

Analiza czasowej i przestrzennej zmienności opadów w zlewni potoku Strzyża w Gdańsku

**Mgr inż. Katarzyna Bielecka, dr inż. Katarzyna Weinerowska-Bords, dr hab. inż. Michał Szydłowski
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**

Wiele zagadnień szeroko pojętej inżynierii środowiska, szczególnie związanych z hydrologią, wymaga znajomości charakterystyk opadowych na analizowanym obszarze. W odniesieniu do terenów zurbanizowanych można tu wymienić przede wszystkim: projektowanie i eksploatację systemów kanalizacji deszczowej, odwodnień, zbiorników retencyjnych i innych obiektów

związanych z gospodarowaniem wodami opadowymi, czy też bardziej złożone zagadnienia, takie jak: sterowanie pracą urządzeń i obiektów hydrotechnicznych, wyznaczanie stref ochrony przeciwpowodziowej itp. Każde z tych zadań inżynierskich wymaga mniej lub bardziej szczegółowego odwzorowania transformacji opadu w odpływ. Stopień tej szczegółowości jest podstawą

wyboru metody obliczeniowej, a jednocześnie w dużym stopniu decyduje o dokładności uzyskiwanych wyników obliczeń.

W przypadku prostszych zadań inżynierskich (np. projektowania typowych systemów odprowadzania wód opadowych), zazwyczaj wystarczającą daną wejściową wnoszącą informację o opadzie jest opad miarodajny zdefiniowany jako deszcz o stałym w czasie i jednakowym na rozpatrywanym obszarze natężeniu, charakteryzujący się określonym czasem trwania i prawdopodobieństwem wystąpienia $q(t_d, p)$ [5, 10]. Obliczeniowy czas trwania deszczu t_d oraz prawdopodobieństwo jego wystąpienia p określane są na podstawie obliczeń lub ogólnego doboru, w zależności od rodzaju rozpatrywanego zagadnienia i charakteru analizowanego obiektu/systemu. Z kolei ogólna postać relacji $q(t_d, p)$, zwana najczęściej formułą opadową lub formułą IDF (ang. *Intensity-Duration-Frequency*), powinna możliwie dobrze odwzorowywać charakterystykę opadów na analizowanym obszarze.

Do bardziej złożonych zadań inżynierskich, wymagających odwzorowania nieustalonego charakteru transformacji opad – odpływ, informację wejściową o opadzie stanowi zazwyczaj reprezentatywny dla danego zagadnienia hietogram opadu. W zależności od analizowanego problemu, może on mieć charakter historyczny (czyli stanowić hietogram rzeczywistego, zaobserwowanego na danym obszarze epizodu opadowego) lub syntetyczny. W tym drugim przypadku, na potrzeby rozpatrywanego zagadnienia na drodze obliczeniowej opracowywany jest „sztuczny” hietogram, reprezentatywny dla analizowanego przypadku. Hietogramy takie są wyznaczane najczęściej przy wykorzystaniu uprzednio opracowanych formuł IDF dla danego obszaru.

Prawidłowe wyznaczenie formuł opadowych $q(t_d, p)$ jest procesem pracochłonnym i relatywnie trudnym. Niezbędnym warunkiem do jego przeprowadzenia jest dysponowanie zapisami z obserwacji opadów na analizowanym obszarze, prowadzonych w sposób regularny, w dostatecznie długim okresie czasu. Brak lub ograniczony dostęp do wieloletnich ciągów pomiarowych skutecznie uniemożliwia opracowanie wspomnianych wyżej zależności. W wielu przypadkach konieczne jest stosowanie tzw. globalnych formuł opadowych, opracowanych dla obszarów o relatywnie dużych rozmiarach – regionu lub całego kraju. W przypadku Polski najpopularniejszą formułą opadową nadal pozostaje stary (1954 r.) wzór Błaszczyka [2]:

$$q = \frac{6,631 \sqrt[3]{H^2 c}}{t_d^{0,67}} \quad [\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})] \quad (1)$$

gdzie:

c – częstość jednokrotnego przekroczenia deszczu o danym natężeniu wyrażona w latach,

t_d – miarodajny czas trwania deszczu [min],

H – średnia roczna wysokość opadu [mm].

Wzór ten powoli wypierany jest przez opracowaną w 1998 roku w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie formułę [3, 4], zwaną dalej wzorem IMGW, pozwalającą określić maksymalną wysokość opadów P [mm] o prawdopodobieństwie p [–] według relacji:

$$P_{\max, p} = 1,42 t_d^{0,33} + \alpha (-\ln p)^{0,548} \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

gdzie;

t_d – czas trwania deszczu [min],

α – tzw. parametr położenia i skali, zależny od regionu i czasu trwania opadu.

Oba wspomniane wyżej wzory mają charakter „globalny”, chociaż w każdym z nich pojawia się element umożliwiający częściową ich regionalizację (w przypadku wzoru Błaszczyka – wartość H , w przypadku wzoru IMGW – wspomniany parametr α). Zasadniczo lepszym jednak rozwiązaniem jest posługiwanie się w obliczeniach tzw. lokalnymi formułami opadowymi, czyli relacjami $q(t_d, p)$ opracowanymi na podstawie obserwacji opadów na rozpatrywanym obszarze, wyznaczanymi indywidualnie dla danego terenu (miasta, dzielnicy, zlewni) i w związku z tym w możliwie najlepszy sposób oddającymi lokalną specyfikę opadów. Niestety, opracowanie takich formuł wymaga dużych nakładów pracy, zarówno na etapie prowadzenia pomiarów i gromadzenia ich wyników, jak i dalszego ich opracowywania statystycznego.

OPADY W GDAŃSKU

Warunki geograficzne i klimatyczne na obszarze miasta Gdańska, w tym także charakterystyki opadowe, są nie tylko odmienne w stosunku do tych, jakie panują w innych częściach regionu lub kraju, ale także wykazują duże zróżnicowanie czasowe i przestrzenne w obrębie samej aglomeracji. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest specyficzna lokalizacja Gdańska oraz – dodatkowo – procesy urbanizacyjne, przebiegające z różną intensywnością w różnych rejonach miasta. W celu opracowania prawidłowej charakterystyki opadów na potrzeby inżynierskie konieczna jest analiza zmienności opadów zarejestrowanych w możliwie dużej liczbie stacji, by móc ocenić, w jakim stopniu obszarowa zmienność opadów wpływa na postać relacji $q(t_d, p)$.

Obserwacje meteorologiczne w Gdańsku mają długą tradycję [8], paradoksalnie jednak, do chwili obecnej nie opracowano formuł opadowych, które mogłyby dla tego regionu stanowić alternatywę do stosowanej powszechnie formuły Błaszczyka. Na terenie miasta funkcjonują obecnie trzy stacje meteorologiczne/klimatyczne objęte siecią posterunków IMGW (Rębiechowo, Port Północny, Świbno) oraz wiele posterunków prywatnych (w tym kilkanaście stacji pozostających w gestii Gdańskich Melioracji, posterunki Politechniki Gdańskiej (PG) – w Jelitkowie i na terenie uczelnianego kampusu). W ramach realizowanych aktualnie projektów badawczych związanych tematycznie z monitoringiem i modelowaniem zagrożeń powodziowych w zlewniach miejskich trwają prace nad uruchomieniem nowych stacji pomiarów opadów atmosferycznych na terenie Gdańska, docelowo będących własnością Gdańskich Melioracji (rys. 1).

