

Monika NOWAKOWSKA, Andrzej KOTOWSKI\*

## **BADANIA NIESTACJONARNOŚCI CZASOPRZESTRZENNEJ OPADÓW NA POTRZEBY MODELOWANIA KANALIZACJI**

Przedmiotowe badania przemieszczania się opadów konwekcyjnych, frontalnych i niżowych nad obszarem miejskim, na potrzeby modelowania działania kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej we Wrocławiu, wykonano dla wybranych opadów zarejestrowanych w okresie od 1.11.2012 do 31.10.2013 roku w sieci 6 deszczomierzy MPWiK S.A. Do opracowania wykorzystano także dane meteorologiczne i aerologiczne z dwóch stacji IMGW-PIB Wrocław - Strachowice. Stwierdzono, że występowanie i przemieszczanie się opadów nad Wrocławiem jest trudne do opisu i prognozowania, bowiem zjawisko to ma charakter losowy, zakłócany m.in. miejską wyspą ciepła. Prezentowana metoda i wyniki badań, będące kontynuacją pracy [7], znajdują zastosowanie w kalibracji i walidacji hydrodynamicznych modeli typu opad-odpływ, gdzie konieczny staje się dynamiczny rozdział opadów nad zlewnią w czasie rzeczywistym.

### 1. WPROWADZENIE

Istotnym problemem przy kalibracji i walidacji modeli hydrodynamicznych typu opad-odpływ jest zasięg opadu niestacjonarnego, uwarunkowany kierunkiem i prędkością przemieszczania się frontów opadowych nad daną zlewnią miejską [7, 9]. W przypadku dużych zlewni, przyjmowanie równomiernego rozkładu opadów prowadzi zwykle do błędnej oceny wielkości spływu powierzchniowego i strumieni ścieków w modelowanych systemach kanalizacyjnych. Stąd najczęściej konieczny staje się dynamiczny rozdział opadów nad zlewnią w czasie rzeczywistym (RTC) [12].

W efekcie kondensacji pary wodnej w atmosferze tworzą się chmury, które przemieszczają się wraz z prądami powietrza. Opady występują najczęściej w strefach frontów atmosferycznych, gdzie stykają się ze sobą masy powietrza o różnych temperaturach.

---

\* Wydział Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Katedra Wodociągów i Kanalizacji, 50-370 Wrocław, pl. Grunwaldzki 9, monika.nowakowska@pwr.edu.pl.

W zależności od rodzaju frontu: ciepły, chłodny czy okluzji, występujące opady mają różny charakter. Front ciepły oznacza, że masa ciepłego powietrza wypiera chłodną, nasuwając się nad nią wzdłuż pochylonej powierzchni frontalnej [6]. Pierwszym zwiastunem są tutaj chmury Cirrus, gęstniejące i przechodzące w Cirrostratus, a następnie w Altostratus i Nimbostratus, którym towarzyszą już opady. W przypadku frontu chłodnego bardziej aktywne jest cięższe powietrze i to ono wypiera lżejszą masę ciepłego powietrza. W strefie frontowej występują tutaj wypiętrzone chmury burzowe Cumulonimbus, którym towarzyszą często gwałtowne opady. Front okluzji występuje wówczas, gdy front chłodny i wędrujący przed nim front ciepły łączą się. Może on mieć charakter frontu ciepłego lub chłodnego. Wyróżnia się trzy typy genetyczne opadów: konwekcyjne (nawalne), frontalne oraz niżowe [10].

Efektom zmian klimatycznych i poza klimatycznych jest zjawisko wzrostu temperatury powietrza w mieście (nawet kilkustopniowe) w stosunku do terenów otaczających. Z miejską wyspą ciepła (MWC) wiąże się często powstawanie charakterystycznych komórek konwekcyjnych. Mianowicie, w centrum aglomeracji powstaje wówczas wznoszący prąd termiczny, który powoduje, że chłodniejsze i bardziej wilgotne powietrze z otoczenia miasta napływa w kierunku centrum. Lokalnie, nad MWC tworzą się chmury, którym towarzyszą często opady atmosferyczne [11].

Prezentowane badania, będące kontynuacją tematu podjętego w pracy [7], na potrzeby modelowania działania kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej we Wrocławiu, wykonano dla wyselekcjonowanych 6 zjawisk opadowych zarejestrowanych w sieci 6 deszczomierzy MPWiK S.A. Do opracowania wykorzystano także dane meteorologiczne i aerologiczne z dwóch stacji IMGW-PIB Wrocław – na Strachowicach.

## 2. METODA I MATERIAŁ BADAŃ

W celu rozpoznania lokalnego zjawiska przemieszczania się komórek opadowych nad obszarem miasta Wrocławia, zebrano i przeanalizowano dostępne dane meteorologiczne, w tym dotyczące wysokości i intensywności opadów deszczowych, temperatury powietrza, wysokości podstawy chmur oraz kierunków i prędkości wiatrów [8]. Odnosnie opadów, materiałem badawczym były wybrane pluwiogramy z okresu 1.11.2012 do 31.10.2013 r., zarejestrowane w sieci 6 deszczomierzy MPWiK S.A. [1]. Pozostałe dane pozyskano ze stacji meteorologicznej IMGW-PIB Wrocław, mieszczącej się na terenie Portu Lotniczego przy ul. Skarżyńskiego, oraz ze stacji aerologicznej mieszczącej się przy ul. Granicznej we Wrocławiu. Sondaże aerologiczne wykonywane są dwa razy na dobę, tj. o północy i w południe. W ten sposób otrzymuje się pionowy profil wiatru, temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza do wysokości około 30 km.

