżnianiem zbiorniczka retencyjnego.

W tabeli 5.8 przedstawiono zbiorcze zestawienie wyników obliczeń natężenia opadów z modelu (5.26) i z modeli innych autorów dla C = 1÷10 lat i t od 5 minut do 72 godzin do względnych porównań ilościowych.

Tabela 5.8.

Zestawienie wyników obliczeń maksymalnych natężeń opadów z modelu fizykalnego (5.26) i z modeli innych autorów dla C = 1÷10 lat

Częstość deszczu C	**Czas trwania deszczu t**	**Dane z pomiarów h**	**Dane z pomiarów przeliczone na q**	**q - obliczone z modelu (5.26)**	**Stachy (2.21)** Wrocław-Strachowice	**Wołoszyn (2.23)****	**Sowiński (2.28)**	**Licznar-Łomotowski (2.29)** Wrocław-Swojec	**Bogdanowicz-Stachy (2.11)**	**Reinhold (2.1)** $q_{15,1}$=112,2 dm^3/(s·ha)
lata	min	mm	dm^3/(s ha)		dm^3/(s ha)					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C = 1	5	6,4	213,3	202,6	*	53,5	*	186,7	80,5	192,4
	10	8,9	148,3	148,4	*	35,4	*	128,2	50,6	141,7
	15	10,1	112,2	114,8	*	26,9	*	98,8	38,6	112,2
	30	13,7	76,1	71,7	*	16,3	*	60,4	24,2	69,1
	45	14,8	54,8	53,8	*	12,2	*	44,8	18,5	49,9
	60	15,3	42,5	43,8	*	10,1	*	36,3	15,2	39,0
	90	16,3	30,2	32,7	*	7,8	*	27,2	11,6	27,2
	120	17,9	24,9	26,5	*	6,6	*	22,4	9,6	20,9
	180	20,0	18,5	19,7	*	5,4	*	17,4	7,3	14,3
	360	26,2	12,1	11,9	*	*	*	*	4,6	*
	720	32,0	7,4	7,2	*	*	*	*	2,9	*
	1080	36,5	5,6	5,3	*	*	*	*	2,2	*
	1440	39,9	4,6	4,3	*	*	*	*	1,8	*
	2160	45,2	3,5	3,2	*	*	*	*	1,4	*
	2880	48,1	2,8	2,6	*	*	*	*	1,1	*
	4320	49,0	1,9	1,9	*	*	*	*	0,9	*

***C* = 2**	5	8,0	266,7	273,8	292,8	186,6	*	214,3	273,2	250,0
	10	11,0	183,3	200,5	182,8	121,8	170,4	172,3	185,2	184,2
	15	13,9	154,4	155,4	138,7	91,1	137,5	141,3	144,1	145,8
	30	17,9	99,4	96,9	86,6	53,1	79,9	86,3	90,9	89,7
	45	19,9	73,7	72,7	65,7	38,4	55,0	59,7	68,5	64,8
	60	20,2	56,1	59,2	54,0	30,6	41,7	45,5	55,7	50,7
	90	24,2	44,8	44,2	41,0	22,4	27,6	32,2	41,4	35,3
	120	25,6	35,6	35,8	33,7	18,2	*	26,8	33,4	27,1
	180	27,3	25,3	26,7	*	13,9	*	22,9	23,9	18,5
	360	35,2	16,3	16,1	*	*	*	*	13,5	*
	720	40,8	9,4	9,7	*	*	*	*	7,6	*
	1080	45,3	7,0	7,2	*	*	*	*	5,8	*
	1440	48,3	5,6	5,8	*	*	*	*	4,8	*
	2160	55,2	4,3	4,3	*	*	*	*	3,6	*
	2880	60,6	3,5	3,5	*	*	*	*	2,9	*
	4320	63,4	2,4	2,6	*	*	*	*	2,2	*
***C* = 5**	5	9,3	310,0	343,2	409,8	329,7	*	321,4	395,6	343,2
	10	13,8	230,0	251,4	255,8	214,2	250,1	238,0	270,8	252,9
	15	17,7	196,7	194,8	194,2	159,5	198,7	185,9	211,1	200,2
	30	26,7	148,3	121,4	121,2	91,9	114,8	108,4	133,3	123,2
	45	28,8	106,7	91,1	92,0	65,7	79,0	75,8	100,2	89,0
	60	30,5	84,7	74,2	75,6	51,8	57,7	58,8	81,4	69,6
	90	33,9	62,8	55,4	57,4	37,3	39,9	42,3	60,3	48,5
	120	35,4	49,2	44,9	47,2	29,8	*	34,7	48,6	37,3
	180	35,7	33,1	33,4	*	22,1	*	28,1	34,4	25,4
	360	38,7	17,9	20,1	*	*	*	*	19,1	*
	720	49,2	11,4	12,1	*	*	*	*	10,6	*
	1080	57,4	8,9	9,0	*	*	*	*	8,1	*
	1440	65,0	7,5	7,3	*	*	*	*	6,7	*
	2160	73,1	5,6	5,4	*	*	*	*	5,0	*
	2880	76,2	4,4	4,4	*	*	*	*	4,1	*
	4320	87,5	3,4	3,2	*	*	*	*	3,0	*
***C* = 10**	5	9,9	330,0	390,0	487,3	426,8	*	486,9	468,9	429,4
	10	15,7	261,7	285,7	304,2	276,8	310,7	270,9	322,0	316,4
	15	20,1	223,3	221,4	230,9	205,7	244,0	212,1	251,3	250,4
	30	28,2	156,7	138,0	144,1	117,9	139,5	140,4	158,7	154,1
	45	32,1	118,9	103,6	109,4	83,9	96,2	107,3	119,3	111,3
	60	34,7	96,4	84,3	89,9	65,8	72,9	86,5	96,8	87,1
	90	35,4	65,6	62,9	68,3	46,9	48,5	60,1	71,6	60,7
	120	36,2	50,3	51,1	56,1	37,2	*	43,0	57,6	46,6
	180	38,4	35,6	38,0	*	27,2	*	21,1	40,7	31,8
	360	43,9	20,3	22,9	*	*	*	*	22,5	*
	720	54,2	12,5	13,8	*	*	*	*	12,4	*
	1080	69,1	10,7	10,2	*	*	*	*	9,5	*
	1440	72,2	8,4	8,3	*	*	*	*	7,8	*
	2160	85,4	6,6	6,1	*	*	*	*	5,9	*
	2880	94,5	5,5	5,0	*	*	*	*	4,8	*
	4320	101,9	3,9	3,7	*	*	*	*	3,5	*

* - poza zakresem stosowalności modelu;
** - model z metody średnich natężeń.

Z analizy wyników obliczeń opadów maksymalnych w warunkach wrocławskich podanych w tabeli 5.8 wynika, że porównywane modele można uznać pod względem ilościowym za jednorodne, poza modelem Wołoszyna dla C = 1 i 2 lata ustalonym metodą średnich natężeń oraz modelem Bogdanowicz-Stachy dla C = 1 rok, gdzie wyniki obliczeń znacznie odbiegają in minus od pozostałych. Należy zaznaczyć, że modele innych autorów zostały ustalone na podstawie innych danych źródłowych, pochodzących z różnych stacji i z różnych okresów pomiarowych, a więc ich bezpośrednie porównanie ilościowe z modelem dla Wrocławia-Strachowic jest niemożliwe. Ponadto autorzy ci stosowali różne metody wyboru próby losowej opadów do analiz statystycznych częstości ich występowania. Różnice obliczanych wysokości opadów maksymalnych wynikają też z samej klasy dokładności porównywanych modeli (fizykalne i probabilistyczne), ich regionalnego (model Bogdanowicz-Stachy czy Reinholda) bądź lokalnego zasięgu, czy wreszcie lokalizacji stacji pomiarowych na terenie Wrocławia (Swojec w przypadku modelu Licznara-Łomotowskiego czy Strachowice w przypadku modelu Stachy i modelu fizykalnego (5.26)).

6. Probabilistyczna interpretacja i uogólnienie wyników badań opadów maksymalnych we Wrocławiu-Strachowicach

6.1. Ogólna charakterystyka rozkładów prawdopodobieństwa

W tym rozdziale pracy, do interpretacji i uogólnienia wyników badań opadów maksymalnych dla stacji Wrocław-Strachowice zastosowano drugą, ogólniejszą metodę probabilistyczną. W metodologii tej, zakłada się wygładzanie uszeregowanych nierosnąco zmierzonych serii czasowych przedziałowych wysokości opadów i przypisywanie im częstości występowania w okresie 100-lecia. Wyniki uogólnień uzyskane tą metodą jako modele probabilistyczne opadów maksymalnych zostaną porównane z poprzednimi wynikami, tj. z modelami fizykalnymi. Uszeregowanie opadów, wyselekcjonowanych wg własnej metody, dla podstawowego okresu obserwacji (1960-2009) na stacji IMGW Wrocław-Strachowice przedstawiono w tabeli 5.3 (w p. 5.2.1. pracy).

W celu wyznaczenia teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej X należy w pierwszej kolejności zestawić nierosnąco (od wartości największej do najmniejszej) próbę losową

$$Z_n = \{x_1, x_2, ..., x_N\}, \tag{6.1}$$

gdzie: $x_1 \geq x_2 \geq ... \geq x_n$, a następnie przypisać poszczególnym elementom z próby empiryczne prawdopodobieństwo nieprzekroczenia. Empiryczny rozkład prawdopodobieństwa konstruowany jest na podstawie zaobserwowanych wartości badanego zjawiska, w tym przypadku wysokości opadów. Idea rozkładu empirycznego wynika bezpośrednio z częstościowej interpretacji prawdopodobieństwa występowania danej wysokości opadu [18]:

$$p(m, N) = \frac{m}{N+1} \tag{6.2}$$

gdzie:

m – miejsce danego wyrazu w ciągu rozdzielczym opadów,

N – liczebność ciągu.

W rezultacie prawdopodobieństwo empiryczne najwyższych zmierzonych wysokości opadów z pierwszego wiersza (z tabeli 5.3) z okresu 50 lat obserwacji wynosi $p(1, 50) = 0{,}02$, z drugiego $p(2, 50) = 0{,}04$, i analogicznie aż do $p(50, 50) = 0{,}98$, co podano w tabeli 6.1.

Tabela 6.1.

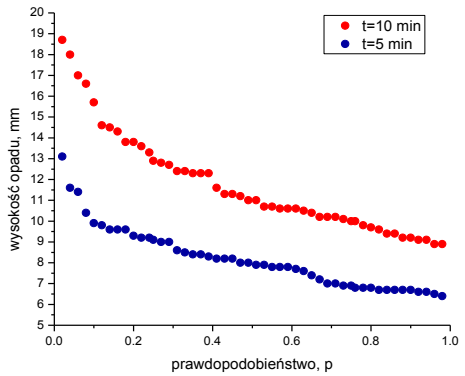
Przypisanie prawdopodobieństwa występowania (p) serii czasowych maksymalnych wysokości opadów (dane z tab. 5.3 - największych przedziałowych wysokości opadów syntetycznych (w mm) z 514 wyselekcjonowanych deszczy z 50 lat obserwacji)

Nr	$p(m, N)$	Wysokość opadu (w mm) w poszczególnych przedziałach czasowych t (w minutach)															
		5	10	15	30	45	60	90	120	180	360	720	1080	1440	2160	2880	4320
1	0,02	13,1	18,7	24,7	32,9	34,7	35,3	42,7	57,7	61,9	63,1	64,2	72,9	80,1	92,6	103,9	116,9
2	0,04	11,6	18,0	22,8	30,3	34,7	35,3	37,7	41,5	42,8	50,4	64,2	71,5	77,9	92,5	103,2	111,6
3	0,06	11,4	17,0	20,7	28,6	34,7	35,3	36,5	38,5	41,3	49,0	63,1	71,5	75,2	86,9	101,1	108,5
4	0,08	10,4	16,6	20,2	28,4	34,1	34,8	35,8	36,5	40,4	46,0	54,4	69,1	73,4	85,5	96,2	107,9
5	0,10	9,9	15,7	20,1	28,2	32,1	34,7	35,4	36,2	38,4	43,9	54,2	69,1	72,2	85,4	94,5	101,9
6	0,12	9,8	14,6	20,0	28,0	31,9	33,6	35,4	36,1	38,0	42,6	52,9	63,1	72,1	80,8	87,5	100,4
7	0,14	9,6	14,5	19,8	28,0	30,2	32,7	35,4	35,7	36,7	42,6	51,5	61,7	68,0	80,3	85,8	97,5
8	0,16	9,6	14,3	19,2	28,0	30,2	32,4	34,7	35,4	36,5	41,0	50,0	61,2	67,5	79,4	83,9	90,1

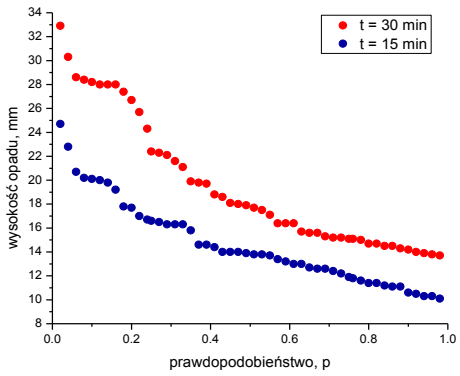
9	0,18	9,6	13,8	17,8	27,4	29,0	31,7	34,3	35,4	35,9	40,7	49,7	60,4	66,5	75,3	79,7	90,0
10	0,20	9,3	13,8	17,7	26,7	28,8	30,5	33,9	35,4	35,7	38,7	49,2	57,4	65,0	73,1	76,2	87,5
11	0,22	9,2	13,6	17,0	25,7	28,8	30,3	33,7	34,9	35,4	38,7	48,9	56,8	63,1	70,3	73,4	84,0
12	0,24	9,2	13,3	16,7	24,3	28,6	29,7	33,2	34,6	35,4	38,5	48,4	56,8	62,1	69,2	73,1	82,9
13	0,25	9,1	12,9	16,6	22,4	27,9	29,4	33,2	33,2	35,4	38,3	46,5	53,9	61,9	65,6	66,7	79,7
14	0,27	9,0	12,8	16,5	22,3	26,5	29,2	32,3	33,2	35,2	37,5	46,3	53,5	61,0	65,5	66,5	76,6
15	0,29	9,0	12,7	16,3	22,1	26,3	29,1	31,7	33,2	35,1	37,3	46,3	52,8	56,9	65,4	66,4	76,1
16	0,31	8,6	12,4	16,3	21,6	25,7	28,8	30,6	32,4	34,9	36,9	45,8	51,5	56,4	62,1	65,6	75,2
17	0,33	8,5	12,4	16,3	21,1	24,5	27,5	30,1	31,3	34,4	36,9	44,6	50,9	54,1	62,1	65,1	74,5
18	0,35	8,4	12,3	15,8	19,9	24,3	26,9	29,3	30,6	33,2	36,8	44,5	49,2	54,1	59,3	63,0	73,9
19	0,37	8,4	12,3	14,6	19,8	23,8	24,6	29,3	30,1	32,8	36,5	43,9	49,1	52,8	58,7	62,1	68,5
20	0,39	8,3	12,3	14,6	19,7	22,8	24,6	28,7	29,5	32,4	36,3	41,5	48,9	51,5	57,0	61,1	68,2
21	0,41	8,2	11,6	14,4	18,8	22,4	24,5	27,9	29,3	32,1	36,1	41,3	47,1	51,2	57,0	61,1	66,7
22	0,43	8,2	11,3	14,0	18,6	21,5	24,0	27,0	28,7	31,6	35,7	41,2	46,0	49,2	56,9	60,8	65,7
23	0,45	8,2	11,3	14,0	18,1	20,7	23,5	24,7	26,9	29,8	35,7	40,8	45,3	49,1	56,4	60,8	63,6
24	0,47	8,0	11,2	14,0	18,0	20,0	23,3	24,6	26,2	29,3	35,7	40,8	45,3	49,0	55,7	60,8	63,4
25	0,49	8,0	11,0	13,9	17,9	19,9	20,2	24,2	25,6	27,3	35,2	40,8	45,3	48,3	55,2	60,6	63,4
26	0,51	7,9	11,0	13,8	17,7	19,6	19,9	22,3	25,2	27,0	34,9	40,1	45,3	48,3	53,9	60,4	62,7
27	0,53	7,9	10,7	13,8	17,5	19,0	19,9	21,0	23,6	26,4	34,8	39,9	45,2	47,8	52,8	59,6	62,1
28	0,55	7,8	10,7	13,7	17,1	18,3	19,2	20,8	23,1	26,2	34,7	39,3	45,0	47,4	51,5	59,5	61,2
29	0,57	7,8	10,6	13,4	16,4	17,7	18,7	20,0	22,2	25,6	34,4	39,0	44,7	47,1	51,2	59,3	60,6
30	0,59	7,8	10,6	13,2	16,4	17,7	18,5	19,9	21,4	25,6	33,9	38,7	44,4	47,1	51,0	58,7	60,4
31	0,61	7,7	10,6	13,0	16,4	17,2	17,8	19,9	21,1	25,0	33,2	38,0	44,1	47,1	50,9	58,5	60,1
32	0,63	7,6	10,5	13,0	15,7	17,0	17,7	19,6	20,9	25,0	33,0	37,6	43,9	46,0	50,7	56,5	60,0
33	0,65	7,4	10,4	12,7	15,6	16,8	17,5	19,3	20,3	24,9	32,8	37,5	42,7	45,8	50,4	56,4	59,8
34	0,67	7,2	10,2	12,6	15,6	16,8	17,3	19,2	20,3	24,9	32,4	37,5	41,2	45,3	50,1	56,3	59,4
35	0,69	7,0	10,2	12,6	15,3	16,5	17,0	18,8	19,9	24,2	32,2	37,5	41,2	45,2	49,5	55,5	59,3
36	0,71	7,0	10,2	12,4	15,2	16,5	16,9	18,1	19,9	23,4	30,8	36,5	41,0	45,2	48,1	52,8	59,3
37	0,73	6,9	10,1	12,2	15,2	16,3	16,8	17,7	19,6	23,0	30,5	36,1	40,6	44,9	48,0	51,6	58,5
38	0,75	6,9	10,0	11,9	15,1	16,1	16,6	17,6	19,6	22,6	30,4	35,6	40,3	44,4	47,3	51,5	57,9
39	0,76	6,8	10,0	11,8	15,1	16,0	16,6	17,2	19,4	22,1	29,5	35,2	39,6	43,5	47,2	51,1	57,0
40	0,78	6,8	9,8	11,6	15,0	15,8	16,1	17,2	19,4	22,0	29,3	35,2	39,3	43,4	47,2	51,0	55,9
41	0,80	6,8	9,7	11,4	14,7	15,8	16,0	17,1	19,3	22,0	29,3	35,1	39,3	42,3	47,2	50,5	55,7
42	0,82	6,7	9,6	11,4	14,7	15,7	16,0	17,0	19,0	21,9	28,5	35,0	39,3	42,1	47,2	49,5	51,8
43	0,84	6,7	9,4	11,2	14,5	15,6	15,9	17,0	18,9	21,7	28,5	34,9	39,3	41,8	47,2	49,0	51,4
44	0,86	6,7	9,4	11,1	14,5	15,6	15,9	16,9	18,8	21,5	28,0	34,6	39,0	41,7	47,1	48,9	51,1
45	0,88	6,7	9,2	11,1	14,3	15,2	15,9	16,8	18,8	21,5	27,9	34,5	38,8	41,0	46,6	48,6	50,5
46	0,90	6,7	9,2	10,6	14,2	15,1	15,7	16,8	18,7	21,1	27,9	33,9	38,7	40,4	46,4	48,6	50,0
47	0,92	6,6	9,1	10,5	14,0	15,1	15,6	16,7	18,6	20,4	27,8	32,9	38,0	40,3	45,8	48,1	50,0
48	0,94	6,6	9,1	10,3	13,9	15,0	15,5	16,6	17,9	20,3	27,0	32,8	37,9	40,2	45,8	48,1	49,7
49	0,96	6,5	8,9	10,3	13,8	14,9	15,4	16,4	17,9	20,2	26,3	32,5	37,5	40,1	45,3	48,1	49,5
50	0,98	6,4	8,9	10,1	13,7	14,8	15,3	16,3	17,9	20,0	26,2	32,0	36,5	39,9	45,2	48,1	49,0

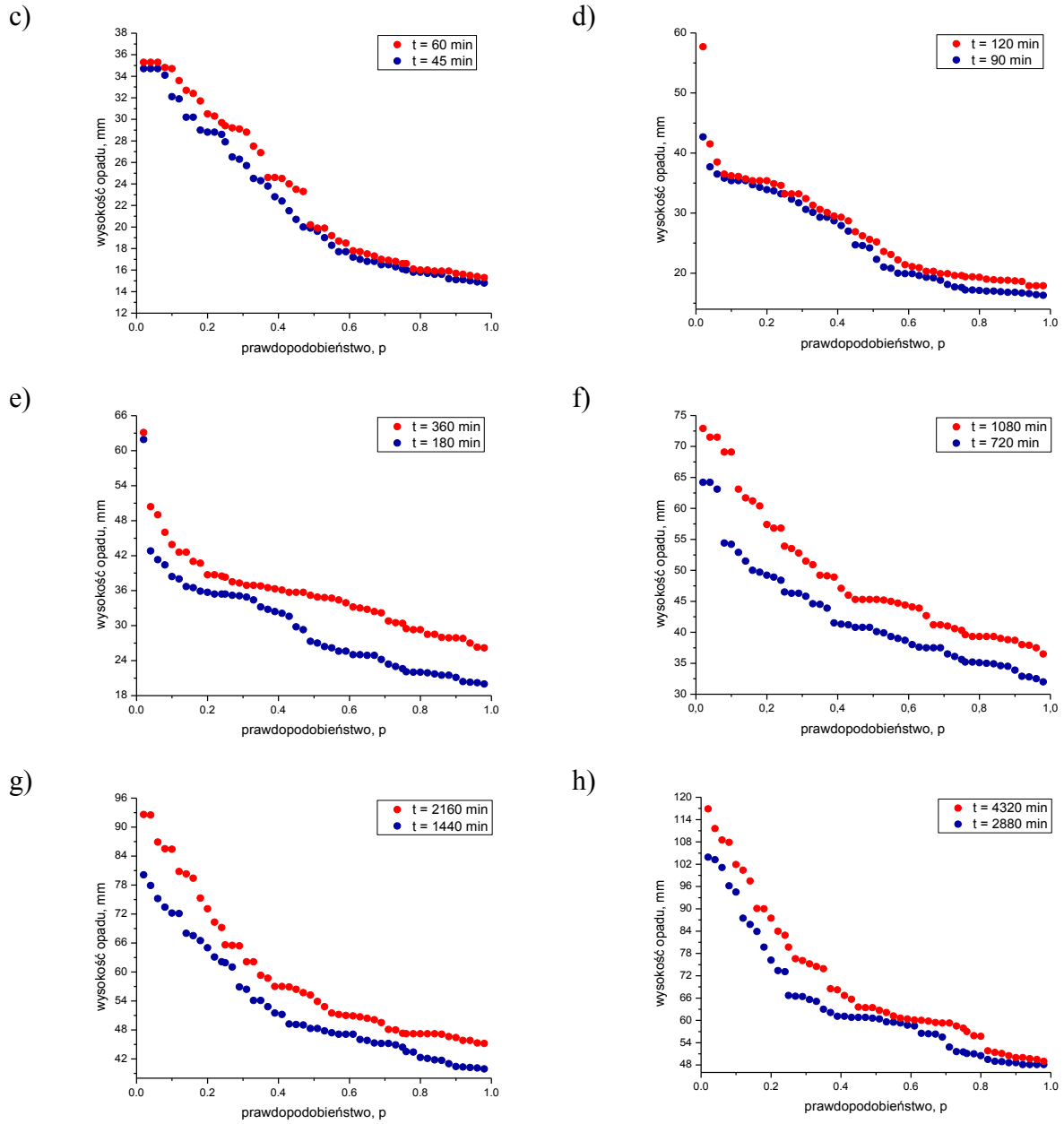
Punkty o współrzędnych $(x_m, p(m,N))$ naniesione na układ współrzędnych pozwalają zorientować się co do kształtu funkcji rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej X. Dystrybuanty empiryczne największych wysokości opadów z 50-cio letniego okresu pomiarowego (1960-2009) dla wszystkich analizowanych czasów (od 5 do 4320 minut) przedstawiono na rysunku 6.1.

a)



b)





Rys. 6.1. Dystrybuanty empiryczne największych wysokości opadów z 50-cio letniego okresu obserwacji dla wszystkich analizowanych czasów trwania opadów (od 5 do 4320 minut)

Wyznaczenie teoretycznej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa najlepiej dopasowanej do badanego zjawiska nie jest procesem łatwym. W większości przypadków, zwłaszcza w odniesieniu do zmiennych ciągłych, nie dysponujemy przesłankami teoretycznymi pozwalającymi jednoznacznie ustalić typ rozkładu, właściwy dla zmiennej opisującej badane zjawisko [125,126]. Na podstawie danych literaturowych do opisu zjawisk opadowych wybrano rozkłady:

- Fisher-Tippett typ I_{max} [27,90,125,126],
- Fisher-Tippett typ III_{min} [125,126] - nazywany także rozkładem Weibulla [27],
- logarytmiczno-normalny [27,31,125,126,127],
- Pearson typ III [27,125,126].