Ogólną charakterystykę opadów obserwowanych w ostatnim 60-leciu na terenie Gdańska, wykazującą ich dużą zmienność oraz wyraźny trend wzrostowy w stosunku do średniej rocznej wysokości opadów, przedstawiła Wołoszyn [12]. Zgodnie z tą charakterystyką, uśredniona wartość rocznej wysokości opadów w całym wspomnianym okresie wynosi 550 mm i jest nieco niższa od średniej rocznej wysokości opadów dla całej Polski. Z kolei analizę opadów obserwowanych w okresie 20 lat na stacji pomiarowej Politechniki Gdańskiej prowadziły Rzeszutek [9] i Weinerowska-Bords [11]. W ostatniej z wymienionych prac zaproponowano metodykę opracowania i wyznaczono lokalne formuły opadowe dla rejonu Gdańska-Wrzeszcza. Prezentowany artykuł stanowi kontynuację wcześniejszych prac i obejmuje analizę opadów dla stacji pomiarowych zlokalizowanych na obszarze zlewni potoku Strzyża.



Rys.1. Stacje pomiarów opadów na terenie Gdańska

ANALIZA OPADÓW ZAREJESTROWANYCH NA STACJACH POMIAROWYCH NA OBSZARZE ZLEWNI POTOKU STRZYŻA W GDAŃSKU

Materiał badawczy

Dane opadowe, którymi posłużono się w pracy, stanowił archiwalny zbiór rejestrów pluwiograficznych oraz cyfrowych zapisów z deszczomierzy automatycznych pozyskany z zasobów Gdańskich Melioracji. Rejestry te pochodzą z ciągłych pomiarów opadów dla okresów dodatniej temperatury powietrza, czyli – na ogół – od kwietnia do listopada każdego roku. Do analiz wybrano trzy stacje, które zlokalizowane są na terenie zlewni potoku Strzyża [1]. Pierwszą z nich jest stacja umiejscowiona we Wrzeszczu przy skrzyżowaniu ulic Reja i Kochanowskiego nad potokiem Strzyża o nazwie: BYSTRZEC–REJA. Pomiar opadów i zapis wyników dokonywany jest od 23 maja 2001 roku przez automatyczną stację pomiarową (czujnik opadu atmosferycznego OP2G, rejestrator RC-12S, modem przesyłowy MTP-2.0), która z rozdzielczością czasową równą 10 minut przekazuje dane do Internetu. Druga stacja zlokalizowana jest na terenie Ośrodka Młodzieżowego MODeM przy Sanktuarium Matki Bożej Brzemiennej przy ul. Matemblewskiej 9 i nosi nazwę MATEMBLEWO. Pomiar i zapis opadów na tej stacji dokonywany jest od 1 kwietnia 2005 roku i odbywa się również automatycznie (przy wykorzystaniu analogicznej aparatury jak na stacji BYSTRZEC-REJA). Ostatnią z analizowanych stacji jest posterunek o nazwie KIEŁPINO GÓRNE, znajdujący się przy ulicy Goplańskiej 69. Pomiar opadów realizowany jest tam z zastosowaniem klasycznego pluwiografu pływakowego (model PG- 891), tworzącego zapis w formie papierowych pluwiogramów o rozdzielczości czasowej 60 minut, a ciąg obserwacyjny trwa od 10 kwietnia 2006 roku.

Metodyka opracowywania danych pomiarowych

Materiał badawczy, jakim dysponowano, cechuje się niejednorodnością, zarówno w stosunku do metody pomiarowej, jak i kroku czasowego, z jakim były rejestrowane mierzone wysokości opadu na każdej ze stacji. Dodatkowym mankamentem wspomnianych danych opadowych jest krótki okres pomiarowy wynikający z nieodległego w czasie założenia posterunków pomiarowych, dodatkowo przerywany okresami awarii lub konserwacji urządzeń pomiarowych. Długość okresu obserwacyjnego w przypadku stacji BYSTRZEC-REJA wynosiła 10 lat, natomiast w przypadku stacji MATEMBLEWO i KIEŁPINO GÓRNE – odpowiednio 6 i 5 lat. Ze względu na powyższe czynniki w chwili obecnej nie ma jeszcze możliwości opracowania wiarygodnych formuł opadowych dla wspomnianych lokalizacji. Pomimo tego analiza dotychczas zgromadzonych danych stanowi ciekawe zagadnienie i może być przyczynkiem do dalszych analiz, a także pierwszym krokiem do opracowania w przyszłości – po uzyskaniu dostatecznie długich ciągów pomiarowych – lokalnych formuł opadowych dla rozpatrywanego obszaru.

Ze względu na prowadzenie analiz porównawczych jest konieczne przyjęcie ujednoliconej metodologii opracowywania danych opadowych. Najczęściej stosowane podejścia do tego problemu przedstawiono, między innymi u Licznara [6, 7], Kottowskiego [5] i Weinerowskiej-Bords [11]. Do analizy opadów w Gdańsku zastosowano metodologię opisaną bardziej szczegółowo w ostatniej z wyżej wymienionych pozycji.

W pierwszym etapie analiz wyodrębniono z całego okresu opadów epizody o znaczeniu inżynierskim. W opracowaniu wykorzystano tzw. metodę maksymalnych natężeń fazowych. Jako ostateczne kryterium wyboru epizodu przyjęto za Licznarem [7] spełnienie warunku:

Tabl. 1. Liczba epizodów opadowych z okresu 2001-2010 na stacji Bystrzec-Reja objętych analizą (na podstawie [1])

Liczba epizodów										
Miesiąc/rok	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Kwiecień	–	–	–	–	5	–	–	–	–	–
Maj	–	–	3	1	2	–	4	–	2	1
Czerwiec	–	–	–	–	23	6	2	–	4	2
Lipiec	5	–	1	3	18	3	1	3	5	2
Sierpień	–	–	2	3	6	1	2	5	2	6
Wrzesień	–	–	1	–	7	5	3	–	1	2
Październik	–	–	1	–	–	1	2	–	1	–
Listopad	–	–	–	2	–	1	–	–	–	–
Grudzień	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–
Razem	5	0	8	9	61	17	14	9	15	13

Tabl. 2. Liczba epizodów opadowych z okresu 2006-2010 na stacji Matemblewo objętych analizą [1]

Liczba epizodów					
Miesiąc/rok	2006	2007	2008	2009	2010
Styczeń	–	1	–	–	–
Luty	–	–	–	–	–
Marzec	1	–	–	–	–
Kwiecień	–	–	–	–	–
Maj	2	6	1	2	1
Czerwiec	2	5	–	2	1
Lipiec	1	3	1	4	2
Sierpień	5	–	5	1	9
Wrzesień	2	2	2	–	4
Październik	1	2	–	–	–
Listopad	–	–	–	–	–
Grudzień	–	–	–	–	–
Razem	14	19	9	9	17

Tabl. 3. Liczba epizodów opadowych z okresu 2006-2011 na stacji Kiełpino Górne objętych analizą [1]

Liczba epizodów						
Miesiąc/rok	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Kwiecień	–	–	2	–	–	–
Maj	–	4	–	1	–	–
Czerwiec	2	3	3	2	1	–
Lipiec	2	2	2	3	3	2
Sierpień	1	1	1	1	5	3
Wrzesień	2	2	2	1	2	–
Październik	1	1	–	1	–	–
Listopad	1	–	–	–	–	–
Grudzień	–	–	–	–	–	–
Razem	9	13	10	9	11	5

WO (około 14 epizodów/rok w okresie 2006-2010) oraz 57 na posterunku KIEŁPINO GÓRNE (nieco mniej niż 10 epizodów/rok w okresie 2006-2011). Szczegółowe zestawienie liczby epizodów wyizolowanych do dalszych analiz dla poszczególnych stacji przedstawiono w tabl. 1, 2, 3.

Większość ekstremalnych epizodów opadowych zanotowano w okresie od maja do sierpnia. Ich liczba przypadająca na poszczególne lata jest bardzo zmienna, waha się od 0 do 61. Przeciętna roczna liczba epizodów spełniających przyjęte kryterium wynosi około 13 i jest wyższa niż analogiczny wskaźnik dla stacji zlokalizowanej na Politechnice Gdańskiej [11].

Do celów porównawczych istotne znaczenie mają także wartości miesięcznych, sezonowych i rocznych sum wysokości opadów atmosferycznych w analizowanych stacjach, pozyskane z Gdańskich Melioracji i przedstawione w tabl. 4, 5, 6.