Charakterystykę hydrologiczną opadów badanego okresu zinterpretowano na podstawie porównania z danymi ze stacji IMGW Wrocław-Strachowice z wielolecia

1960-2009. Średnioroczna wysokość opadów w wieloleciu wyniosła 568 mm (min 380,8 mm, max 776,2 mm), a liczba dni z opadem ( $\geq 0,1$  mm) mieściła się w zakresie 118–190 [5]. W badanym okresie (1.11.2012–31.10.2013 r.) wystąpiło 184 dni z opadem, a roczna wysokość opadów wyniosła 668,1 mm, co jest wartością o 17,6% wyższą od średniej z okresu 1960–2009. Badany rok można zatem określić mianem roku mokrego, a przyjęty okres badawczy można uznać za odpowiedni do przeprowadzenia przedmiotowej analizy.

Do przeprowadzenia przedmiotowej analizy wybrano deszcze z dostępnego rocznego okresu, tj.: od 1.11.2012 do 31.10.2013 r., które spełniały określone kryteria. Głównym kryterium było wystąpienie opadu nad całą zlewnią miasta Wrocławia, co musiało mieć odzworowanie w postaci ciągłego zapisu, w każdym z 6 deszczomierzy. Kolejnym kryterium była możliwie duża różnorodność typów genetycznych opadów. Brano pod uwagę zarówno deszcze konwekcyjne – o czasie trwania do 2 godzin, deszcze frontalne – do kilku godzin, jak i opady niżowe, trwające kilka dni, których hietogramy miały możliwie zwartą i ciągłą postać. Wymienione kryteria spełniło 6 zjawisk opadowych, mianowicie:

- z dnia 1.11.2012 r. – jako słaby, krótkotrwały opad frontalny (pochodzący z frontu chłodnego),
- z dni 2–4.05.2013 r. – jako słaby, długotrwały opad niżowy (z frontu chłodnego),
- z dni 24–25.06.2013 r. – jako intensywny, długotrwały opad frontalny (z ciepłego frontu okluzyjnego),
- z dnia 29.07.2013 r. – jako bardzo intensywny opad konwekcyjny (z frontu chłodnego),
- z dnia 9.08.2013 r. – jako średnio intensywny, krótkotrwały opad frontalny (z ciepłego frontu okluzyjnego),
- z dni 10–11.09.2013 r. – jako średnio intensywny, krótkotrwały opad frontalny (z frontu chłodnego).

Wybranim opadom przypisano następnie częstość ich wystąpienia we Wrocławiu. Jako kryterium do określenia częstości występowania opadów – o zarejestrowanej wysokości ( $h$ ) w czasie trwania ( $t$ ), przyjęto probabilistyczny model maksymalnych wysokości ( $h_{max}$  w mm) we Wrocławiu dla zakresu  $t \in [5; 4320]$  minut i prawdopodobieństwa przewyższenia  $p = 1/C \in [1; 0,01]$ , postaci [3, 4]:

$$h_{max}(t, p) = -4,58 + 7,41t^{0,242} + (97,11t^{0,0222} - 98,68)(-\ln p)^{0,809} \quad (1)$$

Stąd w odniesieniu do częstości występowania opadów ( $C$  w latach):

$$h_{max}(t, C) = -4,58 + 7,41t^{0,242} + (97,11t^{0,0222} - 98,68)(-\ln \frac{1}{C})^{0,809} \quad (2)$$

Dla opadów występujących częściej niż raz w roku, jako kryterium przyjęto fizyczny model wysokości maksymalnych ( $h_{max}$  w mm) we Wrocławiu, opracowany dla  $t \in [5; 360]$  minut i częstość występowania  $C \in [0,1; 1]$  lat, postaci [2]:

$$h_{max}(t, C) = -4,58 + 7,41t^{0,242} + 1,47t^{0,330} \ln C \quad (3)$$

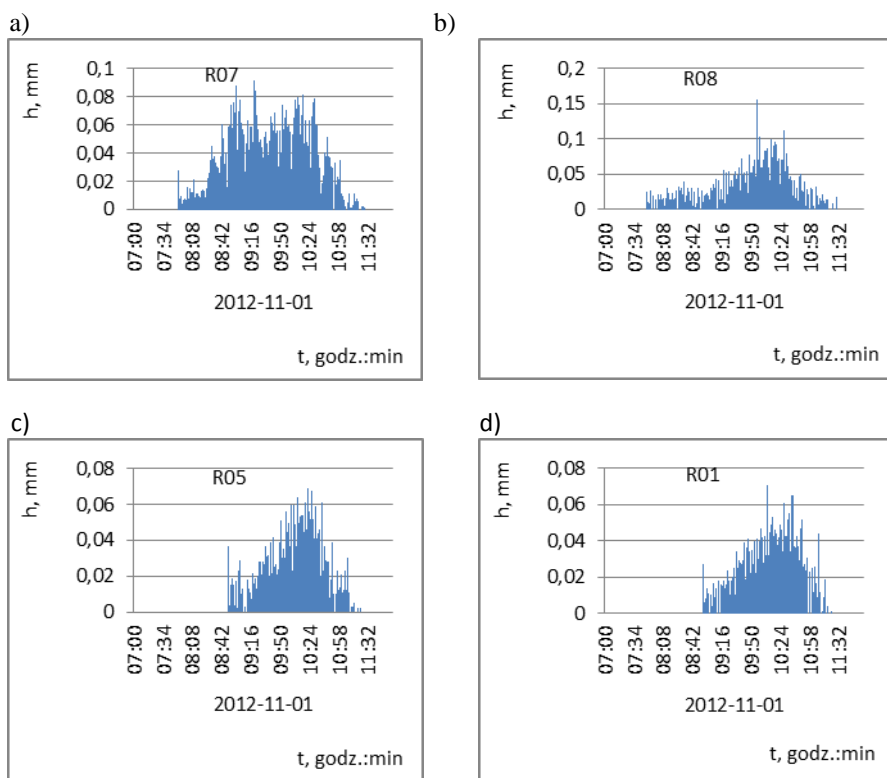
Tabela 1. Kryterialne wysokości opadów we Wrocławiu obliczone z modeli (2) i (3)

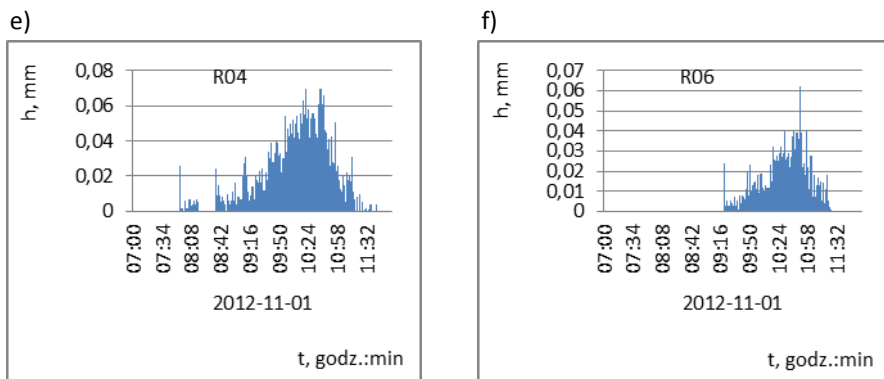
C, lata	t, min	$h_{max}$ (2), mm	C, lata	t, min	$h_{max}$ (2), mm	C, lata	t, min	$h_{max}$ (3), mm
50	5	12,28	5	5	9,24	0,5	5	4,63
	15	23,10		15	16,23		10	6,18
	30	30,52		30	21,18		15	7,20
	60	38,50		60	26,65		30	9,17
	120	47,12		120	32,72		45	10,46
	180	52,50		180	36,59		60	11,44
	360	62,35		360	43,83		90	12,94
	720	73,14		720	51,97		120	14,08
	1440	85,05		1440	61,18		180	15,80
	2880	98,25		2880	71,65		360	19,10
4320	106,66	4320	78,44	5	3,61			
25	5	11,41	2	5	7,82	0,33	10	4,90
	15	21,14		15	13,00		15	5,74
	30	27,86		30	16,79		30	7,33
	60	35,13		60	21,08		45	8,36
	120	43,02		120	25,95		60	9,14
	180	47,97		180	29,11		90	10,31
	360	57,07		360	35,12		120	11,18
	720	67,12		720	42,02		180	12,50
	1440	78,25		1440	49,97		360	14,95
	2880	90,67		2880	59,15		5	2,33
4320	98,62	4320	65,18	10	3,30			
10	5	10,21	1	5	6,36	0,2	15	3,91
	15	18,42		15	9,69		30	5,03
	30	24,17		30	12,30		45	5,73
	60	30,44		60	15,38		60	6,24
	120	37,32		120	19,02		90	6,99
	180	41,67		180	21,46		120	7,54
	360	49,75		360	26,21		180	8,33
	720	58,74		720	31,84		360	9,71
	1440	68,81		1440	38,49		5	0,60
	2880	80,15		2880	46,35		10	1,12
4320	87,46	4320	51,60	15	1,42			

W tabeli 1 przedstawiono kryterialne wysokości opadów maksymalnych we Wrocławiu, obliczone z modelu probabilistycznego (2) – dla  $C \in [1; 50]$  lat i  $t \in [5; 4320]$  min, oraz z modelu fizykalnego (3) - dla  $C \in [0,1; 1]$  lat i  $t \in [5; 360]$  min.

### 3. OPIS I ANALIZA WYBRANYCH ZJAWISK OPADOWYCH

W pracy zilustrowano dla przykładu metodykę analizy dwóch charakterystycznych zjawisk opadowych, mianowicie: z dnia 1.11.2012 r. – jako słabego i krótkotrwałego opadu frontalnego oraz z dni 24–25 czerwca 2013 r. – jako intensywnego i długotrwałego opadu frontalnego. Na rysunku 1(a–f) przedstawiono hietogramy opadów w dniu 1.11.2012 r., zarejestrowane na poszczególnych stacjach pomiarowych (w kolejności przemieszczania się środka ciężkości hietogramów).