Dla zmiennych typu ciągłego rozkład prawdopodobieństwa określany jest za pomocą gęstości:

$$f(x, g_1, g_2, ..., g_k) \tag{6.3}$$

gdzie g_i są parametrami rozkładu. Aby ocenić wartości liczbowe parametrów g_i za pomocą danych statystycznych neleży z góry założyć typ funkcji gęstości. Wszystkie metody oszacowania nieznanego parametru g_i polegają na znalezieniu takiej funkcji elementów próby losowej

$$\hat{g}_i = g_i(x_1, x_2, ..., x_N) \quad , \tag{6.4}$$

która może być przyjęta jako przybliżona wartość parametru. Wartość $\hat{g}_i$ nazywać będziemy estymatorem z próby losowej. Efektywnością względną estymatora $\hat{g}_i'$ w stosunku do estymatora $\hat{g}_i''$ nazywamy stosunek ich wariancji:

$$e = \frac{D^2(\hat{g}_i')}{D^2(\hat{g}_i'')} \tag{6.5}$$

W przypadku, gdy $e < 1$, $\hat{g}_i'$ nazywamy estymatorem efektywniejszym w stosunku do estymatora $\hat{g}_i''$ [125].

Do najczęściej stosowanych metod wyznaczania estymatorów należą:

- metoda momentów [18,125,126],
- metoda charakterystyk pozycyjnych (kwantyli) [18,125,126,128],
- metoda największej wiarygodności [125,126,129,130].

Metoda momentów jest najstarszą z wymienionych metod, szeroko stosowaną w hydrologii, zwłaszcza w przeszłości, ze względu na swoją prostotę. W późniejszych latach wprowadzono metodę kwantyli, charakteryzującą się również w miarę nieskomplikowanymi rachunkami. Metoda największej wiarygodności (MNW) pozwala otrzymywać najefektywniejsze estymatory. Stosowanie tej metody związane jest zazwyczaj z dużymi trudnościami obliczeniowymi. Istota metody MNW polega na znalezieniu takich wartości parametrów $g_1, ..., g_k$, dla których funkcja wiarygodności L

$$L = f(x_1, g_1, g_2, ..., g_k) \cdot f(x_2, g_1, g_2, ..., g_k) \cdot ... \cdot f(x_N, g_1, g_2, ..., g_k) \tag{6.6}$$

lub jej logarytm osiągają maksimum. Warunek taki prowadzi do układu równań:

$$\frac{\partial L}{\partial g_1} = 0, \ \frac{\partial L}{\partial g_2} = 0, \ \ldots, \ \frac{\partial L}{\partial g_k} = 0 \tag{6.7}$$

lub alternatywnie:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial g_1} = 0, \ \frac{\partial \ln L}{\partial g_2} = 0, \ \ldots, \ \frac{\partial \ln L}{\partial g_k} = 0 \ , \tag{6.8}$$

z którego otrzymujemy poszukiwane wartości estymatorów $\hat{g}_i$. W przypadku, gdy jednym z estymowanych parametrów jest dolne lub górne ograniczenie zaleca się stosowanie mieszanych metod estymacji (tzn. oszacowanie ograniczenia inną metodą) [125,126].

6.2. Szczegółowa charakterystyka rozkładów prawdopodobieństwa

6.2.1. Rozkład Fishera-Tippetta typ I_{max}

Funkcja gęstości rozkładu Fishera-Tippetta typ I_{max} występuje w następującej postaci [125]:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-u)-e^{-\alpha(x-u)}} \tag{6.9}$$

skąd logarytm funkcji wiarygodności:

$$\ln L = N \ln \alpha - \alpha \sum_{i=1}^{N} x_i + N\alpha\mu - e^{\alpha \cdot \mu} \sum_{i=1}^{N} e^{-\alpha \cdot x} \tag{6.10}$$

Wykorzystując metodę największej wiarygodności parametry rozkładu otrzymuje się na podstawie zależności:

$$\overline{e^{-\alpha x}} - \alpha \overline{x}\,\overline{e^{-\alpha x}} + \alpha \overline{x e^{-\alpha x}} = 0 \tag{6.11}$$

$$u = -\frac{1}{\alpha} \ln(\overline{e^{-\alpha x}}) \tag{6.12}$$

Wyniki obliczeń poszczególnych parametrów rozkładu Fishera-Tippetta typ I_{max} przedstawiono w tabeli 6.2. Obliczenia przeprowadzono dla każdego z analizowanych w pracy czasów trwania opadu.

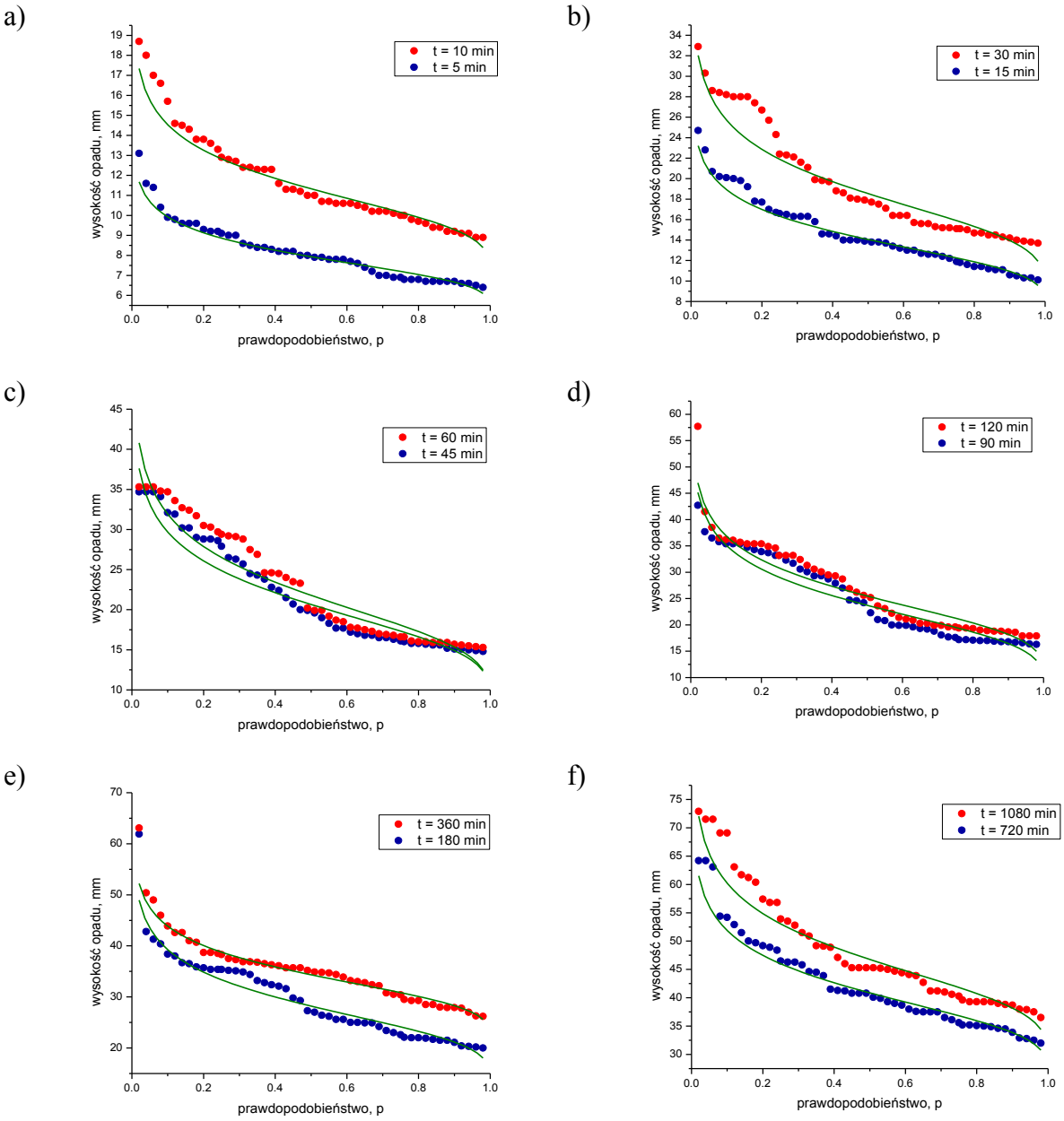
Tabela 6.2.
Wyniki obliczeń wartości parametrów α i u
dla rozkładu Fishera-Tippetta typ I_{max}

Czas	α	u
5	0,94407	7,54432
10	0,587908	10,7081
15	0,386074	13,1057
30	0,262014	17,1423
45	0,208521	18,8976
60	0,18611	19,8268
90	0,164929	21,5136
120	0,16459	23,2618
180	0,170266	26,0517
360	0,198003	32,4924
720	0,171129	38,7274
1080	0,139936	44,1448
1440	0,124165	47,6479
2160	0,106905	53,1588
2880	0,0960079	57,4102
4320	0,0779337	61,8412

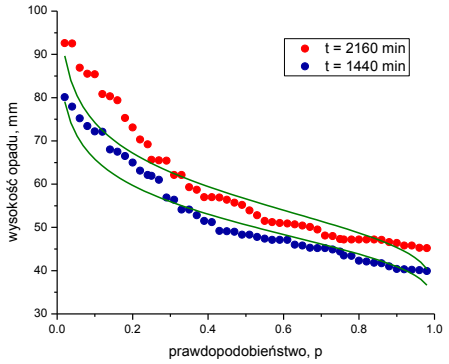
Kwantyle zmiennej losowej dla rozkładu Fishera-Tippetta typ I_{max} są obliczane za pomocą wzoru:

$$x_p = u - \frac{1}{\alpha} \ln \ln \frac{1}{1-p} \tag{6.13}$$

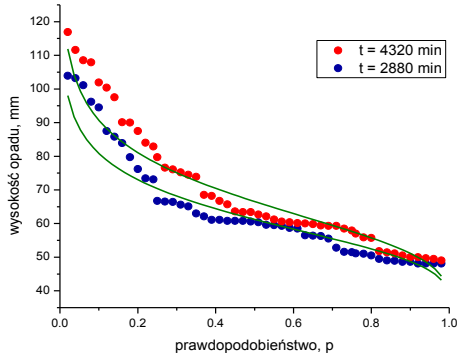
Na rysunku 6.2. przedstawiono interpretację graficzną dystrybuant empirycznych prawdopodobieństwa - wynikających z pomiarów, oraz teoretycznych - wynikających z rozkładu Fishera-Tippetta typ I_{max}. W celu ograniczenia liczby wykresów ilustracyjnych, przy jednoczesnym zapewnieniu ich przejrzystości, na każdym z 8 schematów (a÷h) na rysunku 6.2 przedstawiono kolejno wysokości opadów dla dwóch sąsiadujących ze sobą czasów ich trwania.



g)



h)



Rys. 6.2. Dystrybuanty teoretyczne rozkładu Fishera-Tippetta typ I_{max} największych wysokości opadów z 50-cio lecia (1960-2009) dla wszystkich analizowanych czasów trwania opadów (od 5 do 4320 minut)

6.2.2. Rozkład Fishera-Tippetta typ III_{min}

Funkcja gęstości rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min} występuje w następującej postaci [125]:

$$f(x) = \beta\alpha^{\beta}(x-\varepsilon)^{\beta-1}e^{-\alpha^{\beta}(x-\varepsilon)^{\beta}} \tag{6.14}$$

skąd logarytm funkcji wiarygodności:

$$\ln L = N\ln\beta + N\beta\ln\alpha + (\beta-1)\sum_{i=1}^{N}\ln x_i - \alpha^{\beta}\sum_{i=1}^{N}x_i^{\beta} \tag{6.15}$$

Stosując metodę największej wiarygodności parametry rozkładu otrzymano na podstawie zależności:

$$\frac{1}{\alpha} - \alpha^{\beta-1}\overline{(x-\varepsilon)^{\beta}} = 0 \tag{6.16}$$

$$\frac{1}{\beta} + \ln\alpha - \alpha^{\beta}\ln\beta\overline{(x-\varepsilon)^{\beta}} + \overline{\ln(x-\varepsilon)} = 0 \tag{6.17}$$

Wyniki obliczeń poszczególnych parametrów rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min} zamieszczono w tabeli 6.3. Obliczenia przeprowadzono dla każdego z analizowanych w pracy czasów trwania opadu.

Tabela 6.3.
Wyniki obliczeń wartości parametrów α, β i ε dla rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min}

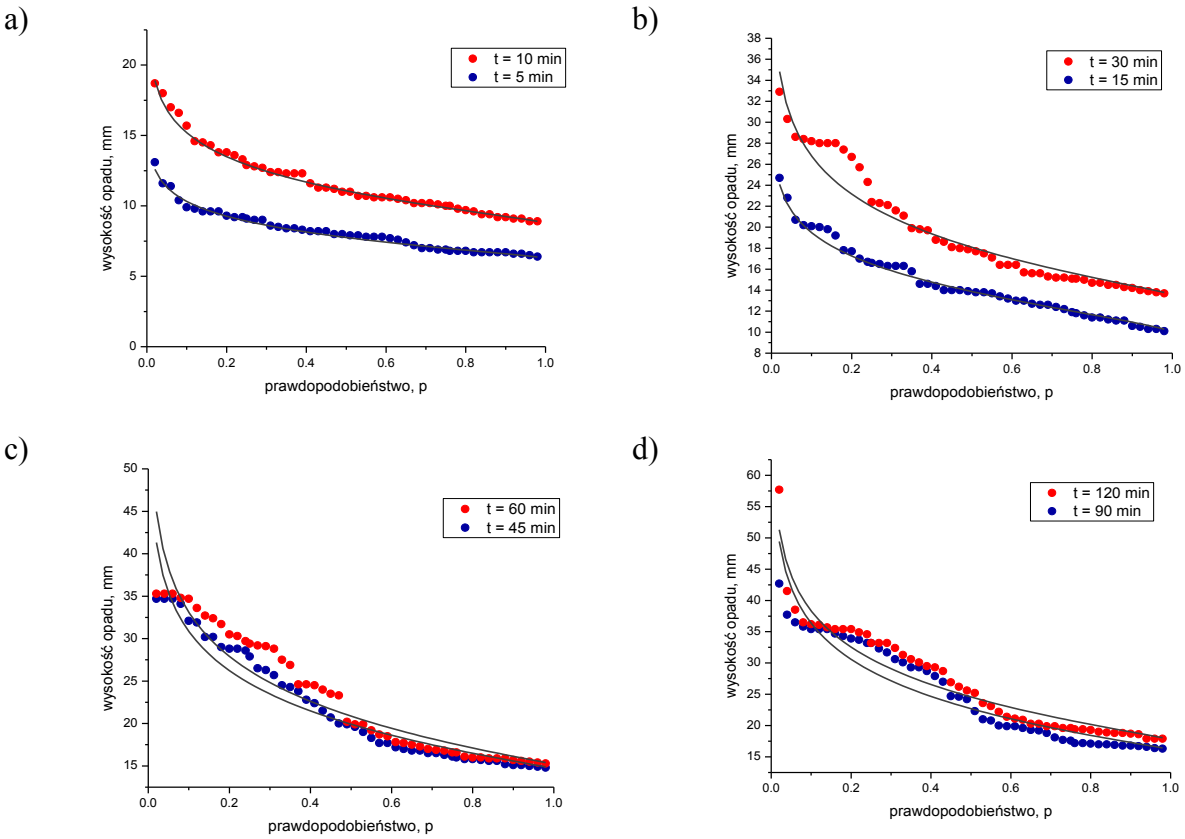
Czas	α	β	ε
5	0,503376	1,18278	6,3
10	0,320782	1,16026	8,8
15	0,196401	1,34052	10,0
30	0,160325	1,11385	13,6
45	0,135677	1,06204	14,7
60	0,12413	1,04341	15,2

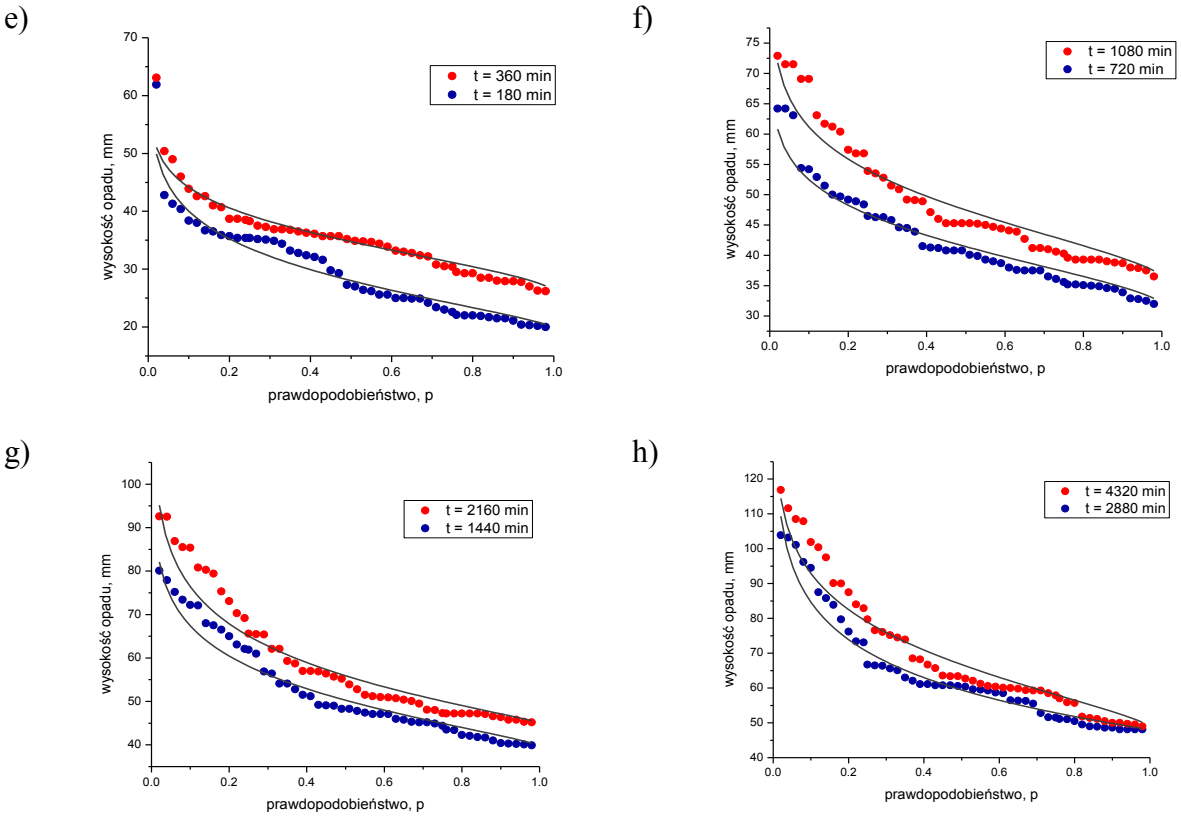
90	0,108774	1,06169	16,2
120	0,10521	1,08262	17,8
180	0,0933678	1,32258	19,9
360	0,092276	1,63626	26,1
720	0,0828666	1,56155	31,9
1080	0,0706237	1,49199	36,4
1440	0,0710197	1,23987	39,8
2160	0,0668598	1,12886	45,1
2880	0,0612652	1,03044	48,0
4320	0,0425464	1,32938	48,9

Kwantyle zmiennej losowej dla rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min} oblicza się za pomocą wzoru:

$$x_p = \varepsilon + \frac{1}{\alpha}(-\ln p)^{1/\beta} \tag{6.18}$$

Interpretację graficzną dystrybuant empirycznych (wynikających z pomiarów) oraz teoretycznych (wynikających z rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min}) przedstawiono na rysunku 6.3.





Rys. 6.3. Dystrybuanty teoretyczne rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min} największych wysokości opadów z 50-cio lecia (1960-2009) dla wszystkich analizowanych czasów trwania opadów (od 5 do 4320 minut)

6.2.3. Rozkład logarytmiczno-normalny

Funkcja gęstości rozkładu logarytmiczno-normalnego trójparametrowego (z dolnym ograniczeniem) występuje w następującej postaci [125]:

$$f(x) = \frac{1}{(x-\varepsilon)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{[\ln(x-\varepsilon)-\mu]^2}{2\sigma^2}\right] \tag{6.19}$$

skąd logarytm funkcji wiarygodności określa równanie:

$$\ln L = -\sum_{i=1}^{N} \ln x_i - N \ln \sigma - \frac{N}{2}\ln(2\pi) - \frac{1}{2\sigma^2}\sum_{i=1}^{N}(\ln x_i - \mu)^2 \tag{6.20}$$

Wykorzystując metodę największej wiarygodności parametry rozkładu otrzymano na podstawie zależności:

$$\mu = \overline{\ln(x-\varepsilon)} \tag{6.21}$$

$$\sigma = \left(\overline{(\ln(x-\varepsilon)-\mu)^2}\right)^{0,5} \tag{6.22}$$

Wyniki obliczeń poszczególnych parametrów rozkładu logarytmiczno-normalnego zestawiono w tabeli 6.4. Obliczenia przeprowadzono dla każdego z analizowanych czasów trwania opadu.