Kolejnym etapem opracowywania wyników była analiza każdego z wyselekcjonowanych epizodów opadowych pod kątem maksymalnych natężeń fazowych. W tym celu dla przyjętych

$$P \geq 0,75 \cdot U_0 \quad (3)$$

gdzie:

P – wysokość opadu w danym okresie [mm],

U_0 – wartość graniczna, zależna od długości analizowanej fazy opadu t [min], stanowiąca według skali Chomicza kryterium rozróżnienia deszczów silnych od zwykłych, określane według zależności:

$$U_k = \sqrt{2^k} \cdot \sqrt{t} \quad \text{dla } k = 0 \quad (4)$$

Zaniżenie kryterium Chomicza do 75% miało na celu zwiększenie liczby intensywnych epizodów opadowych stanowiących podstawę analiz, tak, by każdy sezon reprezentowany był przez co najmniej kilka epizodów. W rezultacie łącznie do analiz wytypowano: 153 epizody na stacji BYSTRZEC-REJA (około 15 epizodów/rok w okresie 2001-2010), 68 na stacji MATEMBLE-

Tabl. 4. Wartości miesięcznych, sezonowych i rocznych sum wysokości opadów atmosferycznych [mm] w okresie 2008-2010 na stacji Bystrzec-Reja (źródło: Gdańskie Melioracje)

Suma wysokości opadów [mm]			
Miesiąc/rok	2008	2009	2010
Styczeń	41,3	23,8	25,3
Luty	22,5	33,3	23,7
Marzec	83,5	58,6	29,1
Kwiecień	51,4	0,3	9,4
Maj	24,2	77,1	100,1
Czerwiec	61,4	62,6	25,2
Lipiec	98,4	109,4	88,6
Sierpień	162,2	23,9	140,0
Wrzesień	50,0	40,5	151,6
Październik	55,9	87,4	16,4
Listopad	35,4	43,4	127,8
Grudzień	33,0	57,9	62,0
Suma	719,2	618,2	799,2
Suma – ciepła połowa roku	452,1	400,9	521,9

Tabl. 6. Wartości miesięcznych, sezonowych i rocznych sum wysokości opadów atmosferycznych [mm] w okresie 2008-2010 na stacji Kiełpino Górne (źródło: Gdańskie Melioracje)

Suma wysokości opadów [mm]			
Miesiąc/rok	2008	2009	2010
Styczeń	-	-	-
Luty	-	-	-
Marzec	-	-	-
Kwiecień	54,4	1,3	10,3
Maj	27,6	79,9	86,1
Czerwiec	59,8	92,2	30,3
Lipiec	66,3	115,8	119,4
Sierpień	113,5	22,5	181,8
Wrzesień	62,5	39,4	149,6
Październik	57,8	107,6	15,2
Listopad	48,3	45,6	114,6
Grudzień	-	-	-
Suma	-	-	-
Suma- ciepła połowa roku	387,5	457,4	582,4

Tabl. 5. Wartości miesięcznych, sezonowych i rocznych sum wysokości opadów atmosferycznych [mm] w okresie 2008-2010 na stacji Matemblewo (źródło: Gdańskie Melioracje)

Suma wysokości opadów [mm]			
Miesiąc/rok	2008	2009	2010
Styczeń	38,1	36,0	39,3
Luty	25,7	31,4	26,1
Marzec	81,4	77,9	32,5
Kwiecień	62,3	0,9	10,3
Maj	25,4	74,3	99,0
Czerwiec	56,1	77,9	25,8
Lipiec	70,3	127,2	109,3
Sierpień	139,4	20,8	184,3
Wrzesień	63,4	40,8	204,0
Październik	63,6	109,7	18,3
Listopad	41,4	50,2	140,8
Grudzień	37,2	52,4	80,8
Suma	704,3	699,5	970,5
Suma – ciepła połowa roku	418,2	450,7	640,7

długości faz wybierano najintensywniejszy fragment deszczu o zadanym czasie trwania i określano średnie natężenie w tym okresie. Dla każdej z trzech rozpatrywanych stacji minimalny zakres analiz obejmował fazy o długości 10 min, 20 min, 30 min, ... (30 + i · 30) min dla i = 1, 2, ... aż do $t_d = \min [T_{max}, 100]$,

gdzie T_{max} jest całkowitym czasem trwania danego epizodu. W przypadku stacji BYSTRZEC-REJA oraz MATEMBLEWO możliwa była bardziej szczegółowa analiza (obejmująca także długości pośrednie faz, z rozdzielczością czasową 10 min) bez stosowania dodatkowych zabiegów obliczeniowych, gdyż zapis wyników pomiarów opadu dokonywany był z krokiem 10 min. W przypadku stacji KIEŁPINO GÓRNE dysponowano tylko zapisami pluwiograficznymi o dokładności umożliwiającej analizę natężeń opadów dla faz nie krótszych niż 60 min (pluwiogramy tygodniowe). Opracowanie granicznych natężeń fazowych opadu dla faz o długościach krótszych niż 60 min wymagało dodatkowych zabiegów obliczeniowych, koniecznych z racji istotności krótkich czasów trwania deszczów w zagadnieniach inżynierskich. Dla każdego epizodu opadowego zarejestrowanego na stacji KIEŁPINO GÓRNE opracowanego indywidualnie pod kątem maksymalnych natężeń granicznych wyznaczono zależność $q(t)$, gdzie q jest zaobserwowanym w czasie danego epizodu maksymalnym natężeniem granicznym odpowiadającym fazie długości t . Zależność tę następnie aproksymowano w zakresie $t \geq 60$ min i ekstrapolowano na wartości $t < 60$ min. Na jej podstawie określono brakujące wartości natężeń fazowych dla faz o długości 10 min, 20 min i 30 min – dla każdego epizodu indywidualnie. Zastosowanie takiego postępowania uzasadnia analiza podobnych zależności epizodów opadowych zanotowanych w pozostałych rozpatrywanych stacjach na terenie Gdańska (MATEMBLEWO, BYSTRZEC-REJA oraz posterunek PG), która wykazała, że zarejestrowane epizody opadowe w zakresie długości faz $t \geq 10$ min można w przeważającej większości opisać zależnościami rodzaju logarytmicznego ($R^2 > 0,97$). Zaledwie nieliczne przypadki epizodów prowadzą do niższych wartości współczynnika korelacji Pearsona lub wymagają zastosowania potęgowej postaci funkcji aproksymującej. W każdym

przypadku epizod opadowy można opisać jednak funkcją $q(t)$ o prostej postaci, co wykorzystano w przeprowadzonych analizach.

W kolejnym etapie prac natężenia fazowe z wszystkich epizodów zaobserwowanych w danej stacji pogrupowano w tabelach, osobnych dla każdej fazy i dokonano uporządkowania natężeń w ciągu nierosnące. Na tym etapie było możliwe skorygowanie liczby wyrazów w danym ciągu poprzez ponowne sprawdzenie kryterium (3), tym razem dla t równego długości poszczególnych faz. Uzyskane uporządkowane dane opadowe poddano analizie statystycznej, stosując empiryczną metodę opracowywania relacji $q(t_d)$ oraz $q(p)$. Z wcześniej wspomnianych przyczyn nie opracowano uogólnionej formuły $q(t_d, p)$ – byłaby ona niewiarygodna i nie miała żadnego zastosowania praktycznego. Wyznaczone zależności $q(t_d)$ oraz $q(p)$ mają na obecnym etapie znaczenie orientacyjne, porównawcze i powinny być weryfikowane na podstawie wyników obserwacji opadów w kolejnych latach.