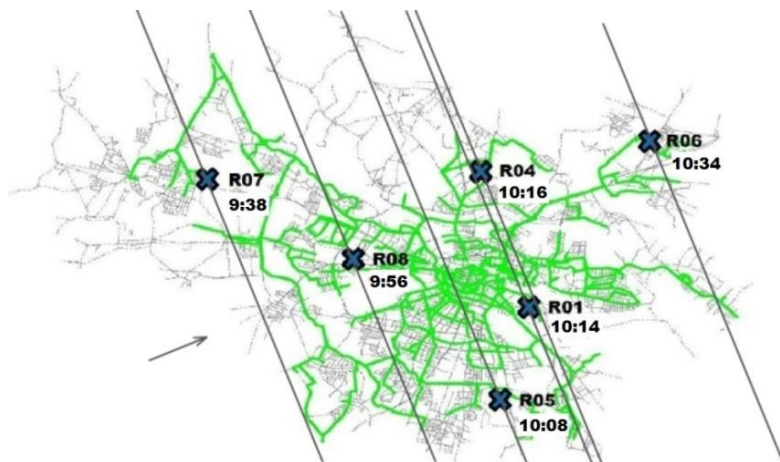
Rys. 1 (a–f). Hietogramy opadów z deszczomierzy typu TRwS 200/203 firmy MPS ( $I$  w mm/min) w dniu 1.11.2012 r.

Charakterystykę zjawiska opadowego z dnia 1.11.2012 r. przedstawiono w tabeli 2. Zawiera ona takie parametry opadów jak: czas wystąpienia początku i końca, całkowity czas trwania ( $t$ ), sumę wysokości ( $H$ ), średnią intensywność ( $I_{sr}$ ), a także przypisaną częstość występowania ( $C$ ) we Wrocławiu oraz czas przejścia środka ciężkości hietogramu opadu.

Tabela 2. Parametry opadów deszczu w dniu 1.11.2012 r.

Numer deszczomierza (w kolejności czasu przejścia środka ciężkości hietogramu)	Rejestracja opadu (godz., min)		Parametry opadu				Czas przejścia środka ciężkości hietogramu
			Czas trwania $t$	Suma wysokości $H$	Średnia intensywność $I_{sr}$	Częstość występowania $C$	
	od	do	min	mm	mm/min	lata	godz:min
R07	7:52	11:28	217	7,71	0,036	0,18	9:38
R08	7:48	11:29	222	6,86	0,031	0,16	9:56
R05	8:49	11:23	155	3,84	0,025	0,12	10:08
R01	8:54	11:22	149	3,61	0,024	0,11	10:14
R04	7:54	11:43	230	4,52	0,020	0,12	10:16
R06	9:20	11:25	126	2,04	0,016	0,09	10:34

Odnotowanym opadom, na podstawie modelu (3), przypisano statystyczną częstość ich występowania:  $C = 0,2-0,1$  (od 5 do 10 razy w roku). Dla każdego hietogramu opadu wyznaczano środek ciężkości bryły wykresu rejestracji opadu, interpretowany jako czas przejścia kulminacji opadu (tab. 2) – według metodyki podanej w pracy [7]. Na tej podstawie wykreślono orientacyjne linie strefowe i wyznaczono prostopadły, uśredniony kierunek przemieszczania się frontu opadu (rys. 2). Wartość kąta kierunkowego wektora przemieszczania się frontu opadu wynosi ok.  $258^\circ$  – z WSW.



Rys. 2. Czasy przejścia i uśredniony kierunek przemieszczania się opadu w dniu 1.11.2012 r.

W analizie uwzględniano m.in. kierunki i prędkości wiatru dolnego – przyziemnego i górnego – na wysokości wystąpienia podstawy chmur, przedstawione w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Parametry meteorologiczne w dniu 1.11.2012 r.

Godz.	Temp. powietrza	Wiatr dolny				Wysokość podstawy chmur
		– kierunek		– prędkość		
	°C	symbol	stopnie	km/h	m/s	km
7:00	5,0	ESE	105°–114°	25,2	7,0	2,5
8:00	5,2	ESE	115°–124°	21,6	6,0	0,6
9:00	4,7	ESE	115°–124°	21,6	6,0	1,0
10:00	4,5	ESE	115°–124°	18,0	5,0	1,0
11:00	5,3	ESE	105°–114°	25,2	7,0	0,3
12:00	6,9	SE	125°–134°	21,6	6,0	1,0

Opad najwcześniej został zarejestrowany o godz. 7:48 (R08) i trwał do godz. 11:43 (R04), dlatego w analizie wzięto pod uwagę wiatry od godz. 8:00 do 12:00. Średnia prędkość wiatru dolnego, w czasie trwania opadu, wynosiła około 6,0 m/s – z kierunku ESE (tab. 3). Zarejestrowana wysokość, na której wystąpiła podstawa chmur w czasie trwania opadu zmieniała się w zakresie od około 300 m do około 1,0 km nad poziomem terenu. Informacja ta pozwoliła na przeanalizowanie wiatrów górnych, które przypuszczalnie nadawały kierunek przemieszczania się chmur. Ponieważ sondáže aerologiczne wykonywane są dwa razy na dobę, do analizy wykorzystano dane z godziny 12:00, które przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Sondaż aerologiczny wiatrów górnych w dniu 1.11.2012 r. z godz. 12:00