Tabela 6.4.
Wyniki obliczeń wartości parametrów μ, σ i ε dla rozkładu logarytmiczno-normalnego

Czas	μ	σ	ε
5	0,2760	0,9416	6,3
10	0,6675	1,0612	8,8
15	1,1609	1,0359	10,0
30	1,2122	1,2475	13,6
45	1,3174	1,3626	14,7
60	1,3797	1,4164	15,2
90	1,5057	1,4365	16,2
120	1,5480	1,4460	17,8
180	1,7635	1,2430	19,9
360	1,8608	1,0973	26,1
720	1,9388	1,0885	31,9
1080	2,0636	1,1084	36,4
1440	1,9698	1,3512	39,8
2160	1,9691	1,3980	45,1
2880	1,9857	1,6934	48,0
4320	2,4723	1,3540	48,9

Kwantyle zmiennej losowej dla rozkładu logarytmiczno-normalnego 3-parametrowego obliczono za pomocą wzoru:

$$x_p = \varepsilon + e^{\mu + t_p \sigma} \tag{6.23}$$

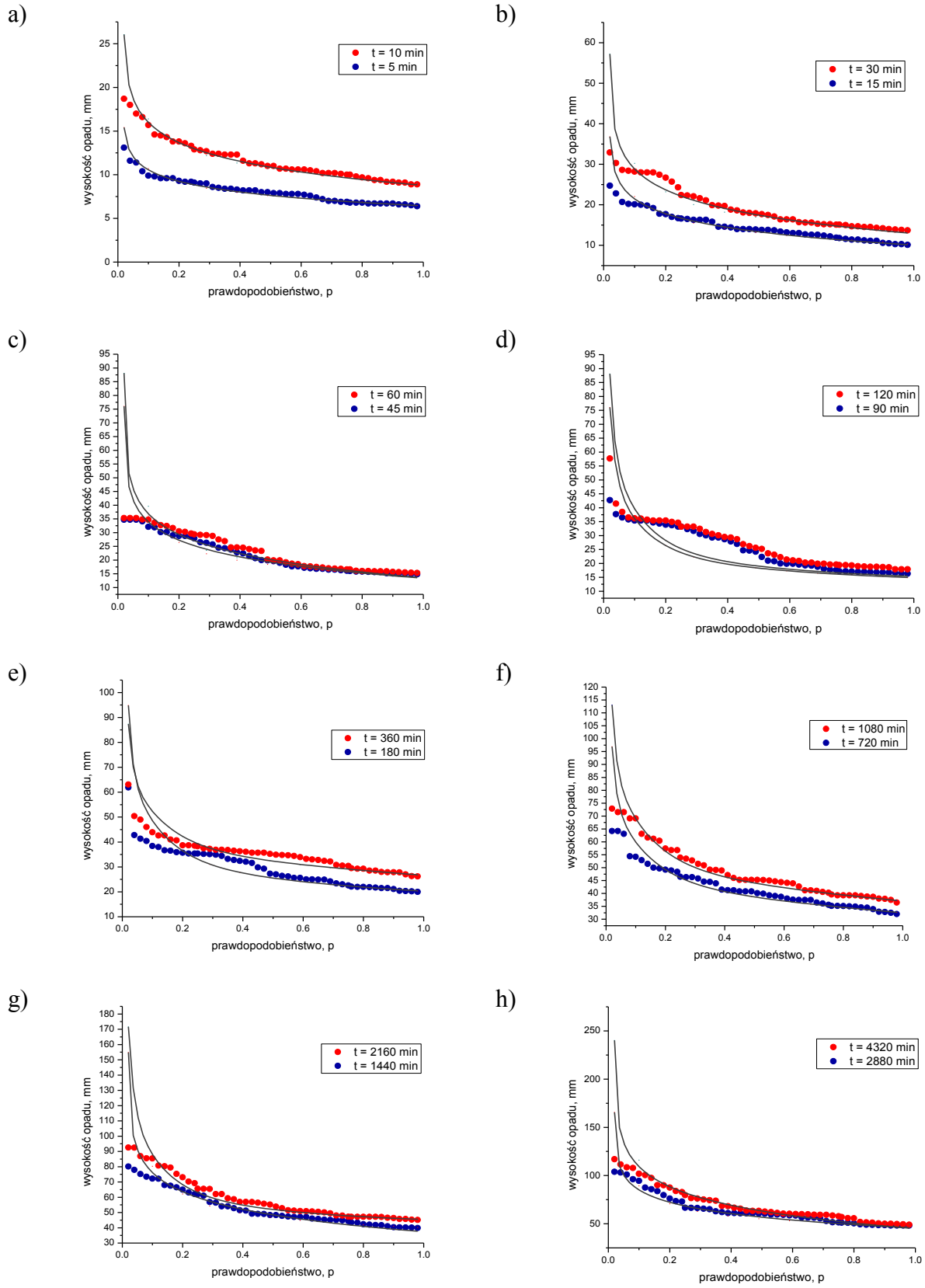
gdzie:

t_p - wartości kwantyli zmiennej standaryzowanej $t_p = \dfrac{\ln(x-\varepsilon)-\mu}{\sigma}$ (wg tab. 6.5).

Tabela 6.5.
Wartości kwantyli t_p dla standaryzowanego rozkładu logarytmiczno-normalnego [125]

p	t_p	p	t_p
0,001	3,090	0,6	-0,253
0,002	2,878	0,7	-0,524
0,005	2,567	0,8	-0,842
0,01	2,326	0,9	-1,282
0,02	2,054	0,95	-1,645
0,05	1,645	0,98	-2,054
0,1	1,282	0,99	-2,326
0,2	0,842	0,995	-2,567
0,3	0,524	0,998	-2,878
0,4	0,253	0,999	-3,090
0,5	0	-	-

Interpretację graficzną dystrybuant empirycznych (wynikających z pomiarów) oraz teoretycznych (wynikających z rozkładu logarytmiczno-normalnego) przedstawiono na rysunku 6.4.



Rys. 6.4. Dystrybuanty teoretyczne rozkładu logarytmiczno-normalnego największych wysokości opadów z 50-cio lecia (1960-2009) dla wszystkich analizowanych czasów trwania opadów (od 5 do 4320 minut)

6.2.4. Rozkład Pearsona typ III

Funkcja gęstości występuje w następującej postaci [125]:

$$f(x) = \frac{\alpha^{\lambda}}{\Gamma(\lambda)} e^{-\alpha(x-\varepsilon)} (x-\varepsilon)^{\lambda-1} \tag{6.24}$$

skąd logarytm funkcji wiarygodności:

$$\ln L = N\lambda \ln \alpha - N \ln \Gamma(\lambda) - \alpha \sum_{1}^{N} x_i + (\lambda - 1) \sum_{1}^{N} \ln x_i \tag{6.25}$$

Wykorzystując metodę największej wiarygodności parametry rozkładu otrzymano na podstawie zależności:

$$\ln \lambda - \psi(\lambda) = \ln \overline{(x-\varepsilon)} - \overline{\ln(x-\varepsilon)} = A_{\lambda} \tag{6.26}$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\overline{(x-\varepsilon)}} \tag{6.27}$$

gdzie:

$\psi(\lambda) = \dfrac{d \ln \Gamma(\lambda)}{d\lambda}$,

$\Gamma(\lambda)$ - funkcja gamma Eulera.

Wyniki obliczeń poszczególnych parametrów rozkładu Pearsona typ III przedstawiono w tabeli 6.6. Obliczenia wykonano dla każdego z analizowanych w pracy czasów trwania opadu.

Tabela 6.6

Wyniki obliczeń wartości parametrów λ, α i ε dla rozkładu Pearsona typ III

Czas	A_{λ}	λ	α	ε
5	0,360597	1,5370	0,8132	6,3
10	0,421013	1,3358	0,4498	8,8
15	0,381142	1,4615	0,3127	10,0
30	0,574215	1,0139	0,1699	13,6
45	0,654467	0,9047	0,1259	14,7
60	0,688704	0,8658	0,1094	15,2
90	0,688189	0,8663	0,0966	16,2
120	0,670775	0,8857	0,0963	17,8
180	0,509423	1,1267	0,1161	19,9
360	0,378429	1,4710	0,1567	26,1
720	0,406612	1,3784	0,1321	31,9
1080	0,442883	1,2764	0,1041	36,4
1440	0,59032	0,9896	0,0765	39,8
2160	0,679614	0,8757	0,0620	45,1
2880	0,793494	0,7670	0,0476	48,0
4320	0,574663	1,0132	0,0481	48,9

Kwantyle zmiennej losowej dla rozkładu Pearsona typ III obliczono za pomocą wzoru:

$$x_p = \varepsilon + \frac{1}{\alpha} t_p \tag{6.28}$$

gdzie:

t_p - wartości kwantyli standardowego rozkładu gamma wg tab. 6.7.

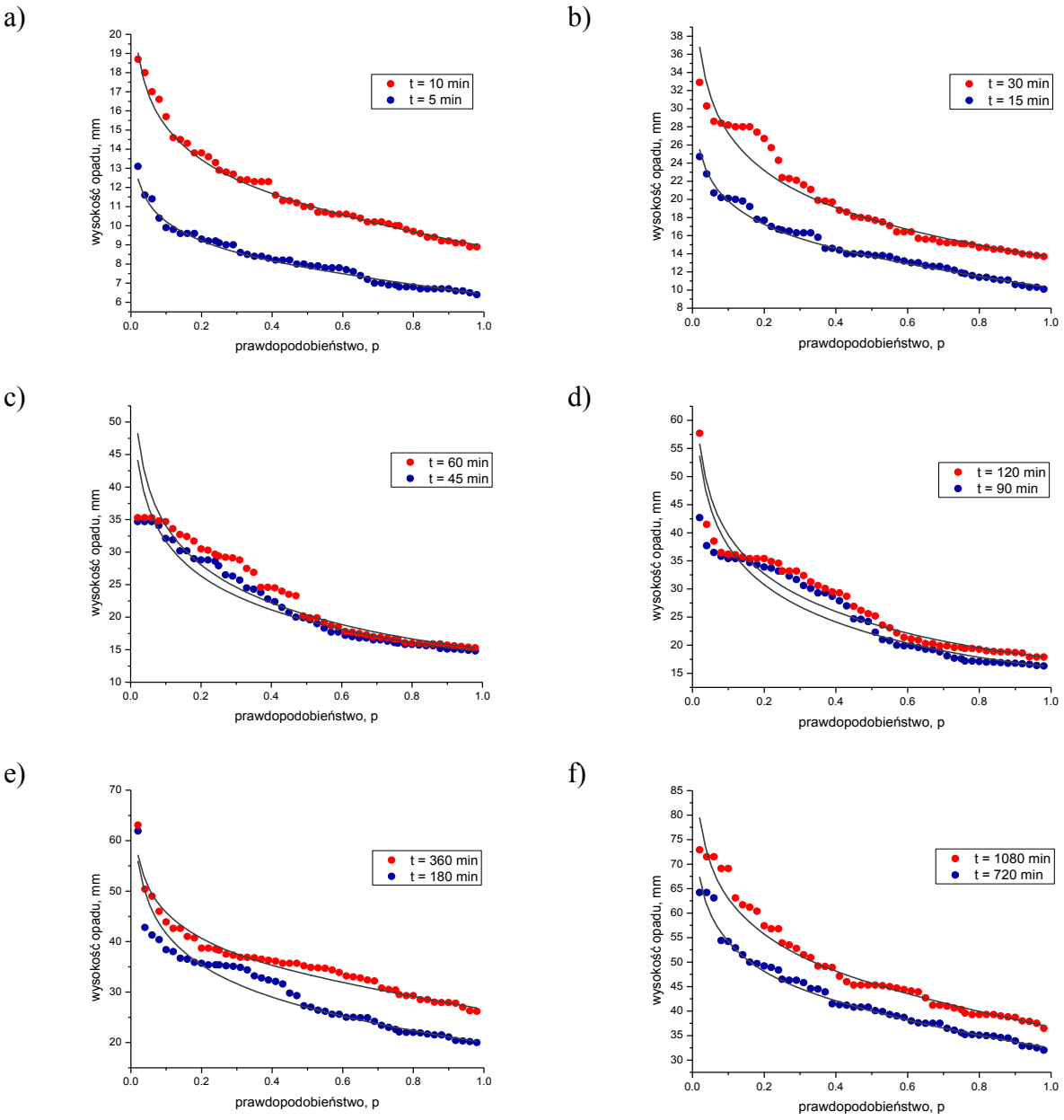
Tabela 6.7

Wartości kwantyli t_p dla standardowego rozkładu gamma

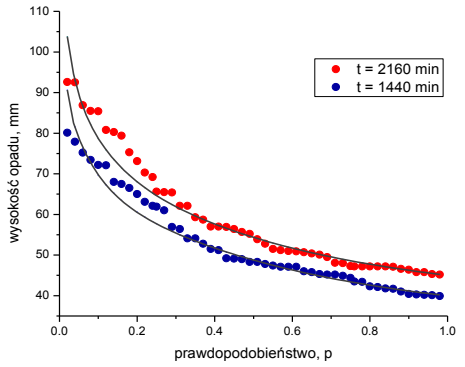
p	λ															
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00
0,02	1,887	2,706	3,348	3,912	4,431	4,919	5,385	5,834	6,270	6,694	7,109	7,517	7,917	8,311	8,700	9,084
0,04	1,369	2,109	2,698	3,219	3,700	4,156	4,592	5,013	5,422	5,822	6,214	6,599	6,978	7,352	7,721	8,085
0,06	1,084	1,769	2,321	2,813	3,270	3,703	4,119	4,522	4,914	5,298	5,675	6,045	6,410	6,770	7,126	7,478
0,08	0,892	1,532	2,056	2,526	2,963	3,379	3,780	4,168	4,547	4,918	5,283	5,642	5,996	6,346	6,692	7,034
0,10	0,750	1,353	1,852	2,303	2,724	3,126	3,513	3,890	4,258	4,618	4,973	5,322	5,667	6,009	6,346	6,681
0,12	0,640	1,209	1,687	2,120	2,527	2,917	3,293	3,659	4,017	4,369	4,715	5,056	5,393	5,727	6,058	6,385
0,14	0,551	1,089	1,547	1,966	2,361	2,739	3,105	3,462	3,811	4,155	4,493	4,827	5,157	5,484	5,808	6,130
0,16	0,478	0,987	1,428	1,833	2,215	2,583	2,940	3,289	3,630	3,966	4,298	4,625	4,949	5,270	5,588	5,904
0,18	0,416	0,899	1,323	1,715	2,087	2,445	2,794	3,134	3,468	3,798	4,123	4,444	4,762	5,077	5,390	5,700
0,20	0,363	0,821	1,230	1,609	1,971	2,321	2,661	2,994	3,322	3,645	3,964	4,279	4,592	4,902	5,209	5,515
0,22	0,318	0,752	1,146	1,514	1,866	2,207	2,540	2,866	3,188	3,504	3,817	4,128	4,435	4,740	5,043	5,344
0,24	0,278	0,690	1,070	1,427	1,770	2,103	2,429	2,748	3,063	3,374	3,682	3,987	4,290	4,590	4,888	5,185
0,25	0,261	0,662	1,034	1,386	1,725	2,054	2,376	2,693	3,005	3,313	3,618	3,920	4,221	4,519	4,815	5,109
0,27	0,228	0,608	0,967	1,309	1,639	1,961	2,276	2,587	2,893	3,196	3,496	3,793	4,089	4,382	4,674	4,965
0,29	0,200	0,560	0,906	1,238	1,560	1,874	2,183	2,487	2,788	3,085	3,380	3,673	3,964	4,254	4,541	4,828
0,31	0,175	0,515	0,849	1,171	1,485	1,792	2,094	2,393	2,688	2,981	3,271	3,559	3,846	4,131	4,415	4,698
0,33	0,153	0,474	0,796	1,109	1,414	1,715	2,011	2,304	2,594	2,881	3,167	3,451	3,734	4,015	4,295	4,574
0,35	0,134	0,437	0,746	1,050	1,348	1,642	1,932	2,219	2,504	2,787	3,068	3,347	3,626	3,903	4,179	4,455
0,37	0,116	0,402	0,700	0,994	1,285	1,572	1,856	2,138	2,418	2,696	2,972	3,248	3,522	3,796	4,068	4,340
0,39	0,101	0,369	0,656	0,942	1,225	1,505	1,784	2,060	2,335	2,608	2,881	3,152	3,422	3,692	3,961	4,229
0,41	0,088	0,339	0,615	0,892	1,167	1,442	1,714	1,985	2,255	2,524	2,792	3,059	3,326	3,592	3,857	4,122
0,43	0,076	0,311	0,576	0,844	1,113	1,380	1,647	1,913	2,178	2,443	2,707	2,970	3,232	3,495	3,756	4,018
0,45	0,065	0,285	0,539	0,799	1,060	1,322	1,583	1,844	2,104	2,364	2,623	2,883	3,141	3,400	3,658	3,916
0,47	0,056	0,261	0,504	0,755	1,009	1,265	1,520	1,776	2,032	2,287	2,543	2,798	3,053	3,308	3,562	3,817
0,49	0,047	0,238	0,470	0,713	0,961	1,210	1,460	1,710	1,961	2,212	2,464	2,715	2,966	3,217	3,469	3,720
0,51	0,040	0,217	0,439	0,673	0,914	1,157	1,401	1,647	1,893	2,139	2,386	2,634	2,881	3,129	3,377	3,625
0,53	0,034	0,197	0,408	0,635	0,868	1,105	1,344	1,584	1,826	2,068	2,311	2,554	2,798	3,042	3,286	3,531
0,55	0,028	0,179	0,380	0,598	0,824	1,055	1,288	1,523	1,760	1,998	2,237	2,476	2,716	2,956	3,197	3,438
0,57	0,024	0,161	0,352	0,562	0,781	1,006	1,234	1,464	1,696	1,929	2,164	2,399	2,635	2,872	3,109	3,347
0,59	0,019	0,145	0,326	0,528	0,740	0,958	1,180	1,405	1,632	1,861	2,092	2,323	2,555	2,788	3,022	3,256
0,61	0,016	0,130	0,301	0,494	0,699	0,911	1,128	1,348	1,570	1,794	2,020	2,248	2,476	2,705	2,935	3,166
0,63	0,013	0,116	0,277	0,462	0,660	0,866	1,076	1,291	1,508	1,728	1,950	2,173	2,397	2,623	2,849	3,077
0,65	0,010	0,103	0,254	0,431	0,622	0,821	1,026	1,235	1,448	1,663	1,880	2,099	2,319	2,541	2,764	2,988
0,67	0,008	0,091	0,232	0,400	0,584	0,777	0,976	1,180	1,387	1,597	1,810	2,025	2,241	2,459	2,678	2,898
0,69	0,006	0,080	0,211	0,371	0,547	0,733	0,926	1,125	1,327	1,532	1,740	1,951	2,163	2,377	2,592	2,809
0,71	0,005	0,069	0,191	0,342	0,511	0,690	0,877	1,070	1,267	1,468	1,671	1,877	2,085	2,294	2,506	2,719
0,73	0,004	0,060	0,172	0,315	0,476	0,648	0,829	1,016	1,207	1,403	1,601	1,802	2,006	2,211	2,419	2,628
0,75	0,003	0,051	0,153	0,288	0,441	0,606	0,780	0,961	1,147	1,337	1,531	1,727	1,926	2,127	2,331	2,535
0,76	0,002	0,047	0,145	0,274	0,424	0,585	0,756	0,934	1,117	1,304	1,495	1,689	1,886	2,085	2,286	2,489
0,78	0,002	0,039	0,128	0,248	0,389	0,544	0,708	0,879	1,057	1,238	1,424	1,613	1,805	1,999	2,195	2,394
0,80	0,001	0,032	0,111	0,223	0,356	0,503	0,660	0,824	0,995	1,171	1,351	1,535	1,722	1,911	2,103	2,297
0,82	0,001	0,026	0,096	0,198	0,322	0,461	0,611	0,769	0,933	1,103	1,277	1,455	1,637	1,821	2,008	2,197
0,84	0,000	0,020	0,081	0,174	0,289	0,420	0,562	0,712	0,870	1,033	1,201	1,373	1,549	1,727	1,909	2,093
0,86	0,000	0,016	0,067	0,151	0,256	0,378	0,511	0,654	0,804	0,960	1,122	1,287	1,457	1,630	1,806	1,984
0,88	0,000	0,011	0,055	0,128	0,223	0,336	0,460	0,594	0,736	0,885	1,039	1,198	1,360	1,527	1,696	1,869
0,90	0,000	0,008	0,042	0,105	0,190	0,292	0,407	0,532	0,665	0,805	0,951	1,102	1,257	1,417	1,579	1,745

0,92	0,000	0,005	0,031	0,083	0,157	0,247	0,351	0,466	0,589	0,720	0,856	0,998	1,145	1,296	1,451	1,609
0,94	0,000	0,003	0,021	0,062	0,123	0,201	0,292	0,394	0,506	0,625	0,751	0,882	1,019	1,160	1,305	1,454
0,96	0,000	0,001	0,012	0,041	0,087	0,150	0,226	0,314	0,411	0,516	0,628	0,746	0,870	0,999	1,131	1,268
0,98	0,000	0,000	0,005	0,020	0,049	0,092	0,148	0,215	0,291	0,376	0,468	0,567	0,672	0,782	0,897	1,016

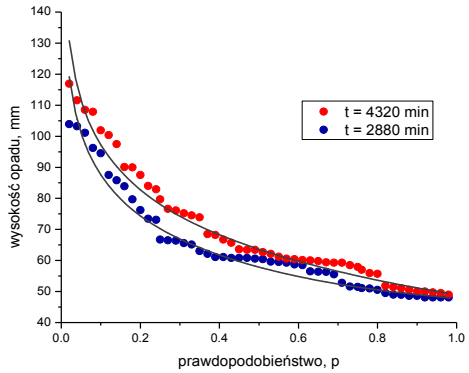
Interpretację graficzną dystrybuant empirycznych (wynikających z pomiarów) oraz teoretycznych (wynikających z rozkładu Pearsona typ III) przedstawiono na rysunku 6.5.



g)



h)



Rys. 6.5. Dystrybuanty teoretyczne rozkładu Pearsona typ III największych wysokości opadów z 50-cio lecia (1960-2009) dla wszystkich analizowanych czasów trwania opadów (od 5 do 4320 minut)

6.3. Testy zgodności rozkładów empirycznych z teoretycznymi

W celu sprawdzenia zgodności przyjętych rozkładów teoretycznych z rozkładem empirycznym przeprowadzono test zgodności λ-Kołmogorowa [131]. Test pozwala przyjąć lub odrzucić hipotezę zerową H_0 o zgodności omawianych w pracy rozkładów. Statystyka testu λ-Kołmogorowa wyraża się wzorem:

$$\lambda = D_{\max}\sqrt{N} \tag{6.29}$$

gdzie:

$D_{\max} = \max\left|p(m,N) - p\right|$ - maksymalna rozbieżność pomiędzy rozkładami.

Przy danym poziomie istotności α możemy z tablic statystycznych odczytać krytyczną wartość λ_{kr} statystyki λ-Kołmogorowa. Najważniejsze wartości kwantyli λ_{kr} dla rozkładu Kołmogorowa przedstawiono w tabeli 6.8.