W empirycznej metodzie opracowania formuł opadowych do uzyskanych wyników pomiarów dopasowuje się ogólną postać tej formuły, niekoniecznie na bazie znanych rozkładów teoretycznych stosowanych w hydrologii, a następnie wyznacza parametry zaproponowanych zależności na drodze ich aproksymacji/optimalizacji. W tym celu każdemu wyrazowi uporządkowanych wcześniej ciągów rozdzielczych przypisano prawdopodobieństwo empiryczne według Weibulla, zgodnie z formułą:

$$p_i = \frac{i}{N+1} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

gdzie:

i – numer wyrazu w danym ciągu,

N – całkowita liczba wyrazów w ciągu.

Następnie poddano analizie zależności $q(p)$ dla poszczególnych czasów trwania t_d oraz zależności $q(t_d)$ w przyjętych wartościach prawdopodobieństw. Określono najbardziej odpo-

wiednie ogólne postaci zależności i dokonano identyfikacji ich parametrów. Na podstawie przeprowadzonych analiz oceniono, że najodpowiedniejszą postacią formuły opisującej zależność $q(p)$ jest:

- w przypadku stacji BYSTRZEC-REJA – funkcja logarytmiczna:

$$q = -a \cdot \ln p + b \quad (6)$$

- w przypadku stacji MATEMBLEWO i KIELPINO GÓRNE – funkcja potęgowa:

$$q = a \cdot p^{-b} \quad (7)$$

Próby ujednoczenia postaci funkcji dla wszystkich stacji powodowały wyraźne niezgodności w uzyskiwanych wynikach dla krótkich czasów trwania deszczu oraz znaczący spadek współczynników korelacji. Stąd uznano, że istotniejsze jest w miarę możliwości wierne odwzorowanie wartości natężeń opadów niż uzyskanie jednolitej i uniwersalnej zależności, tym bardziej, że i tak konieczna jest jej weryfikacja w dłuższym okresie obserwacji opadów. Uzyskane na tym etapie analiz zależności dla poszczególnych stacji i wybranych czasów trwania deszczu przedstawiono na rys. 2, 3, 4.

W przypadku relacji $q(t_d)$ do wybranych wartości prawdopodobieństwa wystąpienia deszczu najodpowiedniejszą postacią formuły okazały się:

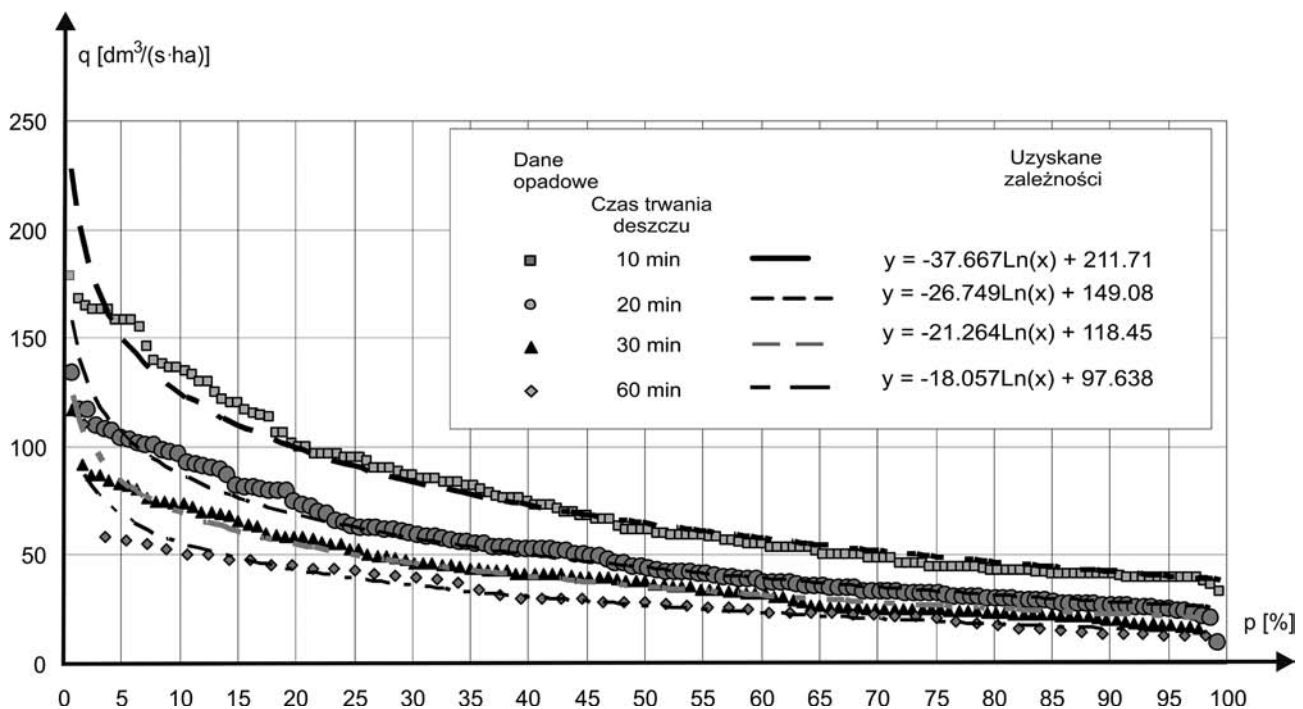
- dla stacji BYSTRZEC-REJA – funkcja potęgowa:

$$q = a \cdot t_d^{-b} \quad (8)$$

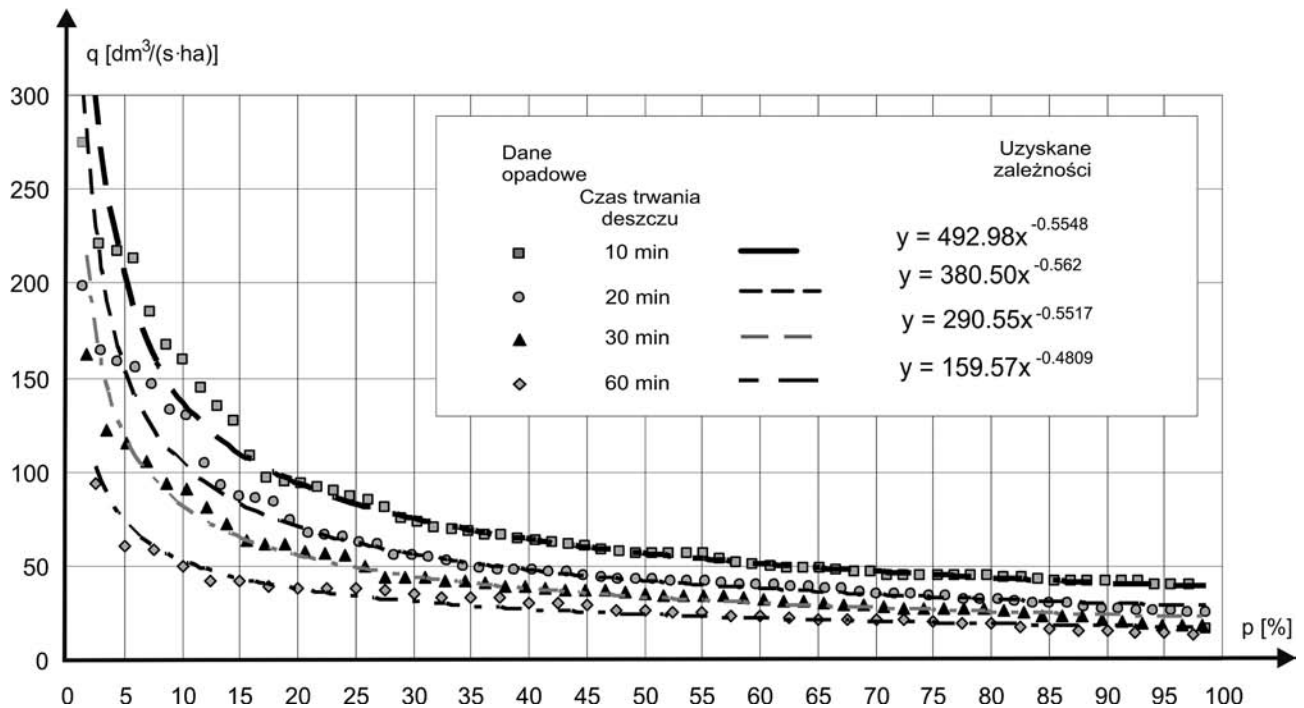
- w przypadku stacji MATEMBLEWO i KIELPINO GÓRNE – funkcja logarytmiczna:

$$q = -a \cdot \ln t_d + b \quad (9)$$

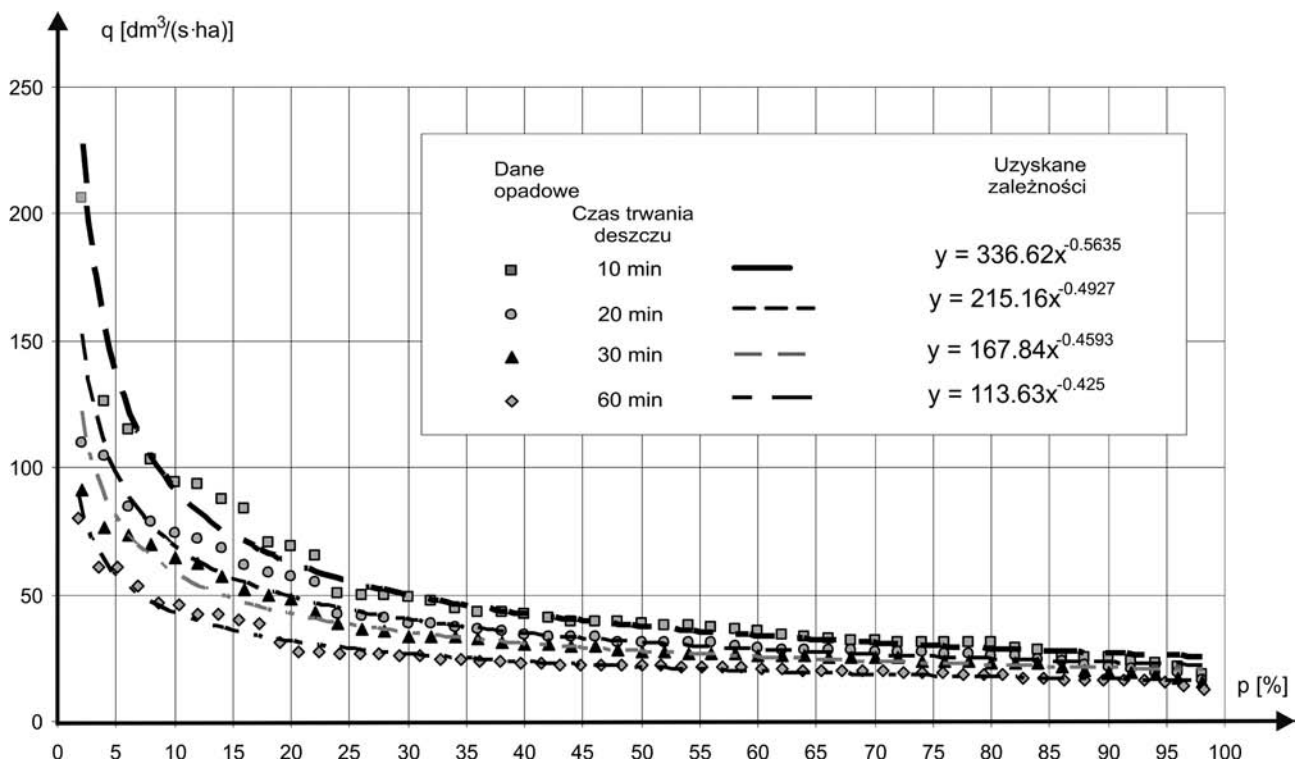
Uzyskane zależności $q(t_d)$ dla poszczególnych stacji i wybranych wartości p przedstawiono na wykresach (rys. 5, 6 i 7).



Rys. 2. Zestawienie relacji $q(p)$ dla różnych czasów trwania t_d dla stacji BYSTRZEC-REJA



Rys. 3. Zestawienie relacji $q(p)$ dla różnych czasów trwania t_d dla stacji MATEMBLEWO



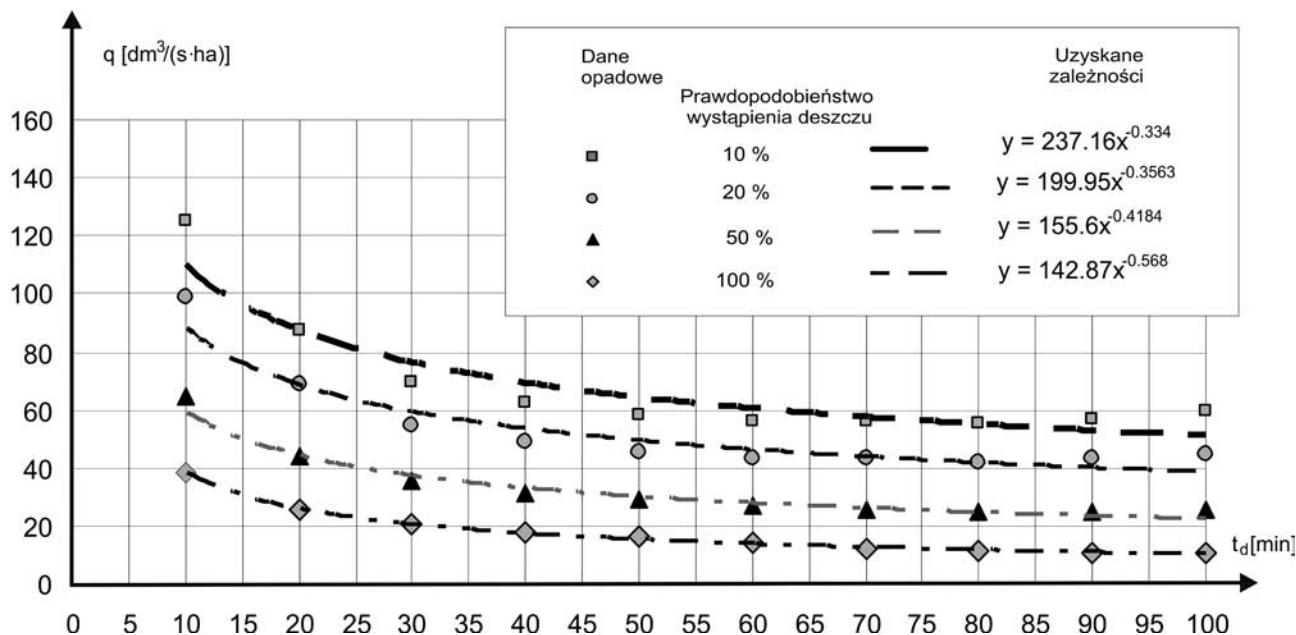
Rys. 4. Zestawienie relacji $q(p)$ dla różnych czasów trwania t_d dla stacji KIELPINO GÓRNE

ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

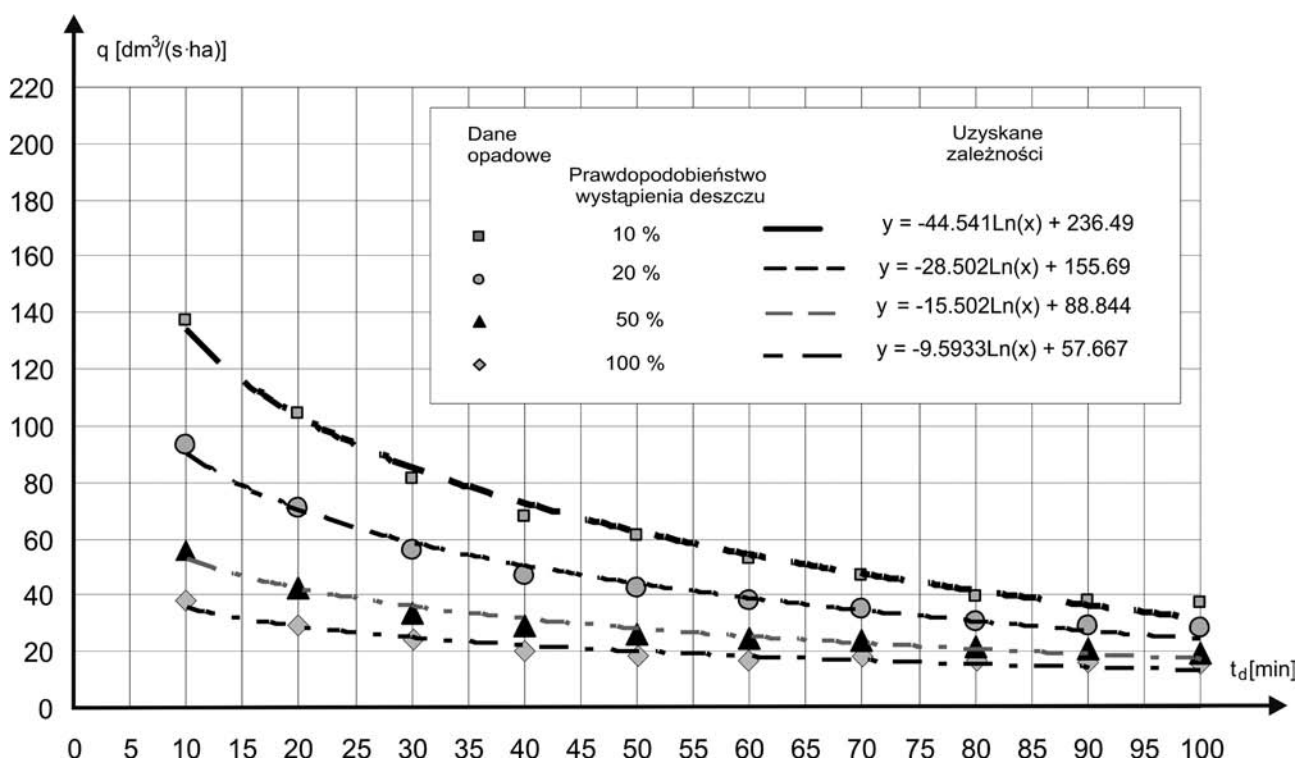
Przeprowadzone analizy dotyczące krótkich okresów obserwacyjnych pozwalają sformułować wstępne wnioski, które z oczywistych względów wymagają wspomnianej wcześniej weryfikacji dla dłuższych okresów obserwacyjnych.

Badania potwierdziły, że opady w Gdańsku wykazują relatywnie dużą zmienność, zarówno czasową, jak i przestrzenną.

W przypadku długookresowych zmian opadów w czasie już wcześniej inni autorzy wykazywali stosunkowo duże wahania, z ogólną tendencją wzrostową. O ile wyniki Wołoszyn [12] wskazywały dla dłuższych wielolecia średnią roczną wysokość opadów niższą od 600 mm (średnia z wielolecia 1951-2008: 520 mm), to już dla wielolecia 2001-2008 był przekroczony próg 600 mm (602 mm). Pomiary w latach 2008-2010 na stacjach BYSTRZEC-REJA i MATEMBLEWO wykazały jeszcze wyż-



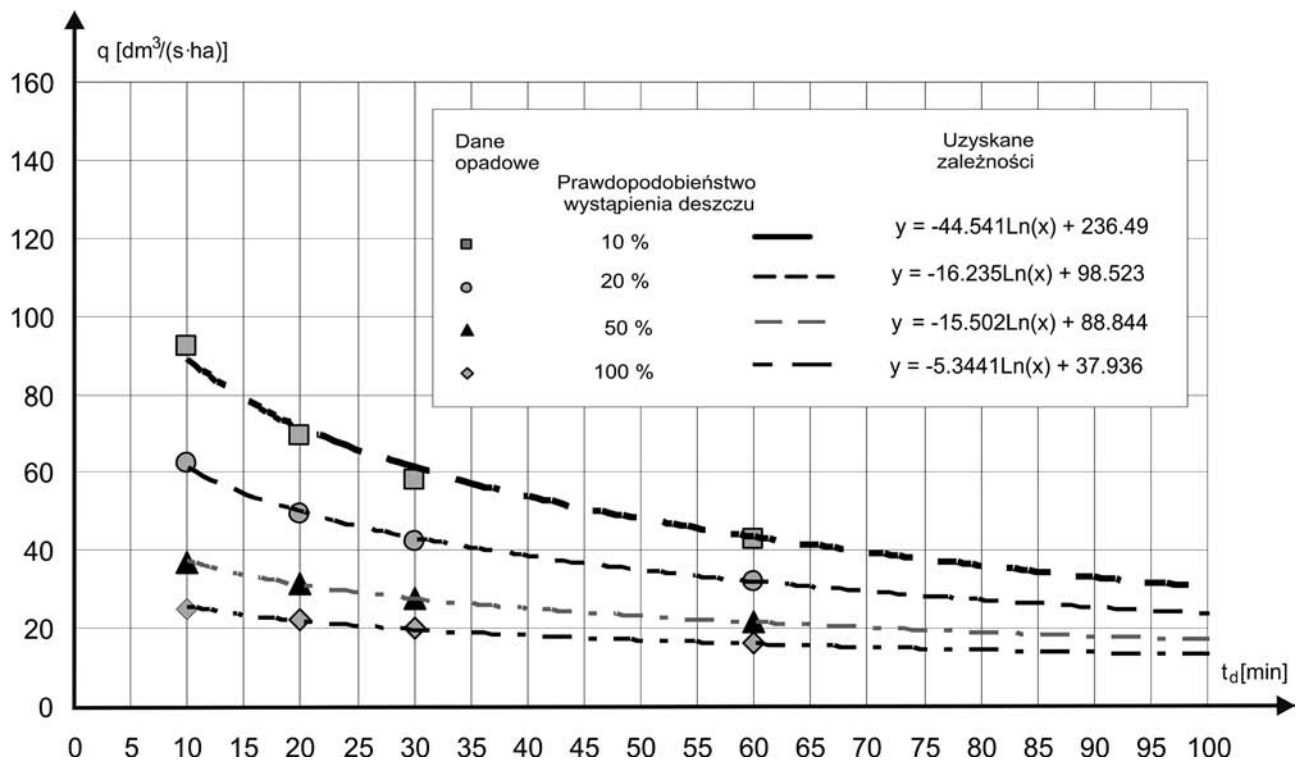
Rys. 5. Zestawienie relacji $q(t_d)$ dla różnych prawdopodobieństw wystąpienia opadu p na stacji Bystrzec-Reja



Rys. 6. Zestawienie relacji $q(t_d)$ dla różnych prawdopodobieństw wystąpienia opadu p na stacji Matemblewo

sze wartości, przy czym (z wyjątkiem roku 2009 na stacji BYSTRZEC-REJA) roczne wysokości opadów znacząco przekraczały wcześniejsze, wynosząc niekiedy nawet ponad 900 mm. Może to potwierdzać zauważony wcześniej trend wzrostowy. Wniosek ten wymaga potwierdzenia w kolejnych latach obserwacji. Warto zauważyć, że mimo relatywnie niewielkich odległości między stacjami wartości wysokości opadów różnią się znacząco, także w sensie przestrzennym. Przykładowo, w roku 2010 sumaryczna wysokość opadu na stacji BYSTRZEC-REJA wyniosła prawie 800 mm, natomiast w MATEMBLEWIE aż

970 mm. Porównanie wysokości opadów sumowanych w ciepłej połowie roku wykazują mniejsze, ale jednak widoczne zróżnicowanie, zarówno czasowe, jak i przestrzenne. Opracowywanie więc lokalnych zależności nie tylko uśrednionych dla obszaru określonej aglomeracji miejskiej, ale także indywidualnie dla poszczególnych dzielnic wydaje się bardzo uzasadnione. Co więcej, wniosek ten potwierdza nie tylko analiza sumarycznej wysokości opadów, ale także struktura rozkładu opadów intensywnych (zarówno co do liczby epizodów, jak i ich długości).