Ciśnienie	Wysokość	Temp. powietrza	Wiatr górny			
			– kierunek		– prędkość	
hPa	m n.p.m	°C	symbol	stopnie	m/s	km/h
980	122	5,6	ESE	105	3,1	11,1
962	274	4,6	SE	125	12,9	46,3
959	299	4,4	SE	127	13,4	48,2
934	516	6,8	SE	144	15,9	57,4
925	596	6,6	SSE	150	17,0	61,1
920	640	6,4	SSE	150	17,0	61,1
850	1286	3,4	S	175	22,1	79,6
832	1460	2,8	S	177	24,7	88,9
819	1588	3,2	S	179	26,8	96,3
812	1658	3,5	S	180	27,8	100,0
794	1840	4,4	S	186	26,8	96,3
750	2300	1,6	SSW	200	23,1	83,3

Zarejestrowane kierunki dla wiatru dolnego (w zakresie 105–124°) i górnego (127–175°) są zbliżone i stanowią uogólniony kierunek SE, co przedstawiono na rysunku 3. Jednak informacje o kierunkach wiatru górnego nie są w pełni miarodajne, gdyż sondaż odbył się już po ustaniu opadów.



Rys. 3. Opis zjawiska opadowego w dniu 1.11.2012 r.

Następnie przeprowadzono porównanie kierunków wiatrów (dolnych i górnych) względem kierunku przemieszczania się opadów, wyznaczonych na podstawie środków ciężkości hietogramów. Z rysunków 2 i 3 wynika, że kierunek przemieszczania



się frontu opadowego mieszczący się w zakresie 248–267° (średnio 258°), tj. z kierunku WSW, nie jest zgodny z kierunkiem wiatrów dolnego i górnego (ogólnie z SE). Próba określenia kierunku przemieszczania się opadu na podstawie rejestracji początków opadu nie jest jednoznaczna – ogólnie z kierunku zbliżonego do WNW. Tak więc, kierunki przemieszczania się opadu w dniu 1.11.2012 r. nie miały całkowicie związku z kierunkami wiatrów górnych czy też dolnych.

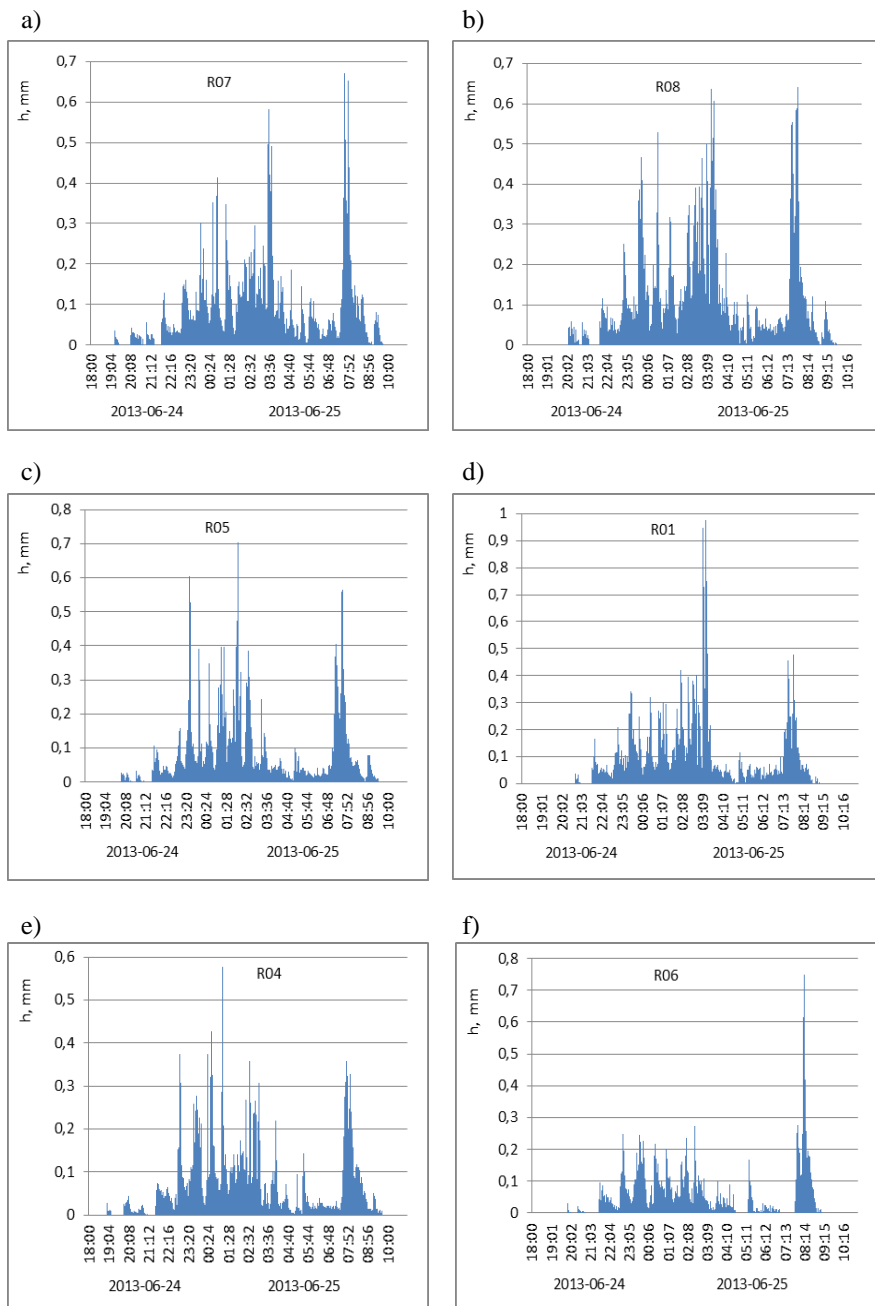
Na podstawie informacji o temperaturze powietrza i podstawie chmur (tab. 3 i 4) wysunięto wniosek, że przedmiotowy opad pochodził z chmur typu Cumulonimbus. Zarejestrowane temperatury powietrza i prędkości wiatru na różnych wysokościach sugerują nasuwanie się powietrza chłodnego na cieplejsze masy, co jest charakterystyczne dla przechodzenia frontu chłodnego.