Tabela 6.8.
Wybrane kwantyle rozkładu Kołmogorowa

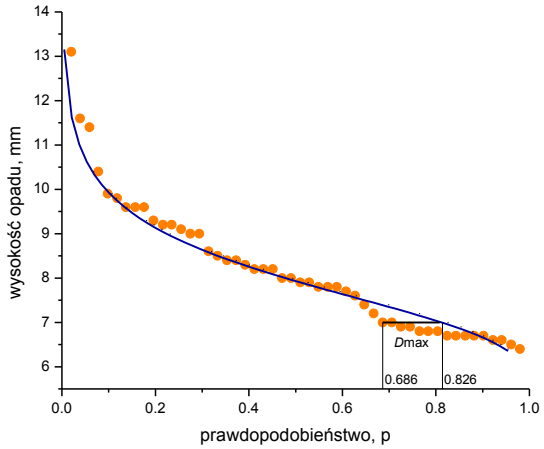
1-α	**λ_{kr}**	**1-α**	**λ_{kr}**
0,99	1,63	**0,80**	1,07
0,98	1,52	**0,70**	0,98
0,95	1,36	**0,60**	0,90
0,90	1,23	**0,50**	0,83

Hipotezę H_0 należy odrzucić, gdy $\lambda \geq \lambda_{kr}$. W przeciwnym przypadku analizowana próba nie przeczy hipotezie, weryfikowanej na poziomie istotności α. Przykładowo dla serii deszczy o czasie trwania 5 minut postawiono hipotezę, iż dane te pochodzą z rozkładu Fishera-Tippetta typ I_{max} (na poziomie istotności α = 0,05). Następnie obliczono największą różnicę pomiędzy rozkładami teoretycznym i empirycznym. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 6.9 oraz na rysunku 6.6.

Tabela 6.9.

Zestawienie wyników obliczeń do testu λ-Kołmogorowa dla serii deszczy 5-cio minutowych

Nr	$h_{max\,i}$	$p(m, N)$	p	D_{max}	Nr	$h_{max\,i}$	$p(m, N)$	p	D_{max}
1	13,1	0,020	0,005	0,015	**26**	7,9	0,510	0,527	0,017
2	11,6	0,039	0,021	0,018	**27**	7,9	0,529	0,527	0,002
3	11,4	0,059	0,027	0,032	**28**	7,8	0,549	0,561	0,012
4	10,4	0,078	0,068	0,010	**29**	7,8	0,569	0,561	0,008
5	9,9	0,098	0,107	0,009	**30**	7,8	0,588	0,561	0,027
6	9,8	0,118	0,117	0,001	**31**	7,7	0,608	0,595	0,013
7	9,6	0,137	0,139	0,002	**32**	7,6	0,627	0,630	0,003
8	9,6	0,157	0,139	0,018	**33**	7,4	0,647	0,699	0,052
9	9,6	0,176	0,139	0,037	**34**	7,2	0,667	0,765	0,098
10	9,3	0,196	0,181	0,015	**35**	**7,0**	**0,686**	**0,826**	**0,140**
11	9,2	0,216	0,197	0,019	**36**	7,0	0,706	0,826	0,120
12	9,2	0,235	0,197	0,038	**37**	6,9	0,725	0,854	0,129
13	9,1	0,255	0,214	0,041	**38**	6,9	0,745	0,854	0,109
14	9,0	0,275	0,232	0,043	**39**	6,8	0,765	0,879	0,114
15	9,0	0,294	0,232	0,062	**40**	6,8	0,784	0,879	0,095
16	8,6	0,314	0,320	0,006	**41**	6,8	0,804	0,879	0,075
17	8,5	0,333	0,346	0,013	**42**	6,7	0,824	0,902	0,078
18	8,4	0,353	0,373	0,020	**43**	6,7	0,843	0,902	0,059
19	8,4	0,373	0,373	0,000	**44**	6,7	0,863	0,902	0,039
20	8,3	0,392	0,401	0,009	**45**	6,7	0,882	0,902	0,020
21	8,2	0,412	0,431	0,019	**46**	6,7	0,902	0,902	0,000
22	8,2	0,431	0,431	0,000	**47**	6,6	0,922	0,922	0,000
23	8,2	0,451	0,431	0,020	**48**	6,6	0,941	0,922	0,019
24	8,0	0,471	0,494	0,023	**49**	6,5	0,961	0,939	0,022
25	8,0	0,490	0,494	0,004	**50**	6,4	0,980	0,954	0,026



Rys. 6.6. Sposób wyznaczania największej różnicy pomiędzy prawdopodobieństwami teoretycznym i empirycznym do testu λ-Kołmogorowa

W kolejnym kroku obliczono wg (6.29) statystykę $\lambda = D_{\max}\sqrt{N} = 0{,}140\sqrt{50} = 0{,}99$. Ponieważ na poziomie istotności α = 0,05 wartość krytyczna statystyki $\lambda_{kr} = 1{,}36$, więc $\lambda < \lambda_{kr}$. Nie ma zatem podstaw aby odrzucić hipotezę zerową. Podobne obliczenia przeprowadzono dla wszystkich analizowanych rozkładów prawdopodobieństwa dla każdego z 16-tu rozpatrywanych interwałów czasu. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 6.10.

Tabela 6.10.

Wartości statystyki testu λ-Kołmogorowa dla wszystkich analizowanych rozkładów prawdopodobieństwa

Czas	Rozkład prawdopodobieństwa			
	Fisher-	Fisher-	Log-	Pearson III

	Tippett I_{max}	Tippett III_{min}	normalny	
5	0,99	0,64	0,99	0,64
10	0,78	0,49	0,71	0,28
15	0,57	0,49	0,78	0,42
30	0,99	0,78	0,57	0,57
45	1,06	0,71	0,85	0,64
60	0,99	0,99	1,20	0,85
90	1,06	0,99	1,13	0,78
120	1,06	0,99	1,06	0,85
180	0,85	0,64	1,06	0,85
360	0,57	0,71	1,20	0,85
720	0,49	0,78	0,78	0,28
1080	0,85	1,06	0,85	0,57
1440	0,92	0,78	0,92	0,49
2160	0,99	0,99	0,71	0,42
2880	0,78	0,71	**1,41**	0,85
4320	0,92	0,92	1,27	0,57

W jednym przypadku (rozkład logarytmiczno-normalny, dla t = 2880 min) obliczona statystyka testu λ-Kołmogorowa jest większa niż 1,36. Oznacza to, iż na poziomie istotności α = 0,05 rozkład logarytmiczno-normalny nie nadaje się do opisu analizowanego zjawiska. W pozostałych przypadkach żadna z obliczonych statystyk nie jest większa niż 1,36. Przyjęto zatem, iż analizowane dane można opisać rozkładami Fishera-Tippetta typ I_{max}, Fishera-Tippetta typ III_{min} oraz Pearsona typ III (na poziomie istotności α = 0,05).

6.4. Kryteria wyboru modeli probabilistycznych do opisu opadów maksymalnych

W przypadku modeli szacowanych metodą największej wiarygodności (MNW) niemożliwe jest zdefiniowanie statystyki R^2. Istnieją natomiast kryteria informacyjne, które pozwalają ocenić jakość dopasowania, uwzględniając jednocześnie liczbę traconych w procesie estymacji stopni swobody. Najbardziej popularnymi z nich są: kryterium informacyjne Akaike (AIC - Akaike Information Criterion) i Bayesowskie kryterium informacyjne Schwartza (BIC - Bayes Information Criterion) [132,133,134]. Za najlepszy uznaje się ten model, dla którego kryterium informacyjne policzone jednym z poniższych wzorów uzyskuje wartość najniższą:

$$AIC = -\frac{2\ln L}{N} + \frac{2k}{N} \tag{6.30}$$

$$BIC = -\frac{2\ln L}{N} + \frac{k\ln N}{N} \tag{6.31}$$

gdzie:

L - funkcja wiarygodności analizowanej próby zmiennej losowej,

k - liczba estymowanych parametrów,

N - liczba obserwacji.

Oba kryteria składają się z dwóch części - pierwsza opisuje miarę dopasowania modelu, druga natomiast jego prostotę. Kryteria informacyjne pozwalają więc wybierać modele dobrze dopasowane, a zarazem możliwie jak najprostsze („nie przeuczone”). Różnica pomiędzy kryteriami AIC i BIC polega na innym wyrażeniu prostoty modelu, jednak w obu przypadkach element ten rośnie wraz ze wzrostem liczby parametrów. W literaturze sugeruje się, iż modele wybrane na podstawie kryterium AIC mogą zawierać zbyt duży zbiór zmiennych objaśniających [133]. W związku z tym w niniejszej pracy wykorzystano do wyboru modeli kryterium BIC.

W celu porównania opracowywanych modeli obliczono dla nich wartości kryterium informacyjnego BIC. Obliczone wartości przedstawiono w tabeli 6.11. W celu zwiększenia przejrzystości wyników dwie najmniejsze wartości dla każdego z analizowanych czasów pogrubiono. W związku z niewypełnieniem kryterium statystyki λ-Kołmogorowa w rozważaniach nie brano pod uwagę rozkładu logarytmiczno-normalnego.

Tabela 6.11.
Wartości kryterium informacyjnego BIC dla analizowanych rozkładów prawdopodobieństwa

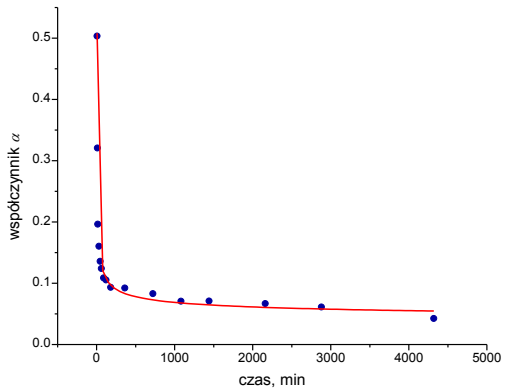
Czas	**Rozkład prawdopodobieństwa**		
	Fisher-Tippett I_{max}	Fisher-Tippett III_{min}	Pearson III
5	3,402	**3,289**	**3,278**
10	4,379	**4,229**	**4,237**
15	5,182	**5,089**	**5,109**
30	6,018	**5,688**	**5,679**
45	6,449	**6,061**	**6,044**
60	6,654	**6,251**	**6,215**
90	6,879	**6,507**	**6,467**
120	6,906	**6,563**	**6,521**
180	6,820	**6,677**	**6,638**
360	**6,492**	6,548	**6,501**
720	6,834	**6,811**	**6,738**
1080	7,265	**7,180**	**7,080**
1440	7,504	**7,285**	**7,222**
2160	7,839	**7,460**	**7,378**
2880	8,040	**7,676**	**7,590**
4320	8,436	**8,298**	**8,200**

Kryterium informacyjne BIC nie wskazuje jednoznacznie najlepszego modelu (różnice pomiędzy niektórymi modelami są bardzo małe), wyraźnie natomiast pokazuje, iż rozkład Fishera-Tippetta typ I_{max} odstaje jakościowo od dwóch pozostałych. Dalszej analizie poddano zatem jedynie dwa rozkłady Fishera-Tippetta typ III_{min} oraz Pearsona typ III, jako najlepsze.

6.5. Modele probabilistyczne opadów maksymalnych

6.5.1. Model I - oparty na rozkładzie Fishera-Tippetta typ III_{min}

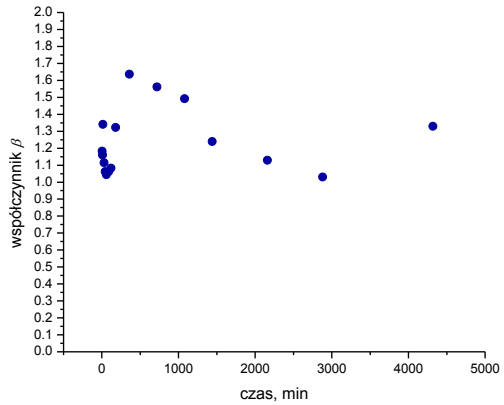
Wyniki obliczeń poszczególnych parametrów rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min} podano w tabeli 6.3. Na ich podstawie sporządzono wykresy (rys. 6.7 ÷ 6.9), przedstawiające zależności omawianych parametrów (współczynników) od czasu trwania opadu.



Rys. 6.7. Zależność współczynnika α od czasu trwania opadów dla rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min}

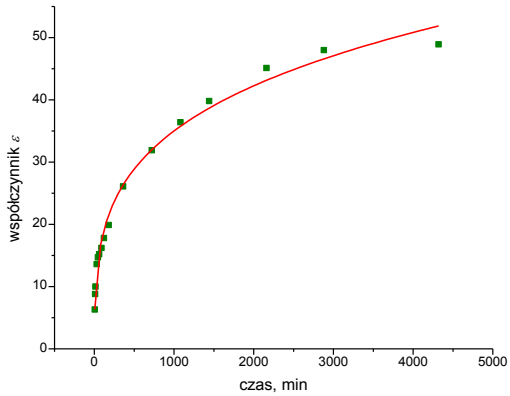
Zależność współczynnika α od czasu trwania opadu opisano (przy R=0,993) funkcją:

$$\alpha = \left(97{,}105t^{0.0222} - 98.675\right)^{-1} \tag{6.32}$$



Rys. 6.8. Zależność współczynnika β od czasu trwania opadów dla rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min}

Z uwagi na praktyczny brak trendu zależności parametru β od czasu trwania opadu dla rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min} (rys. 6.8), do dalszych obliczeń przyjęto, uśrednioną wartość $\overline{\beta} = 1{,}2367$ (wartości β wahają się od 1,030 do 1,636).



Rys. 6.9. Zależność współczynnika ε od czasu trwania opadów dla rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min}

Zależność współczynnika ε od czasu trwania opadu opisano (przy R = 0,996) funkcją:

$$\varepsilon = -4{,}583 + 7{,}412t^{0{,}242} \tag{6.33}$$

Ostatecznie, kwantyl x_p - I model probabilistyczny oparty na rozkładzie Fishera-Tippetta typ III_{min} przyjmie postać ($x_p = h_{max}$):

$$x_p = \varepsilon + \frac{1}{\alpha}\left(-\ln p\right)^{1/\beta} = -4{,}583 + 7{,}412t^{0{,}242} + \left(97{,}105t^{0.0222} - 98.675\right)\left(-\ln p\right)^{0{,}809} \tag{6.34}$$

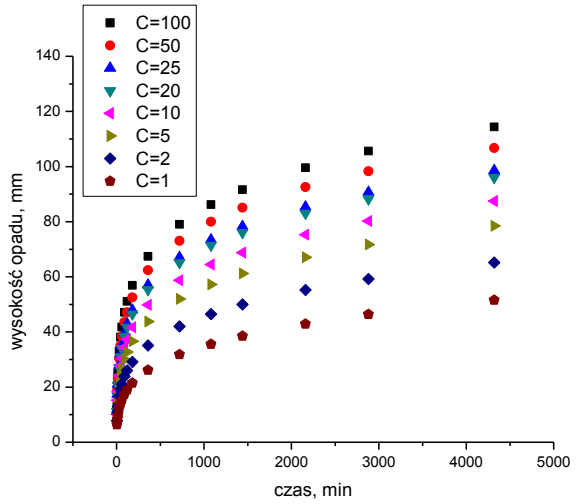
Wyniki obliczeń maksymalnych wysokości opadów obliczone z I modelu – wzoru (6.34) dla charakterystycznych wartości prawdopodobieństwa p zestawiono w tabeli 6.12.

Interpretację graficzną tych wyników przedstawiono na rysunku 6.10 - w skali normalnej i na rysunku 6.11 - w logarytmicznej skali czasu trwania opadów.

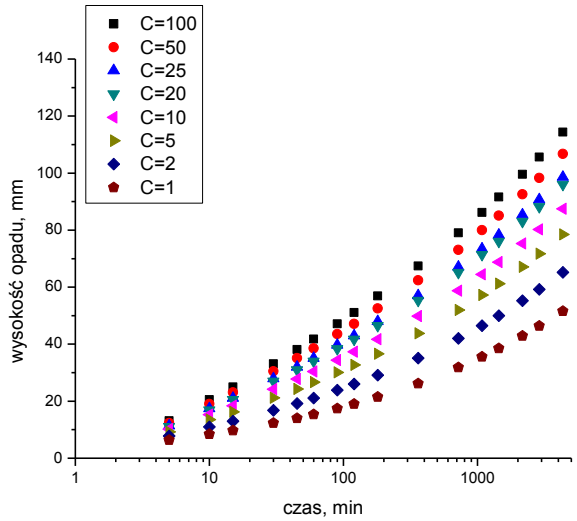
Tabela 6.12

Wysokości opadów maksymalnych obliczone z I modelu probabilistycznego (6.34) dla charakterystycznych wartości prawdopodobieństwa *p*

P	**Czas trwania opadu, min**															
	5	10	15	30	45	60	90	120	180	360	720	1080	1440	2160	2880	4320
0,01	13,1	20,5	25,0	33,1	38,1	41,8	47,1	51,1	56,9	67,4	79,0	86,2	91,6	99,6	105,6	114,4
0,02	12,3	19,0	23,1	30,5	35,1	38,5	43,5	47,1	52,5	62,4	73,1	80,0	85,1	92,6	98,3	106,7
0,04	11,4	17,4	21,1	27,9	32,0	35,1	39,7	43,0	48,0	57,1	67,1	73,5	78,3	85,4	90,7	98,6
0,05	11,1	16,9	20,5	27,0	31,0	34,0	38,4	41,7	46,5	55,3	65,1	71,4	76,0	83,0	88,2	96,0
0,10	10,2	15,3	18,4	24,2	27,8	30,4	34,4	37,3	41,7	49,8	58,7	64,5	68,8	75,3	80,2	87,5
0,20	9,2	13,5	16,2	21,2	24,3	26,7	30,1	32,7	36,6	43,8	52,0	57,2	61,2	67,1	71,7	78,5
0,50	7,8	11,0	13,0	16,8	19,2	21,1	23,9	26,0	29,1	35,1	42,0	46,5	50,0	55,2	59,2	65,2
1,00	6,4	8,4	9,7	12,3	14,0	15,4	17,4	19,0	21,5	26,2	31,8	35,6	38,5	42,9	46,4	51,6



Rys. 6.10. Zbiorcze zestawienie krzywych wysokości opadów (DDF) obliczonych z I modelu probabilistycznego



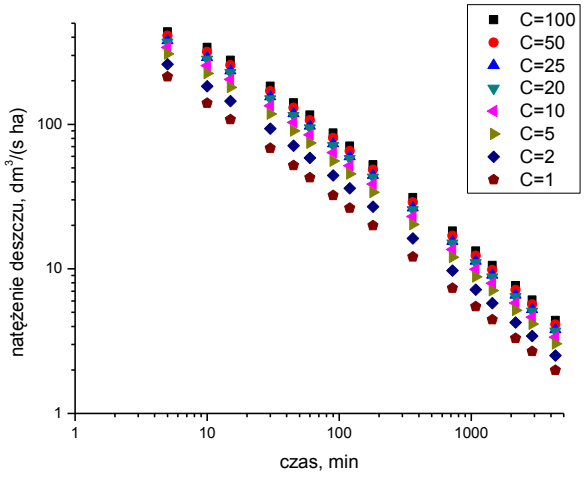
Rys. 6.11. Zbiorcze zestawienie krzywych wysokości opadów (DDF) obliczonych z I modelu probabilistycznego w logarytmicznej skali czasu trwania opadów

Obliczone wysokości opadów maksymalnych (w tab. 6.12) przeliczono następnie na maksymalne natężenia jednostkowe deszczu i przedstawiono w tabeli 6.13 oraz na rysunku 6.12.

Tabela 6.13.

Maksymalne natężenia jednostkowe deszczy (przeliczone z I modelu probabilistycznego) dla charakterystycznych wartości prawdopodobieństwa *p*

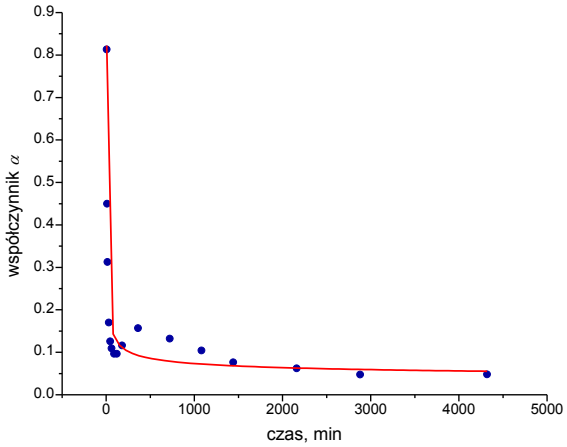
P	**Czas trwania opadu, min**															
	5	10	15	30	45	60	90	120	180	360	720	1080	1440	2160	2880	4320
0.01	436,7	341,7	277,8	183,9	141,1	116,1	87,2	71,0	52,7	31,2	18,3	13,3	10,6	7,7	6,1	4,4
0.02	410,0	316,7	256,7	169,4	130,0	106,9	80,6	65,4	48,6	28,9	16,9	12,3	9,8	7,1	5,7	4,1
0.04	380,0	290,0	234,4	155,0	118,5	97,5	73,5	59,7	44,4	26,4	15,5	11,3	9,1	6,6	5,2	3,8
0.05	370,0	281,7	227,8	150,0	114,8	94,4	71,1	57,9	43,1	25,6	15,1	11,0	8,8	6,4	5,1	3,7
0.10	340,0	255,0	204,4	134,4	103,0	84,4	63,7	51,8	38,6	23,1	13,6	10,0	8,0	5,8	4,6	3,4
0.20	306,7	225,0	180,0	117,8	90,0	74,2	55,7	45,4	33,9	20,3	12,0	8,8	7,1	5,2	4,1	3,0
0.50	260,0	183,3	144,4	93,3	71,1	58,6	44,3	36,1	26,9	16,3	9,7	7,2	5,8	4,3	3,4	2,5
1.00	213,3	140,0	107,8	68,3	51,9	42,8	32,2	26,4	19,9	12,1	7,4	5,5	4,5	3,3	2,7	2,0



Rys. 6.12. Zbiorcze zestawienie krzywych natężenia deszczy (IDF) obliczonych z I modelu probabilistycznego

6.5.2. Model II - oparty na rozkładzie Pearsona typ III

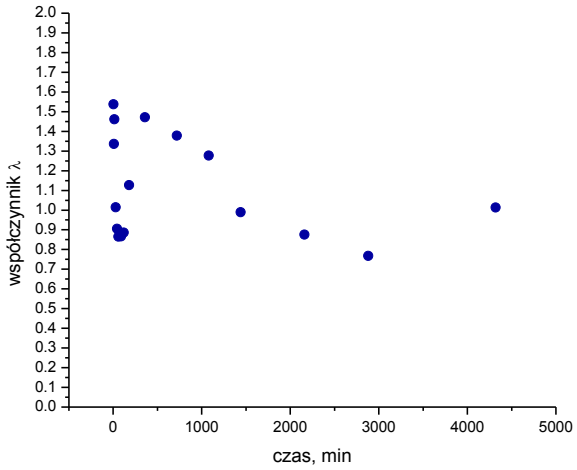
Wyniki obliczeń poszczególnych parametrów rozkładu Pearsona typ III przedstawiono w tabeli 6.6. Na podstawie tych wyników sporządzono wykresy zależności omawianych parametrów – współczynników od czasu trwania opadu i przedstawiono je na rysunkach 6.13 ÷ 6.15.