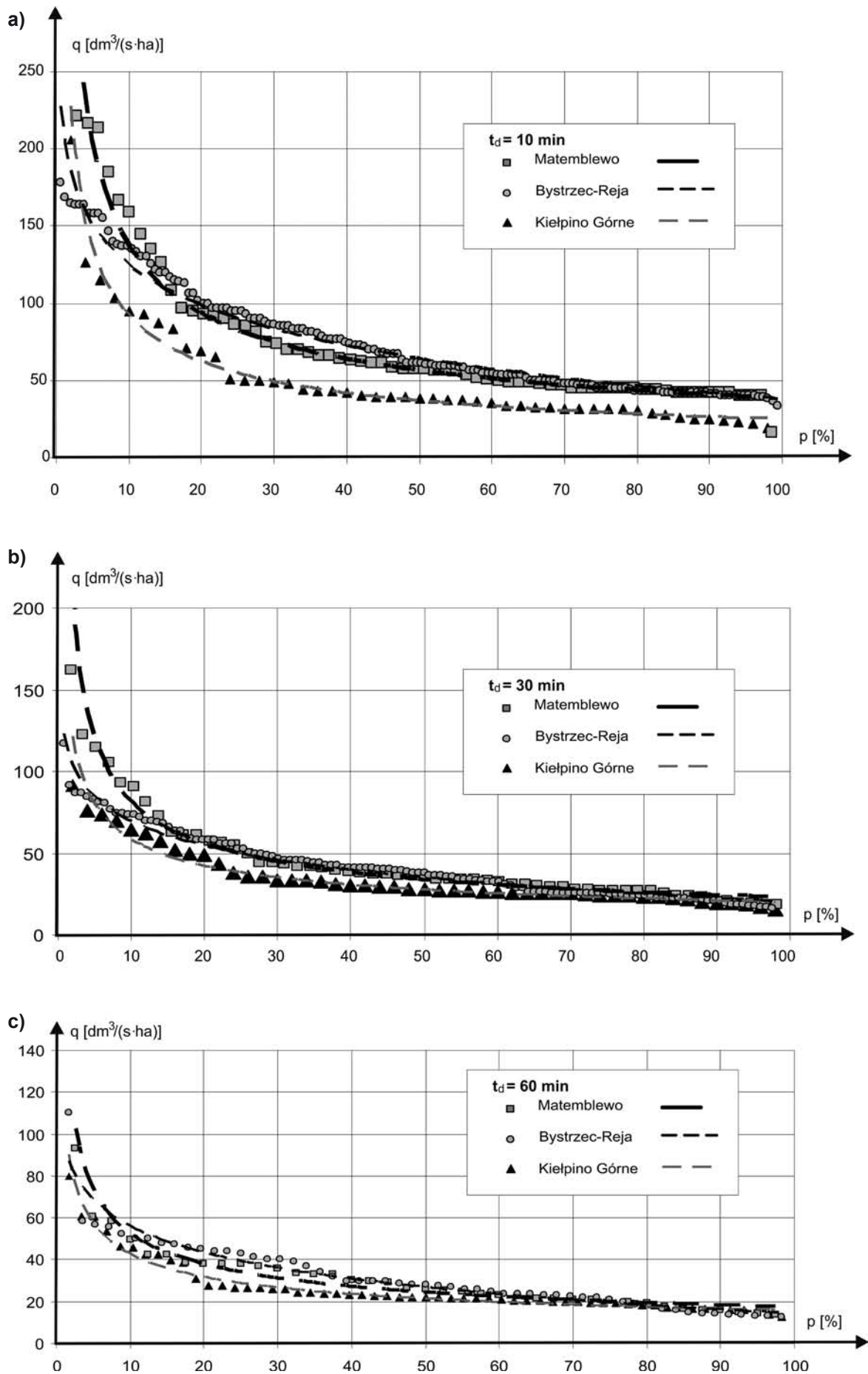
Rys. 7. Zestawienie relacji $q(t_d)$ dla różnych prawdopodobieństw wystąpienia opadu p na stacji Kiełpino Górne

W przypadku KIELPINA GÓRNEGO z materiału badawczego wyizolowano mniej epizodów opadów niż w przypadku pozostałych dwóch stacji. Może to świadczyć o zasadniczo innych charakterystykach opadowych w tej lokalizacji. Może to być także efektem niejednorodnej techniki pomiarowej. Nie była tu bowiem możliwa bezpośrednia analiza epizodów krótszych niż 60 minut. Różnica w liczbie epizodów może być potencjalnie efektem występowania krótkich i intensywnych opadów, których nie udało się zidentyfikować na podstawie tygodniowych pluwiogramów. Niestety wydaje się, że tej kwestii nie uda się w pełni rozstrzygnąć przy obecnie funkcjonującym systemie pomiarowym. Pomocne mogłoby być porównanie wyników z wynikami zanotowanymi w innych stacjach. Konfrontacja z analizami przeprowadzonymi dla stacji PG wykazuje, że w przypadku tej ostatniej zanotowano jeszcze wyraźniejsze wahania liczby epizodów intensywnych, przypadającej na poszczególne lata (od 4 do 13 w okresie 1991-2010, a od 8 do 13 w okresie 2006-2010). Z wyjątkiem 2008 roku liczba ta była również niższa od odpowiadającej jej wartości dla stacji BYSTRZEC-REJA i MATEMBLEWO. Paradoksalnie w 2008 roku, gdy na stacjach MATEMBLEWO i BYSTRZEC-REJA zaobserwowano najmniej epizodów znaczących, na stacji PG liczba ta osiągnęła maksimum w badanym tam 20-leciu [11]. Wnioski te, choć nie mogą mieć charakteru wiążącego, mogą jednak sugerować duży stopień zróżnicowania charakterystyk opadowych w Gdańsku.