Kryterialnym na potrzeby modelowania działania kanalizacji we Wrocławiu okazał się intensywny i długotrwały opad frontalny, zarejestrowany w dniach 24–25 czerwca 2013 r. ( $C = 2\text{--}64$  lat), o hietogramach podanych na rysunku 4 i parametrach zamieszczonych w tabeli 5.

Tabela 5. Parametry opadów deszczu w dniach 24-25.06.2013 r.

Numer deszczomierza	Rejestracja opadu (godz., min)		Parametry opadu				Czas przejścia środka ciężkości hietogramu
			Czas trwania $t$	Suma wysokości $H$	Średnia intensywność $I_{sr}$	Częstość występowania $C$	
	od	do	min	mm	mm/min	lata	godz:min
R07	20:07	9:43	817	65,00	0,080	16,2	3:14
R08	20:05	9:43	819	77,43	0,095	64,1	2:59
R05	21:32	9:30	719	60,10	0,084	11,6	2:10
R01	21:34	9:02	689	66,41	0,096	24,9	2:42
R04	19:51	9:41	831	53,53	0,064	4,9	2:08
R06	21:28	9:07	700	41,08	0,059	1,9	2:02

Zjawisko opadowe (tab. 5) rozpoczęło się najwcześniej o godzinie 19:51 – w rejonie deszczomierza R04, a najpóźniej o 21:34 – w rejonie R01 (ok. 1,7 godz. rozpiętości czasowej). Podczas trwania deszczu, przez około 11,5–14 godzin, zarejestrowano opad w zakresie wysokości od 41,1 do 77,4 mm i intensywności od 0,059 do 0,096 mm/min. Opad ten, spośród przyjętych do analizy 6 zjawisk, charakteryzował się najwyższymi wartościami częstości występowania: od około raz na 2 lata (R06) do nawet raz na 64 lat (R08).



Rys. 4 (a–f). Hietogramy opadów z deszczomierzy typu TRwS 200/203 firmy MPS ( $I$  w mm/min) w dniach 24–25.06.2013 r.

Dla opadu w dniach 24–25.06.2013 r. przeanalizowano kierunki i prędkości wiatrów dolnego i górnego – uwzględniającego wysokość, na jakiej wystąpiła podstawa chmur. Średnia prędkość wiatru dolnego, w czasie trwania opadu, wynosiła około 5 m/s z kierunku północny zachód – średnio 315° NW. Zarejestrowana wysokość podstawy chmur w czasie trwania opadu zmieniała się w przedziale od około 0,1 do około 1,0 km nad poziomem terenu (tab. 6).

Tabela 6. Parametry meteorologiczne – wiatry dolne w dniach 24–25.06.2013 r.

Data	Godz.	Temp. powietrza $T$	Kierunek wiatru		Prędkość wiatru		Wysokość podstawy chmur
		°C	symbol	stopnie	km/h	m/s	km
24.06.2013	19:00	14,8	WNW	295°–304°	14,4	4	0,3
	20:00	14,6	WNW	295°–304°	18,0	5	0,3
	21:00	13,8	WNW	285°–294°	18,0	5	1,0
	22:00	13,5	WNW	295°–304°	18,0	5	0,3
	23:00	13,5	WNW	295°–304°	14,4	4	0,2
25.06.2013	0:00	13,8	NW	305°–314°	21,6	6	0,2
	1:00	13,8	NW	305°–314°	21,6	6	0,1
	2:00	14,1	NW	315°–324°	21,6	6	0,1
	3:00	13,7	NNW	335°–344°	18,0	5	0,1
	4:00	13,3	NNW	325°–334°	21,6	6	0,1
	5:00	13,0	NW	315°–324°	21,6	6	0,1
	6:00	13,0	NW	315°–324°	21,6	6	0,1
	7:00	13,2	NW	305°–314°	14,4	4	0,1
	8:00	12,9	WNW	295°–304°	21,6	6	0,1
	9:00	13,5	WNW	295°–304°	18,0	5	0,1
10:00	13,9	WNW	295°–304°	21,6	6	0,1	