Rys. 6.13. Zależność współczynnika α od czasu trwania opadów dla rozkładu Pearsona typ III

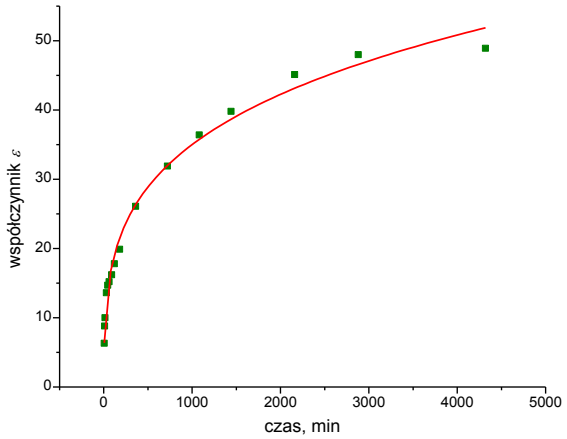
Zależność parametru rozkładu - współczynnika α od czasu trwania opadu opisano (przy R = 0,982) funkcją:

$$\alpha = \left(20{,}713t^{0{,}0797} - 22{,}332\right)^{-1} \tag{6.35}$$



Rys. 6.14. Zależność współczynnika λ od czasu trwania opadów dla rozkładu Pearsona typ III

Poszczególne wartości λ wahają się od 0,767 do 1,537 (rys. 6.14). Z uwagi na bardzo słaby trend zależności λ od czasu, a praktycznie jego brak, do dalszych obliczeń przyjęto jedną, uśrednioną wartość $\overline{\lambda} = 1{,}110$.



Rys. 6.15. Zależność współczynnika ε od czasu trwania opadów dla rozkładu Pearsona typ III

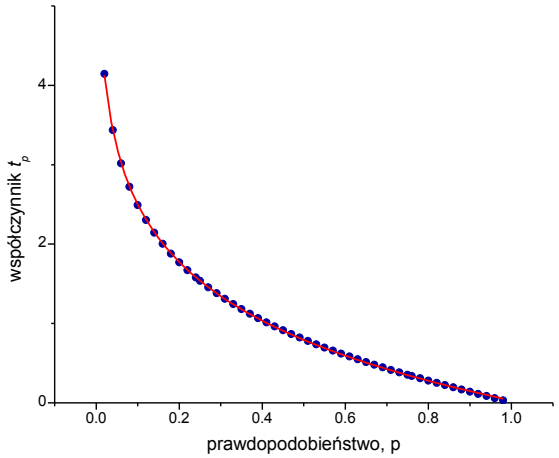
Zależność współczynnika ε od czasu trwania opadu opisano (przy $R = 0{,}996$) funkcją:

$$\varepsilon = -4{,}583 + 7{,}412 t^{0{,}242} \tag{6.36}$$

Kwantyl rozkładu Pearsona typ III zgodnie z (6.28) przyjmie postać $x_p = \varepsilon + \frac{1}{\alpha} t_p$, gdzie t_p zależy od współczynnika λ. Zależność t_p dla współczynnika $\lambda = 1{,}110$ opisano (przy R ≈ 1) wzorem:

$$t_p = 26{,}011\left(1 - p^{0{,}0441}\right) \tag{6.37}$$

i przedstawiono na rysunku 6.16.



Rys. 6.16. Zależność współczynnika t_p od prawdopodobieństwa p
przy $\lambda = 1{,}110$ dla rozkładu Pearsona typ III

Ostatecznie II model probabilistyczny, oparty na rozkładzie Pearsona typ III, przyjmie postać kwantyla ($x_p = h_{max}$):

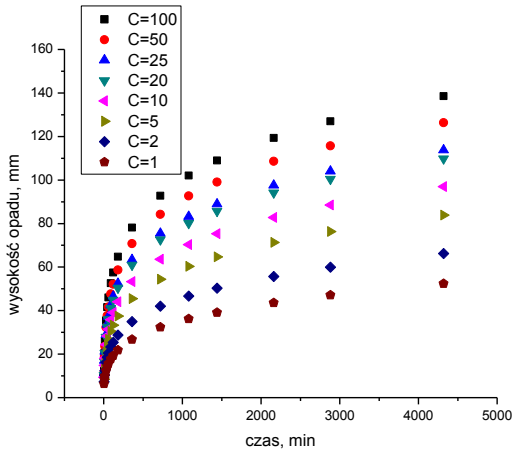
$$x_p = 7{,}412\, t^{0{,}242} - 4{,}583 + 26{,}011\left(20{,}713\, t^{0{,}0797} - 22{,}332\right)\left(1 - p^{0{,}0441}\right) \tag{6.38}$$

Wyniki obliczeń maksymalnych wysokości opadów dla charakterystycznych wartości prawdopodobieństwa *p* ich występowania uzyskiwane za pomocą II modelu probabilistycznego - wzoru (6.38) zestawiono w tabeli 6.14. Interpretację graficzną tych wyników przedstawiono na rysunkach: 6.17 - w skali normalnej oraz 6.18 - w logarytmicznej skali czasu trwania opadów.

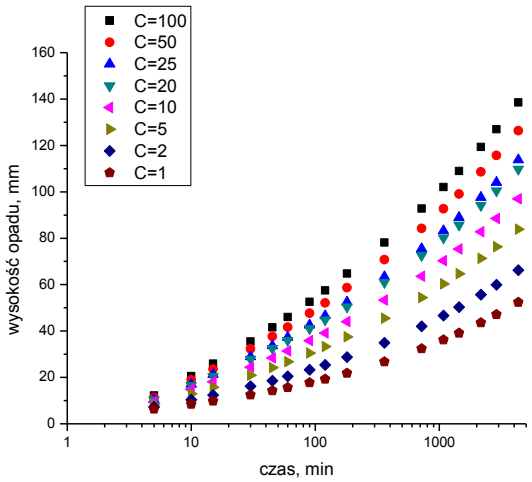
Tabela 6.14

Wysokości opadów maksymalnych obliczone z II modelu probabilistycznego (6.38) dla charakterystycznych wartości prawdopodobieństwa *p*

p	**Czas trwania opadu, min**															
	5	10	15	30	45	60	90	120	180	360	720	1080	1440	2160	2880	4320
0,01	12,2	20,6	25,8	35,4	41,4	45,8	52,4	57,3	64,5	77,8	92,4	101,6	108,5	118,8	126,4	137,8
0,02	11,4	18,9	23,6	32,2	37,6	41,6	47,6	52,0	58,6	70,6	84,0	92,5	98,9	108,3	115,4	125,9
0,04	10,5	17,1	21,3	28,9	33,7	37,3	42,6	46,6	52,4	63,3	75,4	83,1	88,9	97,5	104,0	113,7
0,05	10,3	16,6	20,5	27,8	32,5	35,9	41,0	44,8	50,4	60,9	72,6	80,1	85,6	94,0	100,3	109,7
0,10	9,4	14,8	18,2	24,4	28,4	31,4	35,8	39,1	44,1	53,3	63,6	70,3	75,3	82,8	88,4	96,9
0,20	8,5	12,9	15,7	20,9	24,2	26,7	30,5	33,3	37,5	45,4	54,4	60,2	64,6	71,2	76,2	83,8
0,50	7,3	10,4	12,3	16,1	18,5	20,4	23,2	25,3	28,5	34,7	41,8	46,4	50,0	55,4	59,5	65,7
1,00	6,4	8,4	9,7	12,3	14,0	15,4	17,4	19,0	21,5	26,2	31,8	35,6	38,5	42,9	46,4	51,6



Rys. 6.17. Zbiorcze zestawienie krzywych wysokości opadów (DDF) obliczonych z II modelu probabilistycznego

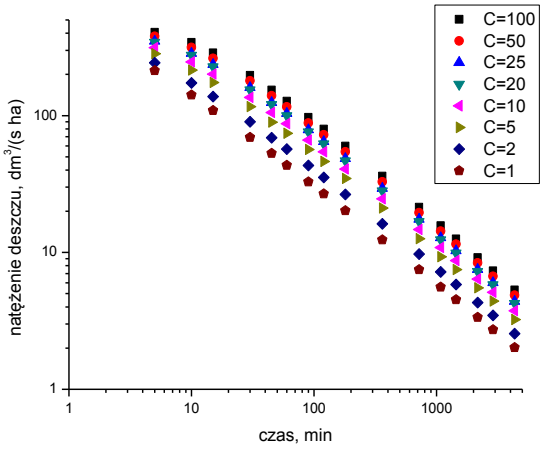


Rys. 6.18. Zbiorcze zestawienie krzywych wysokości opadu (DDF) obliczonych z II modelu probabilistycznego w logarytmicznej skali czasu trwania opadów

Obliczone wysokości opadów maksymalnych z II modelu probabilistycznego (6.38), przeliczone na natężenia jednostkowe, przedstawiono w tabeli 6.15 oraz na rysunku 6.19.

Tabela 6.15.
Maksymalne natężenia jednostkowe deszczy przeliczone z II modelu probabilistycznego (6.38) dla charakterystycznych wartości prawdopodobieństwa *p*

p	Czas trwania opadu, min															
	5	10	15	30	45	60	90	120	180	360	720	1080	1440	2160	2880	4320
0,01	405,7	342,7	286,7	196,6	153,3	127,4	97,1	79,6	59,7	36,0	21,4	15,7	12,6	9,2	7,3	5,3
0,02	379,0	314,7	262,0	178,9	139,4	115,7	88,1	72,2	54,2	32,7	19,5	14,3	11,4	8,4	6,7	4,9
0,04	351,5	285,8	236,6	160,7	125,0	103,7	78,9	64,7	48,6	29,3	17,5	12,8	10,3	7,5	6,0	4,4
0,05	342,4	276,3	228,2	154,7	120,2	99,7	75,9	62,2	46,7	28,2	16,8	12,4	9,9	7,3	5,8	4,2
0,10	313,7	246,2	201,7	135,7	105,2	87,2	66,3	54,3	40,8	24,7	14,7	10,8	8,7	6,4	5,1	3,7
0,20	284,2	215,1	174,4	116,1	89,8	74,3	56,4	46,2	34,7	21,0	12,6	9,3	7,5	5,5	4,4	3,2
0,50	243,7	172,6	137,0	89,3	68,6	56,6	42,9	35,1	26,4	16,0	9,7	7,2	5,8	4,3	3,4	2,5
1,00	212,0	139,3	107,7	68,3	52,0	42,7	32,3	26,4	19,9	12,1	7,4	5,5	4,5	3,3	2,7	2,0



Rys. 6.19. Zbiorcze zestawienie krzywych natężenia deszczy (IDF) obliczonych z II modelu probabilistycznego

6.6. Ocena jakościowa i ilościowa probabilistycznych i fizykalnych modeli opadów

Poniżej zestawiono dwie postacie opracowanych modeli probabilistycznych opadów maksymalnych dla stacji IMGW Wrocław-Strachowice (na podstawie 50 lat obserwacji) przy zastosowaniu drugiej metodologii interpretacji i uogólnień wyników pomiarów:

- I model probabilistyczny (6.34):

$$h_{\max}(t,p) = -4{,}583 + 7{,}412\,t^{0{,}242} + \left(97{,}105\,t^{0.0222} - 98.675\right)\left(-\ln p\right)^{0{,}809}$$

- II model probabilistyczny (6.38):

$$h_{\max}(t,p) = 7{,}412\,t^{0{,}242} - 4{,}583 + 26{,}011\left(20{,}713\,t^{0{,}0797} - 22{,}332\right)\left(1 - p^{0{,}0441}\right)$$

W tabeli 6.16 przedstawiono dane z pomiarów oraz wyniki obliczeń maksymalnych jednostkowych natężeń deszczy *q* z dwóch modeli probabilistycznych (6.34) i (6.38) oraz

modelu fizykalnego (5.26) opracowanego w poprzednim rozdziale pracy, na tle wyników obliczeń z modeli innych autorów.

Tabela 6.16.

Porównanie wyników obliczeń maksymalnych natężeń (q) deszczy obliczonych z modeli probabilistycznych I i II oraz z modelu fizykalnego IV z danymi pomiarowymi dla wybranych częstości (C = 1÷100 lat) występowania opadów, na tle wyników obliczeń z modeli innych autorów

Częstość, *C*	**Czas, *t***	**Dane z pomiarów**	**Modele probabilistyczne**		**Model fizykalny**	**Bogdanowicz-Stachy (2.11)**	**Stachy** Wrocław-Strachowice **(2.21)**	**Sowiński (2.28)**	**Licznar-Łomotowski** Wrocław-Swojec **(2.29)**
			Model I (6.34)	**Model II (6.38)**	**Model IV (5.26)**				
lata	min	$dm^3/(s \cdot ha)$							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
***C* = 1**	5	213,3	212,0	212,0	202,6	80,5	*	*	186,7
	10	148,3	139,3	139,3	148,4	50,6	*	*	128,2
	15	112,2	107,7	107,7	114,8	38,6	*	*	98,8
	30	76,1	68,3	68,3	71,7	24,2	*	*	60,4
	45	54,8	52,0	52,0	53,8	18,5	*	*	44,8
	60	42,5	42,7	42,7	43,8	15,2	*	*	36,3
	90	30,2	32,3	32,3	32,7	11,6	*	*	27,2
	120	24,9	26,4	26,4	26,5	9,6	*	*	22,4
	180	18,5	19,9	19,9	19,7	7,3	*	*	17,4
	360	12,1	12,1	12,1	11,9	4,6	*	*	*
	720	7,4	7,4	7,4	7,2	2,9	*	*	*
	1080	5,6	5,5	5,5	5,3	2,2	*	*	*
	1440	4,6	4,5	4,5	4,3	1,8	*	*	*
	2160	3,5	3,3	3,3	3,2	1,4	*	*	*
	2880	2,8	2,7	2,7	2,6	1,1	*	*	*
	4320	1,9	2,0	2,0	1,9	0,9	*	*	*
***C* = 2**	5	266,7	260,6	243,7	273,8	273,2	292,8	*	214,3
	10	183,3	182,9	172,6	200,5	185,2	182,8	170,4	172,3
	15	154,4	144,4	137,0	155,4	144,1	138,7	137,5	141,3
	30	99,4	93,3	89,3	96,9	90,9	86,6	79,9	86,3
	45	73,7	71,2	68,6	72,7	68,5	65,7	55,0	59,7
	60	56,1	58,6	56,6	59,2	55,7	54,0	41,7	45,5
	90	44,8	44,2	42,9	44,2	41,4	41,0	27,6	32,2
	120	35,6	36,0	35,1	35,8	33,4	33,7	*	26,8
	180	25,3	27,0	26,4	26,7	23,9	*	*	22,9
	360	16,3	16,3	16,0	16,1	13,5	*	*	*
	720	9,4	9,7	9,7	9,7	7,6	*	*	*
	1080	7,0	7,2	7,2	7,2	5,8	*	*	*
	1440	5,6	5,8	5,8	5,8	4,8	*	*	*
	2160	4,3	4,3	4,3	4,3	3,6	*	*	*
	2880	3,5	3,4	3,4	3,5	2,9	*	*	*
	4320	2,4	2,5	2,5	2,6	2,2	*	*	*
***C* = 5**	5	310,0	308,1	284,2	343,2	395,6	409,8	*	321,4
	10	230,0	225,6	215,1	251,4	270,8	255,8	250,1	238,0
	15	196,7	180,3	174,4	194,8	211,1	194,2	198,7	185,9
	30	148,3	117,7	116,1	121,4	133,3	121,2	114,8	108,4
	45	106,7	90,1	89,8	91,1	100,2	92,0	79,0	75,8
	60	84,7	74,0	74,3	74,2	81,4	75,6	57,7	58,8
	90	62,8	55,8	56,4	55,4	60,3	57,4	39,9	42,3
	120	49,2	45,4	46,2	44,9	48,6	47,2	*	34,7
	180	33,1	33,9	34,7	33,4	34,4	*	*	28,1
	360	17,9	20,3	21,0	20,1	19,1	*	*	*
	720	11,4	12,0	12,6	12,1	10,6	*	*	*
	1080	8,9	8,8	9,3	9,0	8,1	*	*	*
	1440	7,5	7,1	7,5	7,3	6,7	*	*	*
	2160	5,6	5,2	5,5	5,4	5,0	*	*	*
	2880	4,4	4,1	4,4	4,4	4,1	*	*	*
	4320	3,4	3,0	3,2	3,2	3,0	*	*	*
[illegible]	5	330,0	340,4	313,7	390,0	468,9	487,3	*	486,9

	10	261,7	254,6	246,2	285,7	322,0	304,2	310,7	270,9
	15	223,3	204,7	201,7	221,4	251,3	230,9	244,0	212,1
	30	156,7	134,3	135,7	138,0	158,7	144,1	139,5	140,4
	45	118,9	102,8	105,2	103,6	119,3	109,4	96,2	107,3
	60	96,4	84,6	87,2	84,3	96,8	89,9	72,9	86,5
	90	65,6	63,7	66,3	62,9	71,6	68,3	48,5	60,1
	120	50,3	51,8	54,3	51,1	57,6	56,1	*	43,0
	180	35,6	38,6	40,8	38,0	40,7	*	*	21,1
	360	20,3	23,0	24,7	22,9	22,5	*	*	*
	720	12,5	13,6	14,7	13,8	12,4	*	*	*
	1080	10,7	10,0	10,8	10,2	9,5	*	*	*
	1440	8,4	8,0	8,7	8,3	7,8	*	*	*
	2160	6,6	5,8	6,4	6,1	5,9	*	*	*
	2880	5,5	4,6	5,1	5,0	4,8	*	*	*
	4320	3,9	3,4	3,7	3,7	3,5	*	*	*
***C* = 25**	5	386,7	380,4	351,5	449,3	552,9	585,1	*	*
	10	300,0	290,5	285,8	329,1	380,6	365,2	*	*
	15	253,3	234,9	236,6	255,0	297,2	277,2	*	*
	30	168,3	154,8	160,7	159,0	187,7	173,0	*	*
	45	128,5	118,7	125,0	119,3	141,0	131,3	*	*
	60	98,1	97,6	103,7	97,1	114,4	108,0	*	*
	90	69,8	73,4	78,9	72,5	84,6	82,0	*	*
	120	57,6	59,8	64,7	58,8	68,0	67,4	*	*
	180	39,6	44,4	48,6	43,8	48,0	*	*	*
	360	23,3	26,4	29,3	26,4	26,3	*	*	*
	720	14,9	15,5	17,5	15,9	14,5	*	*	*
	1080	11,0	11,3	12,8	11,8	11,1	*	*	*
	1440	9,0	9,1	10,3	9,5	9,1	*	*	*
	2160	7,1	6,6	7,5	7,1	6,8	*	*	*
	2880	6,0	5,2	6,0	5,7	5,5	*	*	*
	4320	4,3	3,8	4,4	4,3	4,1	*	*	*
***C* = 50**	5	436,7	409,1	379,0	493,2	609,8	657,7	*	*
	10	311,7	316,3	314,7	361,3	420,4	410,5	458,2	*
	15	274,4	256,6	262,0	279,9	328,4	311,6	354,7	*
	30	182,8	169,6	178,9	174,5	207,4	194,5	200,4	*
	45	128,5	130,1	139,4	131,0	155,8	147,6	137,6	*
	60	98,1	107,0	115,7	106,6	126,4	121,4	104,1	*
	90	79,1	80,5	88,1	79,6	93,4	92,1	69,2	*
	120	80,1	65,4	72,2	64,6	75,1	75,8	*	*
	180	57,3	48,6	54,2	48,1	52,9	*	*	*
	360	29,2	28,9	32,7	28,9	29,0	*	*	*
	720	14,9	16,9	19,5	17,4	15,9	*	*	*
	1080	11,3	12,3	14,3	12,9	12,2	*	*	*
	1440	9,3	9,8	11,4	10,5	10,0	*	*	*
	2160	7,1	7,1	8,4	7,8	7,5	*	*	*
	2880	6,0	5,7	6,7	6,3	6,1	*	*	*
	4320	4,5	4,1	4,9	4,7	4,5	*	*	*
***C* = 100**	5	-	437,0	405,7	*	662,8	729,7	*	*
	10	-	341,3	342,7	*	457,4	455,5	*	*
	15	-	277,7	286,7	*	357,4	345,7	*	*
	30	-	183,9	196,6	*	225,7	215,8	*	*
	45	-	141,1	153,3	*	169,5	163,8	*	*
	60	-	116,0	127,4	*	137,5	134,7	*	*
	90	-	87,3	97,1	*	101,6	102,2	*	*
	120	-	71,0	79,6	*	81,6	84,1	*	*
	180	-	52,7	59,7	*	57,4	*	*	*
	360	-	31,2	36,0	*	31,4	*	*	*
	720	-	18,3	21,4	*	17,2	*	*	*
	1080	-	13,3	15,7	*	13,2	*	*	*
	1440	-	10,6	12,6	*	10,8	*	*	*
	2160	-	7,7	9,2	*	8,1	*	*	*
	2880	-	6,1	7,3	*	6,6	*	*	*
	4320	-	4,4	5,3	*	4,8	*	*	*

* - poza zakresem stosowalności modelu

Z przedstawionej w tabeli 6.16 oceny dokładności wyników obliczeń maksymalnych natężeń opadów z modeli probabilistycznych (6.34) i (6.38) oraz z modelu fizykalnego (5.26) z danymi pomiarowymi dla wybranych częstości *C*, na tle wyników obliczeń z modeli innych autorów, można sformułować następujące wnioski:

- oba modele probabilistyczne (6.34) i (6.38), a zwłaszcza (6.34), są dokładniejsze w opisie wyników pomiarów opadów, w porównaniu z modelem fizykalnym (5.26);
- dla częstości C = 1 rok wyniki obliczeń zwłaszcza z dwóch modeli probabilistycznych, ale także z modelu fizykalnego, są zgodne z wynikami pomiarów;
- dla częstości C = 2 lata i większych najlepiej przybliża wyniki pomiarów I model probabilistyczny (6.34) - w porównaniu z II modelem probabilistycznym (6.38) i fizykalnym (5.26);
- wyniki obliczeń z modelu fizykalnego (5.26) nieznacznie przewyższają dane pomiarowe, więc z praktycznego punktu widzenia leżą po „bezpiecznej stronie";
- z lokalnego porównania wyników pomiarów opadów maksymalnych ze stacji IMGW Wrocław-Strachowice z obliczonymi z modelu fizykalnego (2.29) Licznara-Łomotowskiego (dla C = 1÷10 lat i $t \leq 180$ minut) dla stacji UP Wrocław-Swojec wynika, że na Swojcu występują generalnie niższe (o rząd 20%) natężenia opadów, podobnie jak i nieco niższe wysokości opadów normalnych (np. w 30-leciu 1961-1990: Swojec 573 mm a Strachowice 588 mm - tab. 3.8, p. 3.5.3 pracy).