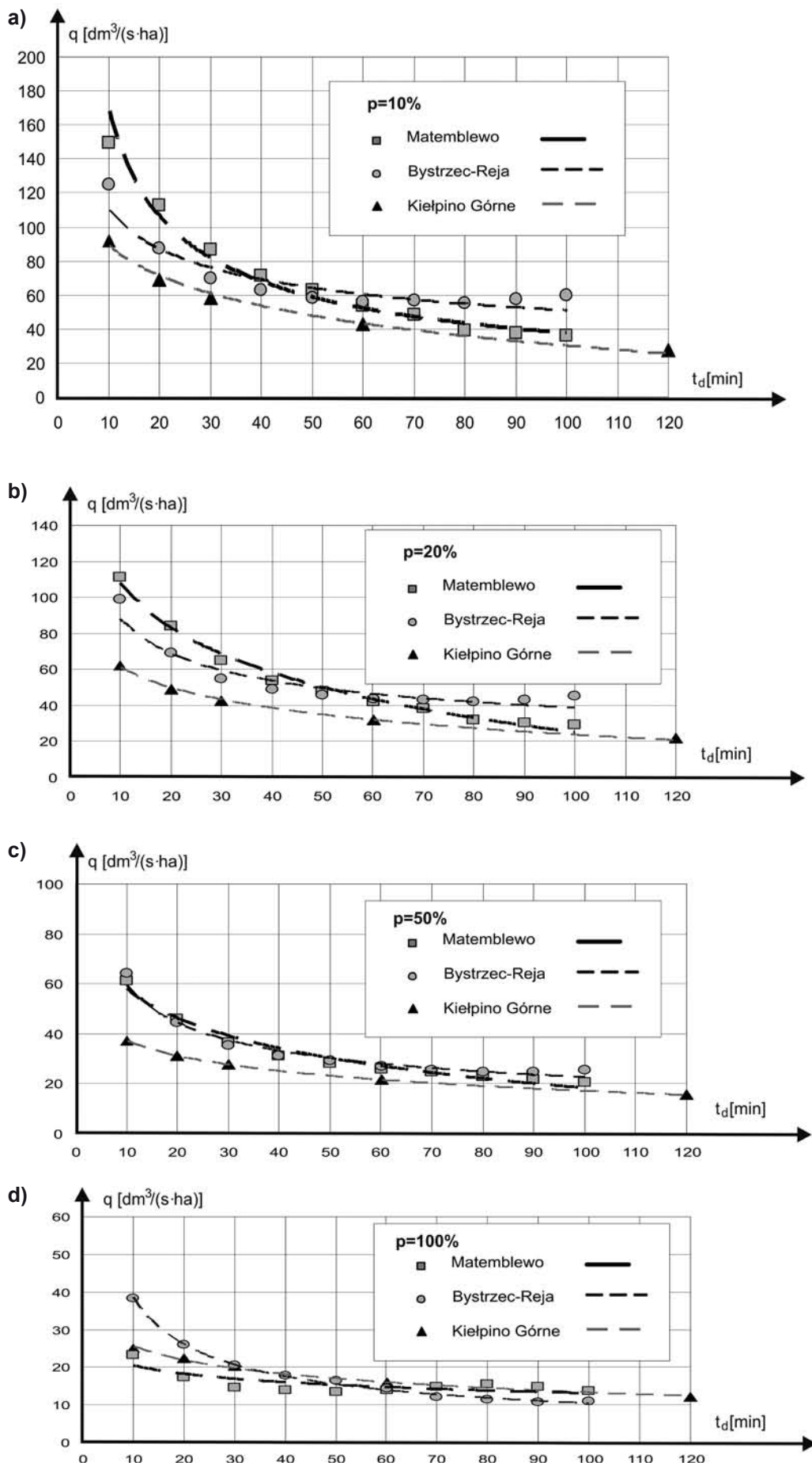
Pomimo różnej długości okresów prowadzenia pomiarów na stacjach BYSTRZEC-REJA, MATEMBLEWO i KIELPINO GÓRNE, zdecydowano się podjąć próbę dokonania charakterystyki porównawczej relacji $q(p)$ i $q(t_d)$ dla wymienionych stacji. Zgodnie z wytyczną ATV A 118, absolutnie minimalna długość okresu obserwacji opadów umożliwiającą przeprowadzenie ich

analizy statystycznej wynosi 10 lat, przy czym dla tej długości okresu pomiarowego wiarygodne są opracowania dotyczące prawdopodobieństwa nie mniejszego niż 50%. Opracowanie relacji $q(t_d)$ dla mniejszych wartości prawdopodobieństwa wystąpienia opadu wymaga znacząco dłuższych czasów obserwacji. Zastosowanie przedstawionego tu kryterium wskazywałoby, że w analizowanym przypadku za wiarygodne z inżynierskiego punktu widzenia należy uznać jedynie relacje dla $p = 50\%$ i 100% opracowane dla stacji BYSTRZEC-REJA. Pozostałe należy traktować jedynie poglądowo i zweryfikować za kilka lat, gdy dostępne będą wyniki pomiarów opadów przynajmniej z okresu dziesięciolecia dla wszystkich stacji.

Przykładowe wykresy porównawcze zależności $q(p)$ i $q(t_d)$ dla analizowanych stacji przedstawiono na rys. 8 i 9. We wszystkich przypadkach dla stacji KIELPINO GÓRNE uzyskano najniższe wartości natężenia deszczu przy tych samych długościach czasu trwania opadów i jednakowych wartościach prawdopodobieństwa wystąpienia deszczu. Porównanie relacji między stacjami MATEMBLEWO i BYSTRZEC-REJA wykazuje, że dla krótkich i bardzo intensywnych opadów w MATEMBLEWIE notowane są wyższe natężenia graniczne niż na stacji BYSTRZEC-REJA, natomiast dla dłuższych czasów trwania opadów relacja ta ulega odwróceniu. Sprawdzenie, czy są to tendencje trwałe, wymaga kontynuacji badań na kolejne lata obserwacji opadów. Na uwagę zasługuje fakt, że dla każdej z analizowanych stacji w Gdańsku (ze stacją PG włącznie), wartości natężenia opadu wynikające z relacji lokalnych są znacznie niższe niż odpowiadające im wartości q obliczone z wzorów Błaszczyka i IMGW. Wniosek ten również warto poddać weryfikacji w miarę pozyskiwania kolejnych wyników analiz opadów – dla innych stacji pomiarowych i kolejnych lat prowadzenia obserwacji.



Rys. 8. Porównanie relacji $q(p)$ dla wybranych czasów trwania opadów t_d na analizowanych stacjach: a) $t_d = 10 \text{ min}$, b) $t_d = 30 \text{ min}$, c) $t_d = 60 \text{ min}$



Rys. 9. Porównanie relacji $q(t_d)$ dla różnych prawdopodobieństw wystąpienia opadu p na analizowanych stacjach: a) $p = 10\%$, b) $p = 20\%$, c) $p = 50\%$, d) $p = 100\%$

LITERATURA

1. Bielecka K.: Zmienność przestrzenna i czasowa opadów deszczu na wybranym obszarze miasta Gdańsk. Praca magisterska. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2012.
2. Błaszczyk W.: Projektowanie sieci kanalizacyjnych. Arkady, Warszawa 1965, wyd. III.
3. Bogdanowicz E., Stachý J.: Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe. Materiały Badawcze, Seria: Hydrologia i Oceanologia, IMGW, Warszawa 1998.
4. Bogdanowicz E., Stachý J.: Maximum rainfall in Poland – a design approach. In: The Extreme of the Extremes: Extraordinary Floods. IAHS Publications no 271, IAHS Press, Wallingford, UK, 2002, 15-18.
5. Kotowski A.: Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnienia terenów. Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. z o.o., Warszawa 2011.
6. Licznar P., Łomotowski J.: Analiza średnich natężeń deszczów miarodajnych we Wrocławiu. Ochrona Środowiska, Nr 1, 2005, 29-34.
7. Licznar P., Łomotowski J.: Analiza chwilowych natężeń deszczów miarodajnych we Wrocławiu. Ochrona Środowiska, Nr 2, 2005, 25-28.
8. Owczarek M., Jakusik E., Wojtkiewicz A., Malik P.: Klimat Gdańska 1981-2005. W: 200 lat regularnych pomiarów i obserwacji meteorologicznych w Gdańsku, Mat. Konferencyjne, IMGW UG GNT, Gdańsk 2007.
9. Rzeszutek K.: Analiza czasowej zmienności opadów na podstawie 20-letnich obserwacji na stacji klimatologicznej Politechniki Gdańskiej. Praca magisterska. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2011.
10. Weinerowska-Bords K.: Wpływ uproszczeń na obliczanie splywu deszczowego w zlewni zurbanizowanej. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2010.
11. Weinerowska-Bords K.: Lokalne formuły opadowe dla Gdańska-Wrzeszcza na podstawie 20-letnich obserwacji opadów na Politechnice Gdańskiej, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2012, 662-672.
12. Wołoszyn E.: Analysis of Rainfall Data of Gdansk Meteorological Station. In: Proc. of International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. Orhid/Macedonia. 1-5 September 2009. 675-684.

PODZIĘKOWANIE: Analizę opadów zarejestrowanych na stacjach **BYSTRZEC-REJA, MATEMBLEWO i KIELPINO GÓRNE** prowadzono w ramach projektu badawczo-rozwojowego „Monitorowanie, modelowanie i analiza zagrożenia powodziowego w małej zlewni miejskiej na przykładzie zlewni potoku Strzyża w Gdańsku” (WFOŚiGW w Gdańsku, RX-03/12/2011). Autorzy wyrażają podziękowania Gdańskim Melioracjom Sp. z o.o. za udostępnienie danych dotyczących wyników pomiaru opadów, wykorzystanych w przeprowadzonych badaniach.