Tabela 7. Sondaż aerologiczny wiatrów górnych w dniu 25.06.2013 r. z godz. 0:00

Ciśnienie	Wysokość	Temp. powietrza $T$	Wiatr				
			- kierunek		- prędkość		
hPa	m n.p.m.	°C	symbol	stopnie	knot	m/s	km/h
994,0	156	13,1	NW	310	23	11,8	42,6
928,0	736	10,7	N	0	37	19,0	68,5
925,0	763	10,6	N	0	37	19,0	68,5
910,0	899	9,8	N	8	35	18,0	64,8
890,0	1084	9,5	NNE	20	33	17,0	61,1
872,0	1254	9,3	N	10	31	15,9	57,4

W związku z faktem, że sondáže aerologiczne wykonywane są dwa razy na dobę, do analizy wykorzystano dane z godziny 00:00 w dniu 25.06.2013 r. (tab. 7). Średnia prędkość wiatru górnego wynosiła około 15 m/s z kierunku w zakresie  $310-20^\circ$ , a jego uśredniona wartość to około  $345^\circ$  NNW. Tak więc, zarejestrowane kierunki wiatrów są zbliżone - częściowo się nakładają i stanowią uogólniony kierunek NNW (rys. 5).



Rys. 5. Opis zjawiska opadowego w dniach 24–25.06.2013 r.

Trudny do wyprowadzenia był kierunek wektora przemieszczania się opadu według wyznaczonego środka ciężkości hietogramów, gdyż zakłócony był czasem jego wystąpienia dla deszczomierza R05 (efekt MWC). Ustalono jednak, że wartość tego wektora (z pominięciem R05) mieści się w zakresie od  $60^\circ$  do  $85^\circ$ . Na podstawie ustalonych czasów przejścia środka ciężkości hietogramów wyznaczono uśredniony kierunek przemieszczania się deszczu na około  $73^\circ$ , tj. na ENE (tab. 5, rys. 5). Próba ustalenia kierunku przemieszczania się opadu na podstawie godziny jego rozpoczęcia była również trudna do ustalenia. Możliwa jedynie po wyeliminowaniu wskazania czasu dla deszczomierza R06 (zakłócenie lokalne początku wystąpienia opadu - MWC). Wyznaczony kierunek to ok.  $330^\circ$  NNW, który pokrywa się z kierunkiem wiatru górnego, a także dolnego. Analiza temperatury powietrza pozwoliła na stwierdzenie, że przy powierzchni terenu nie ulegała ona większej zmianie (tab. 5 i 6). Była to chłodna masa powietrza, na którą napływały jednocześnie masy powietrza ciepłego i chłodnego, tworząc warunki odpowiadające frontowi okluzji o charakterze frontu ciepłego. Temu frontowi towarzyszą chmury typu Nimbostartus, dające długotrwałe opady frontalne.

Biorąc pod uwagę całościowe wyniki analiz 6 wybranych opadów, stwierdzono [11], że czasy przejścia frontów opadów nad zlewnią miejską Wrocławia, rejestrowa-

ne wg początków wystąpienia czy też środków ciężkości hietogramów (tj. kulminacji intensywności), były bardzo różne: od nagłego wystąpienia nad całym obszarem miasta – w przeciągu kilku czy kilkunastu minut do długotrwałego przebiegu – nawet do około 4 godzin (tab. 8).

Tabela 8. Zestawienie i opis parametrów badanych zjawisk opadowych

Data opadu	Parametry badanych opadów				Kierunek przemieszczenia się opadów		Kierunek wiatrów	
	Czas trwania $t$	Wy- kość $H$	Średnia intensyw. $I_{sr}$	Częstość występ. $C$	Według początku /czas przejścia	Według środków ciężk./czas przejścia	Górných	Dolnych
	h	mm	mm/min	lata				
1.11.2012	2,1 -3,8	2,0 -7,7	0,016 -0,036	0,1-0,2	WNW /92 min	WSW /56 min	SSE	ESE
2-4.05.2013	47,3 -47,9	41,4 -52,3	0,015 -0,018	0,8-1,3	SSW /14 min	NE /240 min	NE	NNE
24-25.06.2013	11,5 -13,9	41,1 -77,4	0,059 -0,096	1,9-64	NNW /90 min	ENE /72 min	NNW	NW
29.07.2013	1,6 -1,8	15,4 -17,5	0,14 -0,19	0,6-1,0	WSW /9 min	WSW /10 min	W	NNE, W, ESE
9.08.2013	3,4 -3,8	8,4 -12,3	0,040 -0,060	0,2-0,4	SSE /30 min	SW /13 min	NNW	WNW
10-11.09.2013	4,4 -5,1	10,1 -17,3	0,038 -0,058	0,2-0,5	NW /27 min	SSW-SW /20 min	NNE	NW

W pracy wykazano, że dla opadów stosunkowo krótkotrwałych (do 4 godzin), wyznaczone na podstawie czasów początku wystąpienia opadu oraz środków ciężkości hietogramów, kierunki przemieszczania się opadów nad całą zlewnią w dużej mierze się pokrywały. Wynika to z faktu, że wartości te występują w niewielkiej rozpiętości czasowej. W pozostałych przypadkach – dla dłuższych trwających opadów, ustalone na podstawie początków wystąpienia i środków ciężkości hietogramów, kierunki przemieszczania się opadów nad zlewnią, wykazywały już duże zróżnicowanie, a nawet przeciwstawności.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Do przeprowadzenia przedmiotowej analizy wybrano 6 deszczy z dostępnego rocznego okresu rejestracji, tj.: od 1.11.2012 do 31.10.2013 r., które spełniały przyjęte w pracy kryteria. Podstawowym kryterium było wystąpienie opadu nad całą zlewnią miasta Wrocławia. Brano pod uwagę zarówno deszcze nawalne - o krótkim czasie trwania, jak też opady trwające kilka dób, których hietogramy miały zwartą i ciągłą postać. Wybrany opadom przypisywano częstość ich występowania (od  $C = 0,1$  rok do  $C = 64$  lat) na podstawie modeli opracowanych dla Wrocławia z wielolecia 1960-

2009. Przyjęty okres badawczy, o ponad przeciętnej rocznej wysokości opadów (668,1 mm) i liczbie dni z opadem (184), uznano za miarodajny do przeprowadzenia przedmiotowej analizy.