Model fizykalny Licznara-Łomotowskiego (2.29), czy też modele prezentowane w pracy: fizykalny (5.26) oraz probabilistyczne (6.34) i (6.38), mają znaczenie lokalne – dla Wrocławia, ściślej dla określonych obszarów miasta. Wyniki obliczeń z tych modeli różnią się, co wytłumaczyć można położeniem przestrzennym źródłowych stacji meteorologicznych - na wschodzie i na zachodzie miasta. Przykładowo, dla C = 1 rok i t = 15 min natężenia jednostkowe deszczy obliczone z modelu Licznara-Łomotowskiego i z modeli sformułowanych w pracy różnią się następująco: wg modelu Licznara-Łomotowskiego (2.29) $q_{15,1}$ = 98,8 dm^3/(s·ha), a wg modeli probabilistycznych (6.34) i (6.38) $q_{15,1}$ = 107,7 dm^3/(s·ha) a wg modelu fizykalnego (5.26) $q_{15,1}$ = 114,8 dm^3/(s·ha). Z pomiarów uzyskano $q_{15,1}$ = 112,2 dm^3/(s·ha). Na tym tle rażąco odstają wyniki obliczeń ze wzoru Bogdanowicz-Stachy (2.11) – tylko $q_{15,1}$ = 38,6 dm^3/(s·ha) - tab. 6.16.

Jak już wspomniano w rozdziale 5.2.3 pracy, generalnie modele opadów maksymalnych innych autorów (zwłaszcza o zasięgu ogólnopolskim - tab. 6.16) zostały ustalone dla innych danych źródłowych - pochodzących z różnych stacji i z różnych okresów pomiarowych, tak więc ich bezpośrednie porównanie ilościowe z modelami opracowanymi wyłącznie dla Wrocławia-Strachowic musi prowadzić do różnic wyników obliczeń. Ponadto autorzy ci stosowali różne metody wyboru próby losowej opadów do analiz statystycznych częstości ich występowania. Tak więc, różnice obliczanych wysokości opadów maksymalnych wynikać mogą: z klasy dokładności porównywanych modeli (fizykalne i probabilistyczne), ich regionalnego (model Bogdanowicz-Stachy czy Reinholda) bądź lokalnego zasięgu (np. dla Wrocławia), czy wreszcie lokalizacji stacji pomiarowych na terenie Wrocławia (Swojec w przypadku modelu Licznara-Łomotowskiego (2.29) czy Strachowice w przypadku modelu Stachy (2.21) i modeli (5.26), (6.34) i (6.38)).

7. Podsumowanie i wnioski końcowe

W celu sprostania wymaganiom normy PN-EN 752:2008 odnośnie zasad projektowania odwodnień terenów w Polsce, w tym w szczególności kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, konieczna była weryfikacja podstaw ich wymiarowania, którą przeprowadzono na przykładzie pomiarów opadów we Wrocławiu z okresu 50 lat (1960-2009). O wiarygodności każdej metody obliczeniowej, jak w teorii niezawodności, decyduje najsłabsze ogniwo, w tym przypadku dokładność danych o opadach. Dotychczas stosowane w Polsce modele opadów, w postaci wzorów fizykalnych (formuł empirycznych) bądź wzorów probabilistycznych do określania wielkości miarodajnego do projektowania kanalizacji strumienia deszczu, opracowane w latach 40, 50 czy 90-tych ubiegłego wieku, wymagają zastąpienia dokładniejszymi modelami-wzorami o zasięgu lokalnym, na podstawie których możliwe byłoby w przyszłości opracowanie atlasu opadów w Polsce (na drodze interpolacji wyników pomiędzy stacjami meteorologicznymi) - na wzór atlasu KOSTRA w Niemczech. Dla przykładu dane o opadach dla polskich miast przygranicznych, takich jak Szczecin, Gubin czy Zgorzelec, mieszczących się w zasięgu atlasu KOSTRA, wskazują na znacznie wyższe charakterystyczne natężenia opadów niż tradycyjnie przyjmowane w Polsce z modelu Błaszczyka. Wprowadzenie podobnego systemu rejestracji i prezentacji wyników pomiarów opadów w kraju (np. w strukturze IMGW), opracowywanych według jednolitej metodologii zaproponowanej w niniejszej pracy, pozwoliłoby na bezpieczniejsze niż dotychczas projektowanie systemów melioracyjnych i kanalizacyjnych, a także na urealnienie oceny zagrożeń przez wylania, podtopienia czy powodzie. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej podjął w tym zakresie współpracę z Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział we Wrocławiu.

Na podstawie analizy porównawczej znanych z literatury 10 modeli opadów wykazano, że zdecydowana większość tych modeli, w postaci wzorów fizykalnych bądź probabilistycznych, zarówno o zasięgu ogólnopolskim jak i lokalnym - opracowanych dla Wrocławia, wskazuje na znacznie wyższe wartości natężenia deszczy miarodajnych do wymiarowania kanalizacji, w porównaniu z obliczanymi tradycyjnie z modelu Błaszczyka. Przewyższenia te są ogólnie różne w różnych zakresach czasu trwania i częstości występowania opadów. W skrajnych przypadkach różnice sięgają nawet 90%, przeciętnie są na poziomie o 40% większym. Przykładowo, opisane w pracy lokalne natężenia deszczy miarodajnych zmierzone na stacji IMGW Wrocław-Strachowice przewyższają o rząd 50% obliczane z modelu Błaszczyka. Stąd pilna staje się potrzeba zastąpienia modelu Błaszczyka (z 1954 r.) w wymiarowaniu systemów kanalizacyjnych w Polsce, dokładniejszymi modelami, w tym o zasięgu lokalnym. Przyczynami powyższych różnic ilościowych są różnice jakościowe danych o opadach, założeń wyjściowych i metod badawczych zastosowanych do wyprowadzania przedmiotowych modeli. Dotychczasowa wiedza w tym zakresie wymagała więc naświetlenia, usystematyzowania i weryfikacji, co było celem niniejszej pracy.

Z analizy wrocławskiej serii opadowej z kilku stacji meteorologicznych na terenie miasta wynika, że mamy obecnie do czynienia z nieznacznie malejącym trendem zmian rocznych wysokości opadów, zwłaszcza w ostatnich dziesięcioleciach, lecz na przestrzeni 129 lat (1881-2009) jest on już praktycznie niezauważalny. Przykładowo lata wielkich powodzi na Dolnym Śląsku (1997, 2001) okazały się dla Wrocławia latami przeciętnymi pod względem wysokości opadów. Przyczyn coraz częściej obecnie występujących wylewów z kanalizacji należy upatrywać m.in. we wzroście gwałtowności oraz długotrwałości występowania intensywnych zjawisk opadowych. Nie mniej istotną przyczyną są niekorzystne przyrodniczo zmiany w infrastrukturze miejskiej, gdzie w miejsce naturalnych powierzchni terenu wprowadza się w coraz większym stopniu powierzchnie nieprzepuszczalne (beton, bruk,

asfalt) i zwartą zabudowę, przez co zwiększa się w istotny sposób spływ powierzchniowy a zmniejsza się odpływ podziemny. Kolejną przyczyną są także niedostateczne jak dotychczas podstawy do obliczania i prognozowania miarodajnych do projektowania strumieni deszczy, w tym też błędna zasada dobierania przekrojów kanałów deszczowych i ogólnospławnych na całkowite wypełnienie.

Przeprowadzone w pracy studium czasoprzestrzennego zróżnicowania opadów we Wrocławiu pod kątem określenia reprezentatywności stacji meteorologicznych na obszarze miasta, wykazało, że obecna sieć pomiarowo-obserwacyjna może nie spełnić zapotrzebowania na oczekiwane informacje, w zakresie potrzeb projektowania i modelowania hydrodynamicznego sieci kanalizacyjnych. Odnosi się to głównie do wyników charakteryzujących wysokości opadów o zróżnicowanym czasie trwania, a w szczególności dotyczy natężeń intensywnych opadów krótkotrwałych (do 6 godzin), niosących ze sobą duże zagrożenie funkcjonowania kanalizacji. W pracy wykazano bowiem istotne różnice tych wielkości - wyższe o rząd 20% w zachodnich rejonach miasta (Strachowice) w porównaniu do wschodnich (Swojec). Rejony na południu i północy miasta są praktycznie nieopomiarowane. Dążyć należy zatem do optymalnego pokrycia obszaru Wrocławia siecią stacji automatycznie rejestrujących wysokość opadu w czasie, co w lepszy sposób pozwoli projektować i modernizować miejską sieć kanalizacyjną. W efekcie tych działań znacznie poprawi się zabezpieczenie i ochrona terenów zurbanizowanych przed lokalnymi wylewami z kanalizacji czy podtopieniami, wywołanymi wystąpieniem intensywnych opadów deszczu.

Materiałem badawczym wykorzystanym w pracy były archiwalne pluwiogramy ze stacji IMGW Wrocław-Strachowice, zlokalizowanej w zachodnim rejonie miasta, za okres od 1960 do 2009 roku. Sięgnięcie do starszych materiałów źródłowych, tj. sprzed 1960 r., było niemożliwe, gdyż nie stosowano wtedy jeszcze rejestratorów z ciągłym zapisem zmian wysokości opadów w czasie. Do 2006 r. na stacji stosowano tradycyjny pluwiograf pływakowy, a od 2007 r. pluwiograf korytkowy nowej generacji typu SEBA z zapisem cyfrowym. Do wyodrębnienia z pluwiogramów intensywnych deszczy, do analiz statystycznych częstości ich występowania, przyjęto własne kryterium wysokości opadów, które pozwoliło na wyselekcjonowanie dla każdego roku od kilku do kilkunastu najintensywniejszych opadów. Łącznie z okresu 50 lat obserwacji do szczegółowej analizy statystycznej wyodrębniono 514 opadów syntetycznych, które następnie były szeregowane według nierosnących wysokości w poszczególnych 16-u przedziałach czasowych ich trwania (od 5 minut do 72 godzin). Na tej podstawie zaproponowano modele fizykalne i probabilistyczne na maksymalną wysokość opadów (w tym przekształcone na natężenie opadów) do projektowania odwodnień terenów w warunkach wrocławskich, a także sformułowano, zweryfikowano w praktyce i uogólniono dwie metodologie - fizykalnego i probabilistycznego opracowywania wyników pomiarów opadów, które zaleca się do zastosowania na innych stacjach meteorologicznych w kraju. Dla celów poznawczych podano wyniki uogólnień obu stosowanych metodologii.

W celu sformułowania modelu fizykalnego na maksymalną wysokość opadów (dla rejonu Wrocław-Strachowice), o różnych częstościach występowania w okresie 1960-2009, przyjęto wstępnie dwuparametrowe równanie na badaną rodzinę zależności typu DDF, o postaci zwanej w literaturze modelem Lindley'a, dla której wyestymowano wartości współczynników regresji metodą najmniejszych kwadratów. W efekcie uzyskano trzy modele fizykalne o różnej klasie dokładności, jednak niezadawalającej w odniesieniu do dwóch najkrótszych czasów trwania opadów (5 i 10 minut). W czwartej próbie sprawdzono przydatność trójparametrowego modelu (5.26), o ogólnej postaci modelu Reinholda. W tym przypadku uzyskano dostatecznie dokładny opis zmierzonych wysokości opadów w czasie dla badanych rodzin krzywych typu DDF, o różnych częstościach występowania na stacji Wrocław-Strachowice.

Do wyznaczenia modeli probabilistycznych, opisujących maksymalne wysokości opadów deszczowych, przypisywano poszczególnym uporządkowanym nierosnąco elementom próby losowej opadów prawdopodobieństwo empiryczne. Na drodze założeń i weryfikacji hipotezy zerowej dobrano funkcje rozkładu prawdopodobieństwa. Na podstawie danych literaturowych do opisu zjawisk opadów maksymalnych rozpatrzono cztery typy rozkładów: Fishera-Tippetta typ I_{max}, Fishera-Tippetta typ III_{min}, logarytmiczno-normalny oraz Pearsona typ III. Metodą największej wiarygodności (MNW) wyznaczono estymatory parametrów funkcji gęstości poszczególnych rozkładów, a następnie testem λ-Kołmogorowa zbadano zgodność przyjętych rozkładów teoretycznych z rozkładem empirycznym. Test ten odrzucił na poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$ rozkład logarytmiczno normalny, jako zbyt odstający od danych pomiarowych. Pozostałe trzy rozkłady poddano ocenie wg kryterium informacyjnego Schwartza (BIC), w celu wyznaczenia najlepszego z nich. Kryterium BIC pozwoliło wybrać dwa rozkłady, tj. Fishera-Tippetta typ III_{min} oraz Pearsona typ III, jako odpowiednie do opisu maksymalnych opadów deszczowych zarejestrowanych na stacji meteorologicznej Wrocław-Strachowice. Na tej podstawie opracowano dwa modele probabilistyczne, oparte na dwóch rozkładach wskazanych przez kryterium BIC, pozwalające obliczać maksymalne wysokości opadów deszczowych o czasie trwania do 3 dni oraz częstości występowania do $C = 100$ lat. Z analizy porównawczej obu modeli probabilistycznych z danymi pomiarowymi, model (6.34) oparty na rozkładzie Fishera-Tippetta typ III_{min}, uznano za najlepszy do prognozowania maksymalnych opadów deszczowych dla rejonu Wrocław–Strachowice.

Opracowane i wybrane dla stacji IMGW Wrocław-Strachowice modele opadów, zarówno prosty model fizykalny (5.26) jak i model probabilistyczny (6.34), umożliwiają obliczanie miarodajnych do projektowania odwodnień terenów maksymalnych wysokości, czy natężeń jednostkowych opadów. Dla częstości deszczu obliczeniowego: raz na rok - dla terenów pozamiejskich oraz raz na 2, 5 lub 10 lat dla terenów miejskich (odpowiednio do rodzaju zagospodarowania wg PN-EN 752:2008, tab. 1.1) mogą być stosowane do wymiarowania kanalizacji oba modele. Dla rzadkich powtarzalności opadów, czyli: raz na 10 lat w przypadku terenów wiejskich, oraz raz na 20, 30 i 50 lat dla terenów miejskich, do prognozowania opadów niezbędnych do weryfikacji częstości wylewów z kanalizacji (czy też braku możliwości odbioru wód opadowych) zalecono model probabilistyczny (6.34).

W dostosowaniu do wymagań normy PN-EN 752:2008 odnośnie częstości projektowych deszczy w wymiarowaniu kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, do czasu opracowania szczegółowego atlasu opadów maksymalnych w Polsce (w oparciu o lokalne modele opadów), zaleca się:

- dla $C = 1$ rok stosowanie modelu Błaszczyka – jednak z niezbędną korektą częstości deszczy, mianowicie z $C = 1$ na $C = 2$ lata (zamiennie modelu Reinholda), bądź wiarygodnych modeli lokalnych, jak w przypadku Wrocławia: modelu Licznara-Łomotowskiego - dla wschodniej części miasta i modelu (5.26) opracowanego w pracy - dla zachodniej części miasta;
- dla częstości projektowych $C = 2$, 5 i 10 lat stosowanie modelu Bogdanowicz-Stachy bądź wiarygodnych modeli lokalnych, jak w przypadku Wrocławia: modelu Licznara-Łomotowskiego dla wschodniej części miasta i opracowanych modeli (5.26) i (6.34) dla zachodniej części miasta;
- przy wymiarowaniu zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych, ze względu na ich wagę w zapewnieniu niezawodności działania systemów odwodnieniowych terenów, należy odpowiednio zwiększyć przyjmowane częstości opadów w stosunku do częstości projektowych wymiarowania sieci kanalizacyjnych ($C_z > C$).

Projektowane systemy odwodnieniowe obejmujące zlewnie deszczowe o powierzchni $F > 2$ km^2 proponuje się dodatkowo sprawdzać pod kątem ich przepustowości hydraulicznej (sieci

i obiektów) w oparciu o skalibrowane modele symulacyjne – dla spełnienia zaleceń PN-EN 752:2008 co do akceptowalnych społecznie częstości wylewów ($C_w \geq 10$ lat).

Przeprowadzona w pracy analiza dokładności rejestracji wysokości opadów deszczowych za pomocą tradycyjnego pluwiografu pływakowego i pluwiografu korytkowego SEBA z zapisem cyfrowym, w porównaniu do standardowego deszczomierza Hellmanna, została z konieczności oparta na materiale pluwiograficznym pochodzącym ze stacji meteorologicznej IMGW w Legnicy, z ciepłego półrocza (V-X) 2009 r. Nie dysponowano bowiem takim materiałem porównawczym dla Wrocławia. Porównań dokonano dla czterech typowych okresów bilansowych opadów: sezonu V-X, miesiąca, doby oraz 360 minut. Dla okresów bilansowych sezon, miesiąc i doba oceniane pluwiografy uznano za dostatecznie dokładne i w przybliżeniu za równorzędne. Jednak analiza opadów krótkotrwałych (do 6 godzin) wykazała, że największe różnice wysokości opadów występują w pierwszym 5 minutowym interwale czasu trwania opadu. W przypadku bardzo intensywnych opadów, osiągających w czasie 5 minut wysokość kilkunastu milimetrów, niedoszacowanie wysokości opadu przez pluwiograf SEBA jest rzędu 15%, w porównaniu do tradycyjnego pluwiografu pływakowego. Zagrożeniem dla funkcjonowania kanalizacji są zwykle krótkotrwałe i intensywne deszcze – opisane na początkowych odcinkach krzywych wysokości (DDF) czy natężeń (IDF) opadów. Z przeprowadzonej analizy, a także z doniesień literaturowych wynika, że celowe jest dalsze doskonalenie przyrządów i metod pomiarów opadów, bowiem obecnie stosowane deszczomierze, w tym nawet najnowszej generacji, nie są pozbawione wad.

Przeprowadzone badania i studia pozwalają na wyciągnięcie szeregu wniosków końcowych o znaczeniu metodologicznym:

1. Miarodajne do projektowania bezpiecznych systemów odwodnień terenów zurbanizowanych, w tym zwłaszcza systemów kanalizacyjnych, są maksymalne wysokości opadów deszczu o czasach trwania od kilku minut do kilku godzin, które występują z reguły w okresach długotrwałych zjawisk opadowych, trwających nawet kilka dni.
2. Zweryfikowana w pracy, znana z literatury przedmiotu, metoda interpretacji częstości występowania maksymalnych wysokości opadów deszczu oparta na założeniu, że każdy rok obserwacyjny może być reprezentowany przez jeden opad syntetyczny (największy w roku) jest niewłaściwa. Prowadzi bowiem do znacznego zaniżenia wartości dolnego ograniczenia teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa, odpowiadającego wysokości opadów dla częstości występowania $C = 1$ rok.
3. Opracowana i zweryfikowana na opadach we Wrocławiu-Strachowicach metoda interpretacji (selekcji i wyboru) intensywnych deszczy, miarodajnych dla analiz statystycznych częstości ich występowania, cechuje się następującymi założeniami wyjściowymi:
   - analizowane powinny być wszystkie intensywne opady w czasie (o odczytywanych z zapisów na pluwiogramach przedziałowych wysokościach opadów zliczanych metodą ruchomej sumy) dla każdego roku, nie tylko zaliczane do silnych deszczy, ulew, silnych ulew i deszczy nawalnych, z ciągłego okresu kilkudziesięciu (minimum 30) lat jednorodnych obserwacji (optimum 50 lat);
   - zaproponowane w pracy kryterium selekcyjne przedziałowych wysokości opadów, zaliczanych do intensywnych ($h \geq 0{,}75t^{0{,}5}$), pozwala na wyodrębnienie w każdym roku od kilku do kilkunastu opadów syntetycznych, jako miarodajnych do analiz statystycznych prawdopodobieństwa czy częstości ich występowania. Przykładowo w warunkach wrocławskich dla okresu 50 lat obserwacji dało to liczbę 514 wyselekcjonowanych deszczy syntetycznych (przeciętnie 10-ciu w roku), przewyższających przyjęte kryterium przedziałowych wysokości opadów.

Uwzględnienie wszystkich opadów z pięćdziesięciolecia (bez kryterium intensywności) wydłużyłoby listę serii czasowych analizowanych deszczy do kilku tysięcy, lecz nie zmieniłoby ich kolejności na pierwszych kilkudziesięciu (50) pozycjach, czyli nie zmieniłoby podstaw statystycznych opracowanych modeli.

4. Właściwe jest tworzenie modeli na maksymalną wysokość opadów o zasięgu lokalnym lub podawanie wygładzonych szeregów czasowych opadów z zestawień statystycznych w zależności od częstości występowania (typu IDF czy DDF) odrębnie dla każdej stacji meteorologicznej, a następnie na tej podstawie tworzenie map opadów na terenie całego kraju - na drodze interpolacji wyników pomiędzy stacjami. Próby tworzenia jednego uniwersalnego dla całej Polski modelu opadów (bądź nawet kilku - dla poszczególnych regionów kraju) i na tej podstawie tworzenie map opadów skazane jest na niepowodzenie, ze względu na zbyt małą dokładność takiej metody (efekt skali), a więc i małą przydatność do projektowania, czego przykładem są dotychczas podejmowane takie próby, co wykazano w niniejszej pracy.
5. Materiał badawczy opadów (jak w przypadku Wrocławia rejestrowany na kilku stacjach) powinien być ciągle aktualizowany i w konsekwencji weryfikowana powinna być okresowo postać matematyczna opracowanych modeli-wzorów, w celu zwiększenia ich dokładności, zwłaszcza dla rzadkich powtarzalności opadów C = 20÷50 lat, czy też „ekstrapolacji probabilistycznej” na C = 100 lat. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę z faktu, że zachowanie pełnej jednorodności wyników pomiarów w dłuższym okresie czasu jest praktycznie niemożliwe do osiągnięcia, bowiem np. otoczenie stacji na skutek zmian urbanistycznych ulega zmianie.
6. W celu uzyskania porównywalności wyników obserwacji opadów pochodzących z różnych stacji meteorologicznych, wyniki pomiarów wysokości opadów powinny być opracowywane i uogólniane jedną wspólną metodologią, którą proponuje się w pracy.

BIBLIOGRAFIA

[1] Błaszczyk W.: Spływy deszczowe w sieci kanalizacyjnej (Wytyczne do normatywu). Gaz, Woda i Technika Sanitarna 1954, nr 9, s. 262-271.

[2] Błaszczyk W., Roman M., Stamatello H.: Kanalizacja. Tom I. Arkady, Warszawa 1974.

[3] Błaszczyk P. (red.): Zasady planowania i projektowania systemów kanalizacyjnych w aglomeracjach miejsko - przemysłowych i dużych miastach. Instytut Kształtowania Środowiska, Warszawa 1983.

[4] Suligowski Z.: Zagospodarowanie wód opadowych. Szczególne problemy. Forum Eksploatatora 2004, nr 3-4, s. 24-27.

[5] Kotowski A.: Wybrane aspekty wymiarowania i sprawdzania przepustowości kanałów deszczowych i ogólnospławnych. Forum Eksploatatora 2006, nr 1, s. 18-25.

[6] Kotowski A.: O potrzebie dostosowania zasad wymiarowania kanalizacji w Polsce do wymagań normy PN-EN 752 i zaleceń Europejskiego Komitetu Normalizacji. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2006, nr 6, s. 20-26.