Analizowane czasy przejścia badanych opadów nad zlewnią miejską Wrocławia, wg początków wystąpienia deszczów oraz wg środków ciężkości hietogramów, były bardzo zróżnicowane – od nagłego wystąpienia deszczu nad całym miastem (w przeciągu kilku minut) do długotrwałego przejścia (do kilku godzin). Tak wyznaczone kierunki nie miały na ogół ścisłego odniesienia do kierunków wiatrów górnych czy też dolnych, występujących w czasie trwania analizowanych deszczy. Jednak to wiatry górne – występujące na wysokości zalegania podstawy chmur opadowych, powodują ich przemieszczanie się, ale niekoniecznie z równoczesnym wystąpieniem opadów deszczu nad zlewnią. Przemieszczanie się opadów jest więc trudne do opisu i prognozowania, bowiem podobnie jak i same opady, zjawisko to ma charakter losowy - zakłócany m.in. miejską wyspą ciepła (MWC). Prezentowana metodyka i wyniki badań znajdują zastosowanie zwłaszcza do kalibracji i walidacji hydrodynamicznych modeli typu opad–odpływ.

*Praca współfinansowana w ramach badań statutowych S40-029.*

#### LITERATURA

- [1] CNTiR: *Sieć deszczomierzy* MPWiK S. A., Wrocław 2012.
- [2] KAŻMIERCZAK B., KOTOWSKI A.: *Depth-duration-frequency rainfall model for dimensioning and modelling of Wrocław drainage systems*. Environment Protection Eng. 2012, vol. 38, no. 4, s. 127–138.
- [3] KOTOWSKI A.: *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów*. Tom I i II. Wyd. Seidel-Przywecki, (wydanie II rozszerzone), Warszawa 2015.
- [4] KOTOWSKI A., KAŻMIERCZAK B.: *Probabilistic models of maximum precipitation for designing sewerage*. Journal of Hydrometeorology 2013, Iss. 6, Vol. 14, pp. 1958–1965.
- [5] KOTOWSKI A., KAŻMIERCZAK B., DANCEWICZ A.: *Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji*. Wyd. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Studia z Zakresu Inżynierii nr 68, Warszawa 2010.
- [6] KOŻUCHOWSKI K. (red.): *Meteorologia i klimatologia*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2007.
- [7] NOWAKOWSKA M., KAŻMIERCZAK B., KOTOWSKI A.: *Metodyka analizy przestrzennej zmienności opadów na przykładzie Wrocławia*. Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska, EKO-DOK (red. T. M. Traczewska). Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej 2013, Tom 3, s. 465–472.
- [8] NOWAKOWSKA M., KOTOWSKI A.: *Analiza przemieszczania się opadów deszczowych nad obszarem Wrocławia*. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska PWr. Raport serii SPR nr 8/2014.
- [9] NOWAKOWSKA M., KOTOWSKI A., KAŻMIERCZAK B.: *Problemy badawcze w modelowaniu hydrodynamicznym odwodnień terenów*. Forum Eksploatatora 2012, nr 4, s. 72–79.
- [10] SULIGOWSKI R.: *Struktura czasowa i przestrzenna opadów atmosferycznych w Polsce. Próba regionalizacji*. Prace Instytutu Geografii Akademii Świętokrzyskiej nr 12, Kielce 2004.

- [11] SZYMANOWSKI M.: *Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu*. Studia Geograficzne nr 77, Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław 2004.
- [12] ZAWILSKI M.: *Analiza obciążenia hydraulicznego systemu kanalizacyjnego w skali dużej zlewni miejskiej*. Infrastruktura komunalna i gospodarka wodna, INFRAEKO. Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej 2012, s. 311–320.

#### STUDY OF SPATIOTEMPORAL NONSTATIONARITY OF RAINFALL FOR SEWER SYSTEM MODELING

These studies of movements of the convective, frontal and low pressure rainfall over the area of the city, for the modeling purpose of activities the rainwater and combined sewer system the Wrocław city, were performed for selected rainfall and recorded in the period of time from 1.11.2012 to 31.10.2013, in the network of six rain gauges, which are belongs to the MPWiK S.A. For the study, were used meteorological and aerological data from two stations IMGW-PIB Wrocław - Copernicus. It was found that the occurrence and movement of precipitation over Wrocław is difficult to describe and forecast, because of this phenomenon is random in nature, and is disturbed by urban heat island. The presented methodology and results of the research, which are a continuation of the previous work [7], are used in the calibration and validation of the hydrodynamic models of rainfall-runoff type, where necessary becomes dynamic distribution of precipitation over the basin in the real time (RTC).