[7] Kotowski A.: Dyskusja nad zaleceniami normy PN-EN 752 odnośnie zasad wymiarowania odwodnień terenów w Polsce. VI Zjazd Kanalizatorów Polskich POLKAN, Łódź 6÷7.12.2007. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN 2007, Vol. 46, s. 27-37.

[8] Kotowski A.: O wiarygodności podstaw modelowania zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Prace Naukowe. Seria Inżynieria Środowiska (ISSN 1234-4338) 2009, z. 57, s. 79-91.

[9] Kotowski A.: Weryfikacja zasad wymiarowania zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych w Polsce. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2009, nr 4, s. 14-21.

[10] Kotowski A., Kaźmierczak B.: Ocena przydatności dotychczasowych wzorów na natężenie opadów deszczowych do projektowania odwodnień terenów w Polsce. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2009, nr 11, s. 11-17.

[11] Kotowski A., Kaźmierczak B, Dancewicz A.: Analiza maksymalnych wysokości opadów we Wrocławiu-Strachowicach w latach 1960÷2009. Modelowanie opadów miarodajnych do wymiarowania kanalizacji. Raporty Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej. Seria SPR nr 26/2009.

[12] PN-EN 752:2008: Drain and sewer systems outside buildings (Zewnętrzne systemy kanalizacyjne). PKN, Warszawa 2008.

[13] Climatological normals (CLINO) for the period 1961-1990. WMO No. 847, Geneva 1996. Rec. Kossakowska-Cezak U. Przegląd Geofizyczny 1999, t. 44, nr 1-2.

[14] Lambor J.: Obliczenie prawdopodobieństwa pojawienia się deszczów nawalnych w Polsce. Gospodarka Wodna 1953, nr 12, s. 456-457.

[15] ATV-DVWK-A 118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungs-systemen. Hennef 1999.

[16] Licznar P.: Generatory syntetycznych szeregów opadowych do modelowania sieci kanalizacji deszczowych i ogólnospławnych. Monografia. Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu 2009.

[17] Chomicz K.: Ulewy i deszcze nawalne w Polsce. Wiadomości Służby Hydrologicznej, PIHM Warszawa 1951, t. 2, z. 3.

[18] Ciepielowski A., Dąbkowski S. L.: Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami). Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz 2006.

[19] Reinhold F.: Regenspenden in Deutschland. Archive für Wasserwirtschaft 1940.

[20] Imhoff K., Imhoff K. R.: Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków. Wyd.

Projprzem-EKO, Bydgoszcz 1996.
[21] Schmitt T. G.: Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 „Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen“. DWA, Hennef 2000; Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa 2007.
[22] Chomicz K.: O jednolite normy opadowe przy projektowaniu sieci kanalizacyjnej miast. Gospodarka Wodna 1952, nr 3, s. 81-85.
[23] Chomicz K.: Normy opadowe dla potrzeb kanalizacji miast. Gospodarka Wodna 1953, nr 10, s. 377-382.
[24] Lambor J.: Hydrologia inżynierska. Arkady, Warszawa 1971.
[25] Lambor J.: Maksymalne natężenia deszczów o określonym prawdopodobieństwie pojawiania się na terytorium Polski. Acta Geoph. Pol. 1953, T 1., nr 3-4.
[26] Lorenc H. (red): Atlas klimatu Polski. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2005.
[27] Bogdanowicz E., Stachy J.: Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe. Materiały badawcze, Seria: Hydrologia i Oceanologia nr 23. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 1998.
[28] Bartels H., Malitz G., Asmus S. i inni: Starkniederschlagshöhen für Deutschland. KOSTRA. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. Offenbach am Main 1997.
[29] Stachy J. (red.): Atlas hydrologiczny Polski. Tom I. Wydawnictwo Geologiczne. Warszawa 1987.
[30] Wołoszyn J.: Średnie natężenie, średni czas trwania i rozkład natężenia normalnych opadów we Wrocławiu. Zeszyty Nauk. Wyższej Szkoły Rolniczej we Wrocławiu. Melioracja 1961, nr 61, s. 23-41.
[31] Sowiński M.: Wyznaczenie maksymalnego natężenia opadu o T-letnim okresie powtarzalności na przykładzie Wrocławia. Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej 1980, tom VI, zeszyt 3-4, s. 117-126.
[32] Licznar P., Łomotowski J.: Analiza średnich natężeń deszczów miarodajnych we Wrocławiu. Ochrona Środowiska 2005, nr 1, s. 29-34.
[33] Licznar P., Łomotowski J.: Analiza chwilowych natężeń deszczów miarodajnych we Wrocławiu. Ochrona Środowiska 2005, nr 2, s. 25-28.
[34] Licznar P., Łomotowski J., Rojek M.: Pomiary i przetwarzanie danych opadowych dla potrzeb projektowania i eksploatacji systemów odwodnieniowych. Monografia. Wyd. FUTURA, Poznań 2005.
[35] Kaźmierczak B., Kotowski A.: Analiza porównawcza wzorów na natężenie deszczy do projektowania kanalizacji. II Ogólnopolska Konferencja Nauk.-Tech. INFRAEKO, Rzeszów-Niepołomice 4-5.06.2009. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2009, s. 101-116.
[36] Mielcarzewicz E. W.: Melioracje terenów miejskich i przemysłowych. Arkady, Warszawa 1971.
[37] Błaszczyk W., Stamatello H., Błaszczyk P.: Kanalizacja. Sieci i pompownie. Arkady, Warszawa 1983.
[38] Kwietniewski M, Nowakowska-Błaszczyk A., Olszewski W., Ways M.: Kanalizacja. Materiały do projektowania. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1985.
[39] Mielcarzewicz E., Wartalski J.: Systemy zaopatrzenia w wodę i usuwania ścieków. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1990.
[40] Mielcarzewicz E. W.: Odwadnianie terenów zurbanizowanych i przemysłowych. Podstawy projektowania. PWN, Warszawa 1991.
[41] Szpindor A.: Zaopatrzenie w wodę i kanalizacja wsi. Arkady (ISBN 83-213-3497-0), Warszawa 1997.

[42] Łomotowski J., Szpindor A.: Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków. Arkady, Warszawa 1999.
[43] Edel R.: Odwodnienie dróg. WKŁ, Warszawa 2002.
[44] Błażejewski R.: Kanalizacja wsi. Wydawnictwo PZITS, Poznań 2003.
[45] Chudzicki J., Sosnowski S.: Instalacje kanalizacyjne, projektowanie, wykonanie i eksploatacja. Wyd. Seidel-Przywecki (ISBN 83-919449-0-5), Warszawa 2004.
[46] Heidrich Z., Kalenik M., Podedworna J., Stańko G.: Sanitacja wsi. Wydawnictwo „Seidel-Przywecki" Sp. z o.o., Warszawa 2008.
[47] Bielawski Z.: Zastosowanie hydrologicznych modeli konceptualnych do określania odpływu miejskich ścieków opadowych. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa 1990.
[48] Zawilski M.: Prognozowanie wielkości odpływu i ładunków zanieczyszczeń ścieków opadowych odprowadzanych z terenów zurbanizowanych. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1997.
[49] Geiger W., Dreiseitl H.: Nowe sposoby odprowadzania wód deszczowych. Poradnik. Wyd. Projprzem-EKO, Bydgoszcz 1999.
[50] Kuliczkowski A., Jakubowski J.: Ocena porównawcza wybranych metod obliczania miarodajnych przepływów w kanalizacji deszczowej. INSTAL 2002, nr 11, s. 28-32.
[51] Krzanowski S., Wałęga A.: Możliwość likwidacji zastoiska wody opadowej poprzez wykorzystanie infiltracji podziemnej. Acta Agrophysica 2004, nr 3(1), s. 87-97.
[52] Mrowiec M.: Propozycja wymiarowania zbiorników retencyjnych odciążających hydraulicznie sieć kanalizacyjną. VI Zjazd Kanalizatorów Polskich POLKAN, Łódź 6÷7.12.2007. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, nr 46/2007, s. 153-162.
[53] Tabernacki J.: Deszczowe zbiorniki retencyjne w kanalizacji. Nowa technika w inżynierii sanitarnej. Wodociągi i kanalizacja (Z. 11). Arkady, Warszawa 1980.
[54] Dziopak J.: Analiza teoretyczna i modelowanie wielokomorowych zbiorników kanalizacyjnych. Monografia nr 125. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1992.
[55] Kisiel A.: Przegląd najnowszych rozwiązań zbiorników kanalizacyjnych (część I i II). Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2000, nr 5 (cz. I) i nr 6 (cz. II).
[56] Dziopak J., Słyś D.: Modelowanie zbiorników klasycznych i grawitacyjno-pompowych w kanalizacji. Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.
[57] Dąbrowski W.: Rola retencji terenowej w ograniczaniu spływów powierzchniowych na przykładzie pola golfowego. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2007, nr 12, s. 17-21.
[58] Kotowski A., Wartalski J., Wartalski A.: Stosować przepływowe czy przelewowe zbiorniki retencyjne ścieków deszczowych?. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2009, t. 83, nr 2, s. 18-22.
[59] Kotowski A.: Podstawy wymiarowania bocznych przelewów burzowych z rurą dławiącą. Monografia nr 38 (ISSN 0084-2869). Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
[60] Kotowski A.: Grundlagen der hydraulischen Dimensionierung der Regenueberlaeufe mit gedrosseltem Ablauf aus der beruhigten Kammer hinter dem seitlichen Streichwehr. Das Gas und Wasserfach - Wasser/Abwasser 2000, Jg. 141, Nr 8, s. 516-526.
[61] Kotowski A.: Dimensionless equation for side-channel weirs. Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics 2001, vol. 48, nr 1, s. 97-113.
[62] Kotowski A.: Verfahren und Beispiel der Dimensionierung des verbesserten Regenueberlaufs mit Drosselrohr in Mischwasserkanalisation. Das Gas und Wasserfach - Wasser/Abwasser 2001, Jg. 142, Nr 12, s. 843-850.

[63] Kotowski A., Cisowska I., Cieżak W.: Podstawy projektowania i zasady wymiarowania separatorów objętościowych ścieków burzowych na kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2002, t. 76, nr 5, s. 167-171.
[64] Kotowski A., Wartalski J., Wójtowicz P.: Dimensioning of non-conventional storm overflows with the new method of throttling the outflow to the treament plant. Environmental engineering. Wyd. Taylor and Francis, London 2007, s. 165-173.
[65] Kotowski A., Kaźmierczak B.: Wpływ wysokości krawędzi przelewowej na jej długość w przykładowym przelewie burzowym z dławionym odpływem na kanalizacji ogólnospławnej. I Ogólnopolska Konferencja Nauk.-Tech. INFRAEKO, Rzeszów-Paczółkowice 26-28.06.2008. Wyd. Petit, Lublin 2008, s. 87-97.
[66] Kaźmierczak B., Kotowski A.: Wpływ założeń eksploatacyjnych na parametry konstrukcyjne przelewów burzowych z dławionym odpływem. Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2008, t. 82, nr 7/8, s. 29-35.
[67] Kotowski A., Szewczyk H., Wójtowicz P.: Separation of sewage flow in separators with internal by-pass of the coalescence chamber. Environmental engineering. Wyd. Taylor and Francis, London 2007, s. 175-180.
[68] Kotowski A., Szewczyk H.: Hydraulische Berechnungen von Leichtfluessigkeits-abscheidern. Korespondenz Abwasser/Abfall 2007, Jg. 54, Nr 3, s. 260-267.
[69] Kotowski A., Szewczyk H.: Hydraulics of light liquid separators with overflows inside bypasses. Chemical and Process Engineering 2008, vol. 29, nr 4, s. 1037-1051.
[70] Kotowski A., Szewczyk H.: Verfahren und Beispiel zur Dimensionierung eines Leichtflussigkeitsabscheiders mit innerem Umlaufkanal. Das Gas und Wasserfach - Wasser/Abwasser 2009, Jg. 150, Nr 6, s. 467-473.
[71] Kotowski A., Wójtowicz P.: Analysis of hydraulic parameters of cylindrical vortex regulators. Environment Protection Engineering 2008, vol. 34, nr 2, s. 43-56.
[72] Wójtowicz P., Kotowski A.: Badania modelowe cylindrycznych regulatorów hydrodynamicznych. Ochrona Środowiska 2008, nr 2, s. 35-41.
[73] Wójtowicz P., Kotowski A.: Badania modelowe stożkowych regulatorów hydrodynamicznych. Ochrona Środowiska 2008, nr 3, s. 37-44.
[74] Wójtowicz P., Kotowski A.: Influence of design parameters on throttling efficiency of cylindrical and conical vortex valves. Journal of Hydraulic Research 2009, vol. 47, nr 5, s. 559-565.
[75] Świątecki A.: Analiza możliwości zastosowania typowych krzywych natężenia deszczów w funkcji czasu trwania opadu. Prace i Studia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, tom VIII, Warszawa 1965.
[76] Bajkiewicz-Grabowska E., Mikulski Z.: Hydrologia ogólna. PWN, Warszawa 1999.
[77] Prokop P.: Maksymalne opady oraz czas ich trwania na świecie i w Polsce. Przegląd Geofizyczny 2006, R. LI, nr 2.
[78] IMGW: Opady atmosferyczne 1973. Wyd. Komunikacji i Łączności. Warszawa 1978.
[79] Piasecki J., Szymanowski M., Rehak J.: Opady atmosferyczne lipcu 1997 w Masywie Śnieżnika Kłodzkiego. Inicjacja powodzi w regionie. Forum Naukowo-Techniczne Powódź 1997: Wstępna ocena przyczyn, rozmiarów i skutków. Ustroń k. Wisły, 10-12 września 1997.
[80] Głowicki B., Dancewicz A., Otop I.: Katalog maksymalnych opadów dobowych w Polsce południowo-zachodniej w latach 1971-2000. Współczesne problemy klimatu Polski – fakty i niepewności. Seria: Monografie IMGW, Warszawa 2006, s. 7-22.
[81] Sienkiewicz R.: Przyczyny i skutki wystąpienia opadu nawalnego w Komarnie w dniu 29 maja 1968r. Gazeta Obserwatora 1968, nr 11, s. 10-12.
[82] Mrozowska I.: Opady o natężeniu ponad 50 mm/dobę w Polsce w latach 1961-1970.

Przegląd Geofizyczny 1975, R. XX, z. 4, s. 329-335.
[83] Kleinowski R., Rawa Z., Zawiślak T.: Powódź w Gdańsku 9 i 10 lipca 2001. Gazeta Obserwatora 2001, z. 5, s. 3-5.
[84] Lewińska J.: Wyjątkowy przypadek opadu burzowego na obszarze Krakowa. Gazeta Obserwatora 1964, nr 3, s. 10-12.
[85] Żyromski A.: Ulewy i deszcze nawalne w latach 1954-1981 w Polsce. I Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna z cyklu Modelowanie procesów hydrologicznych. Wrocław, 20-21 listopada 2008, s. 241-254.
[86] Dubicki A., Malinowska-Małek J.: Opady nawalne i ich skutki w dorzeczu środkowej Odry na przełomie XX i XXI wieku; Ekstremalne zjawiska hydrologiczne i meteorologiczne. Red.: Bogdanowicz E., Kossowska-Cezak U., Szkutnicki J. Polskie Towarzystwo Geofizyczne, IMGW Warszawa 2005, s. 103-121.
[87] Dancewicz A.: Opady o dużym natężeniu w Sudetach. I Międzynarodowe Sympozjum Naukowe nt. Ocena i stan środowiska przyrodniczego Polski i innych krajów. Jachranka 10-13.10.1995, s. 28-31.
[88] Dancewicz A.: Intensity of atmospheric precipitation in Jakuszyce (Suetes MTS). Acta Univ. Wrat. 1996, Prace Inst. Geograf., Seria C: Meteorologia i Klimatologia Vol. IV, s. 141-146.
[89] Janiszewski F.: Interpretacja pluwiogramów. Gazeta Obserwatora 1976, nr 2-3, s. 7-15.
[90] Strupczewski W., Napiórkowski J.: Rozkłady maksymalnych sezonowych wysokości opadów atmosferycznych i ich sum na podstawie modelu serii czasowej. Przegląd Geofizyczny 1981, vol. XXVI, nr 1-2, s. 25-36.
[91] Pyka J. L. – Opady atmosferyczne we Wrocławiu w okresie 1981-1995. Acta Univ. Wrat., Prace Inst. Geogr., Seria C: Meteorologia i Klimatologia Vol. V., Wrocław 1998.
[92] Zasoby archiwalne Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery Uniwersytetu Wrocławskiego. Wrocław 2008.
[93] Biuletyn meteorologiczny Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery Uniwersytetu Wrocławskiego. Wrocław 2008 (www.meteo.uni.wroc.pl).
[94] Kotowski A., Worsa-Kozak M., Wartalski A., Wartalski J.: O prognozowaniu środowiskowych skutków obniżenia piętrzenia w Śródmiejskim Węźle Wodnym Wrocławia. Problemy Ocen Środowiskowych 2008, nr 2, s. 28-36.
[95] Worsa-Kozak M., Kotowski A., Wartalski A.: Monitoring stanów wód podziemnych w rejonie Śródmiejskiego Węzła Wodnego we Wrocławiu. Przegląd Geologiczny 2008, t. 56, nr 4, s. 302-307.
[96] Bac-Bronowicz J.: Konstrukcja wielocechowych map regionów opadowych na przykładzie obszaru Dolnego Śląska. Klimatyczne warunki produkcji roślinnej. IUNG 1997, Puławy, s. 113-127.
[97] Wiszniewski W.: Atlas opadów atmosferycznych w Polsce 1891-1930. PIHM, Wyd. Komunikacyjne, Warszawa 1953.
[98] Kołodziej J.: Opady atmosferyczne w Polsce w latach 1948-1963 w porównaniu ze średnimi z okresu 1891-1930. Przegląd Geofizyczny 1965, R. X, nr 3-4, s. 291-298.
[99] Atlas Klimatyczny Polski. IMGW – PPWK, Warszawa 1973.
[100] Ewert A.: Opady atmosferyczne na obszarze Polski w przekroju rocznym. WSP Słupsk 1984, cz. 1 i 2.
[101] Atlas Zasobów, Walorów i Zagrożeń Środowiska Geograficznego Polski. PAN, Warszawa 1994.
[102] Kirschenstein M., Baranowski D.: Sumy opadów atmosferycznych w Polce w latach 1951-1995. Badanie Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia

Fizyczna 2005, t. 56, s. 55-72.
[103] Atlas Śląska Dolnego i Opolskiego.: Uniwersytet Wrocławski, Wrocław 1977.
[104] Głowicki B., Otop I., Urban G., Tomczyński K.: Klimat. Opracowanie Fizjograficzne dla województwa dolnośląskiego, Wojew. Biuro Urbanistyczne, Wrocław 2005, s. 53-61.
[105] Sobik M.: Klimat. Przyroda Dolnego Śląska (red. J. Fabiszewski). PAN Oddz. Wrocław 2005, s. 39-57.
[106] Bac S., Rojek M.: Warunki klimatyczne Dolnego Śląska. Rolnictwo na Dolnym Śląsku. PWN, Warszawa 1984, s. 25-42.
[107] Walczak W.: Sudety. PWN, Warszawa 1968.
[108] Walczak W.: Obszar Przedsudecki. PWN, Warszawa 1970.
[109] Chomicz K., Sadowski M.: Rozkład opadów atmosferycznych w Sudetach. Czasopismo Geograficzne 1967, R. XXXVIII, t. 57, nr 1, s. 57-65.
[110] Głowicki B.: Klimat Śnieżki. Wysokogórskie obserwatorium meteorologiczne na Śnieżce. Biblioteka Monitoringu Środowiska, IMGW - PIOŚ, Wrocław1995, s. 37-64.
[111] Punzet J.: Monografia hydrologiczna dorzecza Nysy Kłodzkiej. Prace PIHM, Z. 51. Wyd. Kom. i Łączn. Warszawa 1963.
[112] Dancewicz A.: Pole opadów atmosferycznych w otoczeniu sztucznych zbiorników wodnych Otmuchów i Nysa przed i po ich powstaniu. Wiad. IMGW 1993. T. XVI. Z. 4, s. 71-85.
[113] Skotnicki M., Sowiński M.: Przestrzenna zmienność opadów w modelowaniu odpływu ze zlewni miejskiej; Modelowanie procesów hydrologicznych. Red.: Namysłowska-Wilczyńska B. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008, s. 75-93.
[114] Bac-Bronowicz J., Dancewicz A.: Evaluation of the influence precipitation conditions on the transformations of the land usage. 19th International Cartographic Conference 1999, August 14th to 21st, Ottawa, Canada.
[115] Bac-Bronowicz J., Dancewicz A.: The density of precipitation network of urban area as a base for evaluating the interpretation of spatial differentiation of precipitation with the example of Wroclaw agglomeration. GIS Conference. By interoperability to mobility. January 23rd to 26th 2005, Ostrava-Poruba, Czech Republic.
[116] Dubicka M.: Opady atmosferyczne we Wrocławiu i ich związek z cyrkulacją atmosfery. Acta Univ. Wrat., Wrocław 1991, Prace Inst. Geogr. Seria A, t. VI, s. 55-84.
[117] Pyka J.L.: Temperatura i opady atmosferyczne we Wrocławiu w latach 1881-1980. Acta Univ. Wrat., Wrocław 1991, Prace Inst. Geogr. Seria A, t. VI, s. 19-54.
[118] Dubicki A., Dubicka M., Szymanowski M.: Klimat Wrocławia. Środowisko Wrocławia - Informator, Dolnośląska Fundacja Ekorozwoju, Wrocław 2002, s. 9-25.
[119] Bac S.: Estimate of reliability of information on atmospheric precipitation. Acta Univ. Wrat., Wrocław 1997, Prace Inst. Geogr. Seria C, t. IV, s. 163-170.
[120] Zasoby archiwalne IMGW Oddział we Wrocławiu.
[121] Zasoby archiwalne Uniwersytetu Przyrodniczego. Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska we Wrocławiu.
[122] Zasoby archiwalne Uniwersytetu Wrocławskiego. Zakład Meteorologii i Klimatologii we Wrocławiu.
[123] Licznar P.: Wstępne wyniki porównawczych testów polowych elektronicznego deszczomierza wagowego OTT Pluvio^2 i disdrometru laserowego Parsivel. INSTAL 2009, nr 7-8, s. 43-50.
[124] Lednický V., Priadka O.: Srovnávací měření srážek srážkoměry různégo typu. Meteorologické Zprávy. ČHMÚ Praha 1984, R. 37, nr 1, s. 21-23.

[125] Kaczmarek Z.: Metody statystyczne w hydrologii i meteorologii. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1970.
[126] Ozga-Zielińska M., Brzeziński J.: Hydrologia stosowana. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
[127] Sowiński M.: Wykorzystanie modelu probabilistycznego do wyznaczania krzywych natężenia deszczu. Ochrona Środowiska 1984, nr 3-4, s. 25-28.
[128] Dębski K.: Prawdopodobieństwo zjawisk hydrologicznych i meteorologicznych. Metoda decylów. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1954.
[129] Fisher R. A.: Theory of Statistical Estimation. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 1925, No 22, s. 700-725.
[130] Kaczmarek Z.: Przedział ufności, jako miara dokładności oszacowania prawdopodobnych przepływów powodziowych. Wiad. Służby Hydrologicznej 1960, vol. VII, nr 4.
[131] Krysicki W., Bartos J., Dyska W., Królikowska K., Wasilewski M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach (cz. 2). Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
[132] Sakamoto Y., Ishiguro M., Kitagawa G.: Akaike information criterion statistics. KTK Scientific Publishers 1986.
[133] Konishi S., Kitagawa G.: Information Criteria and Statistical Modeling. Springer Science 2008.
[134] Siwoń Z., Łomotowski J., Cieżak W., Licznar P., Cieżak J.: Analizy i prognozowanie rozbiorów wody w systemach wodociągowych. Wydawnictwo PAN - Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Instytut Podstawowych Problemów Techniki. Studia z zakresu inżynierii nr 61, Warszawa 2008.

SPIS TABEL

Tabela 1.1. Zalecane częstości projektowe deszczu obliczeniowego (C) i dopuszczalne częstości wystąpienia wylewów (C_w) z kanalizacji wg PN-EN 752:2008

Tabela 2.1. Wartości parametrów a i b do wzoru (2.5)

Tabela 2.2. Wartości współczynników b_0, b_1, b_2 do modelu (2.28)

Tabela 2.3. Wartości współczynników a, b, c, n do modelu (2.29) na maksymalne natężenia deszczy

Tabela 2.4. Porównanie natężeń deszczy obliczonych z modeli różnych autorów względem modelu Błaszczyka ($q/q_{Bł}$) - najczęściej stosowanego w Polsce do wymiarowania kanalizacji

Tabela 2.5. Zalecane doraźnie w Polsce modele opadów i częstości projektowe: C - deszczu do wymiarowania sieci odwodnieniowych oraz C_z - do wymiarowania zbiorników retencyjnych (w nawiasie podano model zalecany dla Wrocławia)

Tabela 2.6 Porównanie wyników obliczeń natężeń deszczy q (w $dm^3/(s \cdot ha)$) z różnych modeli opadów (dla $C = 1$)

Tabela 3.1. Ekstremalne sumy wysokości opadów atmosferycznych (i średnie intensywności) na świecie i w Polsce (wartości wybrane dla czasów trwania opadu od 1 minuty do 72 godzin)

Tabela 3.2. Maksymalne sumy opadów atmosferycznych (w mm) o czasie trwania od 5 minut do 72 godzin dla Wrocławia oraz wybranych krajów i miejscowości Europy

Tabela 3.3. Zestawienie opracowanych reprezentatywnych deszczy z 1995 roku (roczne maksima wysokości opadów w mm dla analizowanych interwałów czasowych pogrubiono)

Tabela 3.4. Największe roczne wysokości opadów (w mm) w czasie od 5 minut do 72 godzin w sezonie pluwiograficznym V-X w latach 1960-2009 dla stacji IMGW Wrocław-Strachowice

Tabela 3.5. Charakterystyki opadowe dla roku i sezonu pluwiograficznego V-X w latach 1960-2009 dla Wrocławia (wartości maksymalne pogrubiono a minimalne zaznaczono pogrubioną kursywą)

Tabela 3.6. Najwyższe sumy wysokości opadów (w mm) o czasie trwania 24, 48 i 72 godzin w latach 1960-2009 dla Wrocławia

Tabela 3.7. Sumy wysokości opadów (w mm) o czasie trwania 24, 48 i 72 godz. na stacjach Wrocław-Oporów i Wrocław-Psie Pole dla najwyższych opadów dobowych w latach 1960-2009

Tabela 3.8. Średnie roczne sumy wysokości opadów (w mm) we Wrocławiu z różnych okresów według różnych autorów

Tabela 4.1. Sumy miesięczne wysokości opadów (w mm) i ich odchylenia względem deszczomierza Hellmanna (100%) dla stacji IMGW w Legnicy w sezonie V-X 2009 r.

Tabela 4.2. Sumy dobowe wysokości opadów (w mm) w lipcu 2009 r. i ich odchylenia (w %) względem deszczomierza Hellmanna (100%) dla stacji IMGW w Legnicy

Tabela 4.3. Zestawienie największych wysokości opadów o czasie trwania od 1 do 360 minut dla stacji IMGW w Legnicy z okresu V-X 2009 r.

Tabela 5.1. Uszeregowanie największych rocznych przedziałowych wysokości opadów (w mm) z 31 lat obserwacji we Wrocławiu-Strachowicach w latach 1960-1990 - do metody Bogdanowicz i Stachy

Tabela 5.2. Uszeregowanie największych przedziałowych wysokości opadów (w mm) z 348 wyselekcjonowanych deszczy z 31 lat obserwacji we Wrocławiu-Strachowicach w latach 1960-1990 - wg własnej metody
Tabela 5.3. Uszeregowanie największych przedziałowych wysokości opadów (h, w mm) z 514 wyselekcjonowanych deszczy z 50 lat obserwacji we Wrocławiu-Strachowicach w latach 1960-2009
Tabela 5.4. Uszeregowanie największych przedziałowych natężeń jednostkowych q (w $dm^3/(s \cdot ha)$) z 514 deszczy z 50 lat obserwacji we Wrocławiu w latach 1960-2009 (wyselekcjonowanych wg własnej metody)
Tabela 5.5. Wyniki estymacji wartości współczynników a i n równania $h_{max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 100 serii czasowych o $C = 50 \div 0,5$
Tabela 5.6. Wyestymowane nowe wartości współczynnika $a(C)$ przy ustalonym $n = 0,275$ dla $C = 50 \div 1$
Tabela 5.7. Porównanie zmierzonych maksymalnych wysokości opadów (h, w mm) we Wrocławiu - przeliczonych na natężenia jednostkowe (q, $dm^3/(s \cdot ha)$), z obliczonymi dla czterech analizowanych fizykalnych modeli opadów
Tabela 5.8. Zestawienie wyników obliczeń maksymalnych natężeń opadów z modelu fizykalnego (5.26) i z modeli innych autorów dla $C = 1 \div 10$ lat
Tabela 6.1. Przypisanie prawdopodobieństwa występowania (p) szeregów czasowych maksymalnych wysokości opadów (z tab. 5.3 - największych przedziałowych wysokości opadów (w mm) z 514 wyselekcjonowanych deszczy z 50 lat obserwacji we Wrocławiu w latach 1960-2009)
Tabela 6.2. Wyniki obliczeń wartości parametrów α i u dla rozkładu Fishera-Tippetta I_{max}
Tabela 6.3. Wyniki obliczeń wartości parametrów α, β i ε dla rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min}
Tabela 6.4. Wyniki obliczeń wartości parametrów μ, σ i ε dla rozkładu logarytmiczno-normalnego
Tabela 6.5. Wartości kwantyli t_p dla standaryzowanego rozkładu logarytmiczno-normalnego [125]
Tabela 6.6. Wyniki obliczeń wartości parametrów λ, α i ε dla rozkładu Pearsona typ III
Tabela 6.7. Wartości kwantyli t_p dla standardowego rozkładu gamma
Tabela 6.8. Wybrane kwantyle rozkładu Kołmogorowa
Tabela 6.9. Zestawienie wyników obliczeń do testu λ-Kołmogorowa dla serii deszczy 5-cio minutowych
Tabela 6.10. Wartości statystyki testu λ-Kołmogorowa dla wszystkich analizowanych rozkładów prawdopodobieństwa
Tabela 6.11. Wartości kryterium informacyjnego BIC dla analizowanych rozkładów prawdopodobieństwa
Tabela 6.12. Wysokości opadów obliczone z modelu I dla charakterystycznych wartości prawdopodobieństwa p
Tabela 6.13. Natężenie deszczu przeliczone z modelu I dla charakterystycznych wartości prawdopodobieństwa p
Tabela 6.14. Wysokości opadów obliczone z modelu II dla charakterystycznych wartości prawdopodobieństwa p
Tabela 6.15. Natężenie deszczu przeliczone z modelu II dla charakterystycznych wartości prawdopodobieństwa p
Tabela 6.16. Porównanie wyników obliczeń maksymalnych natężeń (q) deszczy obliczonych z modeli probabilistycznych I i II oraz z modelu fizykalnego IV z danymi pomiarowymi dla wybranych częstości ($C = 1 \div 100$ lat) występowania opadów, na tle wyników obliczeń z modeli innych autorów

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.1. Klasyfikacja opadów deszczu w skali Chomicza [17] w interpretacji Stachy [18] (linią przerywaną oznaczono własne kryterium wyboru opadów do analiz statystycznych we Wrocławiu)

Rys. 2.1. Regiony opadów maksymalnych: a) dla czasów trwania deszczy $t \in [5; 60]$ min; b) dla $t \in [60; 720]$ min; c) dla $t \in [720; 4320]$ min (R_1 - region centralny; R_2 - region północno-zachodni; R_3 - regiony południowy i nadmorski)

Rys. 2.2. Krzywe natężenia deszczu dla C = 1 rok (Skróty oznaczeń: „Stachy PZ" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu północno-zachodniego; „Stachy C" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu centralnego; „Licznar" - model Licznara-Łomotowskiego)

Rys. 2.3. Krzywe natężenia deszczu dla C = 2 lata (Skróty oznaczeń: „Stachy PZ" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu północno-zachodniego; „Stachy C" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu centralnego; „Licznar" - model Licznara-Łomotowskiego)

Rys. 2.4. Krzywe natężenia deszczu dla C = 5 lat (Skróty oznaczeń: „Stachy PZ" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu północno-zachodniego; „Stachy C" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu centralnego; „Licznar" - model Licznara-Łomotowskiego)

Rys. 2.5. Krzywe natężenia deszczu dla C = 10 lat (Skróty oznaczeń: „Stachy PZ" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu północno-zachodniego; „Stachy C" – model Bogdanowicz-Stachy dla regionu centralnego; „Licznar" - model Licznara-Łomotowskiego)

Rys. 3.1. Fragment pluwiogramu z dnia 26 czerwca 1995 r. z opadem opisanym w tabeli 3.3 (poz. 6 i 6-1)

Rys. 3.2. Roczne wysokości opadów dla wrocławskiej serii opadowej („Wrocław") w latach 1881-2008 (kolor czerwony) oraz serii „Wrocław-IMGW" za lata 1960-2008 (kolor niebieski)

Rys. 3.3. Średnie roczne sumy opadów (w mm) w Polsce w latach 1971-2000 [26]

Rys. 3.4. Średnie roczne sumy opadów (w mm) na Dolnym Śląsku w latach 1951-1980 [103]

Rys. 3.5. Rozmieszczenie stacji pomiarowych na terenie Wrocławia omawianych w pracy (1 – IMGW Wrocław-Strachowice, 2 – IMGW Wrocław-Stabłowice, 3 – IMGW Wrocław-Ogród Botaniczny, 4 – UWr. Wrocław-Biskupin, 5 – UP Wrocław-Swojec)

Rys. 3.6. Średnie roczne sumy wysokości opadów atmosferycznych (w mm) w rejonie aglomeracji miasta Wrocławia w latach 1963-1972 [115]

Rys. 3.7. Sumy wysokości opadów atmosferycznych (w mm) w dn. 06.06.1971 r. w rejonie aglomeracji miasta Wrocławia [115]

Rys. 4.1. Deszczomierze na stacji meteorologicznej IMGW w Legnicy (od lewej): pluwiografy pływakowy i korytkowy SEBA oraz deszczomierz Hellmanna (fot. J. Jadach)

Rys. 4.2. Fragmenty zapisów opadu w dniu 7.07.2009 r. z pluwiografów pływakowego (górny) oraz korytkowego SEBA (dolny) ze stacji IMGW w Legnicy (Sumy opadów za okresy 6-godzinne dla deszczomierza Hellmanna wg czasu GMT: 12^{01}-18^{00} – 0,9 mm; 18^{01}-24 – 41,8 mm; 00^{01}-06^{00} – 2,5 mm)

Rys. 4.3. Różnice przedziałowych wysokości opadów dla pluwiografu pływakowego i pluwiografu SEBA – dla wyników SEBA-1 i SEBA-2 ustalonych z pluwiogramów z dnia 7.07.2009 r.

Rys. 5.1. Zależność wysokości (h) oraz natężenia (q) opadu syntetycznego od czasu (t) dla częstości C = 1 rok dla Wrocławia-Strachowic (1960-1990): wg własnej metody - kolor czerwony, wg metody Bogdanowicz-Stachy - kolor niebieski i wg modelu (2.12) Bogdanowicz-Stachy
Rys. 5.2. Trendy zmian przedziałowych wysokości opadów (h) w czasie (t) dla serii czasowych (typu DDF) o częstości C = 0,5, 1, 2, 5, 10 i 25 lat (logarytmiczna skala czasu)
Rys. 5.3. Trendy zmian jednostkowych natężeń (q) deszczy w czasie (t) dla syntetycznych opadów o częstości występowania C = 0,5, 1, 2, 5, 10 i 25 lat (w układzie pół logarytmicznym)
Rys. 5.4. Trendy zmian jednostkowych natężeń (q) deszczy w czasie (t) dla syntetycznych opadów o częstości występowania C = 0,5, 1, 2, 5, 10 i 25 lat (w układzie podwójnie logarytmicznym)
Rys. 5.5. Trend zmian wartości współczynnika a w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 50-ciu największych opadów syntetycznych o częstości występowania od C = 50 do C = 1
Rys. 5.6. Trend zmian wartości współczynnika a w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 100 opadów syntetycznych o częstości występowania od C = 50 do C = 0,5
Rys. 5.7. Trend zmian wartości współczynnika n w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 50-ciu największych opadów syntetycznych o częstości występowania od C = 50 do C = 1
Rys. 5.8. Trend zmian wartości współczynnika n w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 100 opadów syntetycznych o częstości występowania od C = 50 do C = 0,5
Rys. 5.9. Zależność współczynnika $a(C)$ w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50 quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div C = 50$)
Rys. 5.10. Próba dopasowania funkcji $a(C) = 5{,}698C^{0,217}$ w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50-ciu quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div C = 50$)
Rys. 5.11. Próba dopasowania funkcji $a(C) = 6{,}417-1{,}396[-\ln(-\ln(1-1/C))]$ w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50-ciu quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div C = 50$)
Rys. 5.12. Próba dopasowania funkcji $a(C) = -11{,}93C^{-0,218} + 17{,}0$ w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50-ciu quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div C = 50$)
Rys. 5.13. Próba dopasowania funkcji $a(C) = 6{,}670 + 1{,}677\ln(C - 0{,}530)$ w równaniu $h_{max}(t, C) = a(C)(t - 3{,}45)^{0,265}$ dla 50 quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div C = 50$)
Rys. 5.14. Zbiorcze zestawienie zmierzonych (niewygładzonych) szeregów częstości maksymalnych wysokości opadów syntetycznych we Wrocławiu-Strachowicach z okresu 1960-2009
Rys. 5.15. Zbiorcze zestawienie krzywych typu DDF - maksymalnych wysokości opadów z okresu 1960-2009 wygładzonych modelem (5.26) dla Wrocławia-Strachowic
Rys. 5.16. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 1 rok wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,993)
Rys. 5.17. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 2 lata wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,997)

Rys. 5.18. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 5 lat wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,991)
Rys. 5.19. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 10 lat wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,989)
Rys. 5.20. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 25 lat wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,994)
Rys. 5.21. Krzywa typu DDF - maksymalnych wysokości opadów wg modelu (5.26) dla C = 50 lat wraz z wynikami pomiarów i przedziałami ufności na poziomie 0,95 (R = 0,974)
Rys. 6.1. Dystrybuanty empiryczne największych opadów z 50-cio letniego okresu pomiarowego dla wszystkich analizowanych czasów (od 5 do 4320 minut)
Rys. 6.2. Dystrybuanty teoretyczne rozkładu Fishera-Tippetta typ I_{max} największych opadów z 50-cio lecia pomiarów (1960-2009) dla wszystkich analizowanych czasów (od 5 do 4320 minut)
Rys. 6.3. Dystrybuanty teoretyczne rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min} największych opadów z 50-cio lecia pomiarów (1960-2009) dla wszystkich analizowanych czasów (od 5 do 4320 minut)
Rys. 6.4. Dystrybuanty teoretyczne rozkładu logarytmiczno-normalnego największych opadów z 50-cio lecia pomiarów (1960-2009) dla wszystkich analizowanych czasów (od 5 do 4320 minut)
Rys. 6.5. Dystrybuanty teoretyczne rozkładu Pearsona typ III największych opadów z 50-cio lecia pomiarów (1960-2009) dla wszystkich analizowanych czasów (od 5 do 4320 minut)
Rys. 6.6. Sposób wyznaczania największej różnicy pomiędzy prawdopodobieństwami teoretycznym i empirycznym do testu λ-Kołmogorowa
Rys. 6.7. Zależność współczynnika α od czasu dla rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min}
Rys. 6.8. Zależność współczynnika β od czasu dla rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min}
Rys. 6.9. Zależność współczynnika ε od czasu dla rozkładu Fishera-Tippetta typ III_{min}
Rys. 6.10. Zbiorcze zestawienie krzywych wysokości opadu w czasie obliczonych modelem I
Rys. 6.11. Zbiorcze zestawienie krzywych wysokości opadu w logarytmicznej skali czasu obliczonych modelem I
Rys. 6.12. Zbiorcze zestawienie krzywych natężenia deszczu obliczonych modelem I
Rys. 6.13. Zależność współczynnika α od czasu dla rozkładu Pearsona typ III
Rys. 6.14. Zależność współczynnika λ od czasu dla rozkładu Pearsona typ III
Rys. 6.15. Zależność współczynnika ε od czasu dla rozkładu Pearsona typ III
Rys. 6.16. Zależność współczynnika t_p od prawdopodobieństwa p przy λ = 1,110 dla rozkładu Pearsona typ III
Rys. 6.17. Zbiorcze zestawienie krzywych wysokości opadu w czasie obliczonych modelem II
Rys. 6.18. Zbiorcze zestawienie krzywych wysokości opadu w logarytmicznej skali czasu obliczonych modelem II
Rys. 6.19. Zbiorcze zestawienie krzywych natężenia deszczu obliczonych z modelu II

MODELOWANIE OPADÓW DO WYMIAROWANIA KANALIZACJI

Streszczenie:

W celu podniesienia niezawodności działania systemów odwadniania terenów, w tym zwłaszcza kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej projektowanych i budowanych w Polsce, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 752:2008 pilna staje się potrzeba uściślenia zasad ich wymiarowania w oparciu o ciągłe pomiary opadów z okresu kilkudziesięciu lat dla wychwycenia trendu zmian klimatycznych, zwłaszcza w ostatnich dziesięcioleciach. O wiarygodności każdej metody obliczeniowej, jak w teorii niezawodności, decyduje najsłabsze ogniwo, w tym wypadku dokładność danych o opadach deszczu.

Opracowane w latach 50 i 60-tych ubiegłego wieku i utrwalone w literaturze przedmiotu zasady wymiarowania odwodnień terenów w Polsce, w tym zwłaszcza systemów kanalizacyjnych - z wyjściowym modelem Błaszczyka na natężenie deszczu są nieodpowiednie, tj. zaniżają wyniki obliczeń miarodajnych strumieni opadów, a tym samym prowadzą do niewłaściwego „zbyt oszczędnego" wymiarowania sieci i obiektów kanalizacyjnych. Zasady te wymagają weryfikacji, a zwłaszcza pilnego zastąpienia modelu Błaszczyka nowymi dokładniejszymi modelami, w tym o zasięgu lokalnym, na podstawie których możliwe byłoby w przyszłości opracowanie szczegółowego atlasu opadów w Polsce - na wzór atlasu KOSTRA w Niemczech.

Podstawą niniejszej pracy były wyniki pomiarów pluwiograficznych ze stacji meteorologicznej IMGW Wrocław-Strachowice z lat 1960-2009. Do wyodrębnienia z pluwiogramów intensywnych deszczy, do analiz statystycznych częstości ich występowania, przyjęto własne kryterium wysokości opadów, które pozwoliło na wyselekcjonowanie dla każdego roku od kilku do kilkunastu najintensywniejszych opadów, ściślej w sezonie obejmującym miesiące V-X. Łącznie z okresu 50 lat obserwacji do szczegółowej analizy statystycznej wyodrębniono 514 opadów syntetycznych, które następnie były szeregowane według nie rosnących wysokości w 16-u przedziałach czasowych ich trwania (od 5 minut do 72 godzin). Na tej podstawie opracowano modele fizykalne i probabilistyczne na maksymalną wysokość opadów (w tym przekształcone na natężenie jednostkowe) do projektowania odwodnień terenów w warunkach wrocławskich, a także sformułowano, zweryfikowano w praktyce i uogólniono dwie metodologie - fizykalnego bądź probabilistycznego opracowywania wyników pomiarów opadów, do zastosowania na innych stacjach meteorologicznych w kraju.

Słowa kluczowe:

opad deszczu, wysokość opadu, intensywność opadu, natężenie jednostkowe deszczu, prawdopodobieństwo przewyższenia, częstość występowania, opad syntetyczny, seria czasowa, model opadów.

PRECIPITATION MODELING FOR SEWERAGE MEASURING

Abstract:

For the purpose of improving the reliability of area drainage networks activity, precisely rainwater and combined sewage system, designed and built in Poland, in accordance with PN-EN 752:2008 standard, it is necessary to specify rules for their dimensioning on the base of constant measuring of precipitation in the period of tens of years for catching eventual climate changes tendency, especially in last decades. About reliability of every calculation method decides the weakest link, in this case accuracy of input data or algorithms of rainfall.

The rules of measuring of drainage area in Poland, which were worked out in the fifties and sixties of last century and became established in the literature, especially the sewerage systems - with the Błaszczyk's model for rain rate, are frequently not suitable, that means lower results of calculations of unreliable precipitation stream, that leads to wrong measuring of sewerage networks and objects. Those rules need verification, particularly urgent change of the Błaszczyk's model with new precise models, including local range, on which base would be probable to develop the precipitation atlas in Poland – like Kostra atlas in Germany.

The basis of this work were pluviographic measurements form IMGW meteorological station in Wrocław-Strachowice from years 1960-2009. For choosing pluviograms of intensive rainfalls and for statistic analysis of the frequency with which they had appeared, the own criterion of precipitation amount was accepted. It allowed to choose for each year several most intensive precipitations, precisely for season V-X. Altogether from 50 years of observations for detailed analysis the 514 rainfalls were singled out. Afterwards they were classified by amounts for each 16 time periods they lasted (form 5 minutes to 72 hours). On this basis physical and probabilistic models were formulated for the maximal precipitation amount for the purposes of designing the drainage area for conditions in Wrocław. Moreover two methodologies were elaborated, verified in practice and generalized for the use in other meteorological stations in the country - the physical or probabilistic description of rainfall measurement results.

Keywords:

rainfall, precipitation amount, precipitation intensity, rain unit rate, probability of superiority, occurrence rate, synthetic precipitation, time series, precipitation model

Zespół autorski:

Dr hab. inż. Andrzej Kotowski, prof. PWr.
Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska
Politechnika Wrocławska
andrzej.kotowski@pwr.wroc.pl

Mgr inż. Bartosz Kaźmierczak
Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska
Politechnika Wrocławska
bartosz.kazmierczak@pwr.wroc.pl

Mgr Andrzej Dancewicz
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Oddział we Wrocławiu
andrzej.dancewicz@imgw.wroc.pl