



Ocena przydatności disdrometru laserowego i radaru meteorologicznego do szacowania wielkości opadów deszczu

Assessment of the suitability of the laser disdrometer and meteorological radar for rainfall estimation

Mariusz Paweł Barszcz 

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Instytut Inżynierii Środowiska
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
mariusz_barszcz@sggw.edu.pl

Zarys treści. Pomiar opadów, prowadzone na stacji meteorologicznej SGGW w Warszawie w latach 2012-2014 oraz 2019-2020 z wykorzystaniem deszczomierza korytkowego i disdrometru laserowego, oraz pomiary dokonane za pomocą radaru meteorologicznego w Legionowie pozwoliły na zgromadzenie danych umożliwiających ocenę przydatności disdrometru i radaru do szacowania opadów deszczu. Dane dla całego okresu badawczego posłużyły do analizy związku korelacyjnego między wysokościami opadu 24-godzinne oszacowanymi na podstawie deszczomierza i disdrometru. Ze zbioru danych wybrano do dalszej analizy 21 pojedynczych zdarzeń, dla których dysponowano również danymi opadowymi oszacowanymi na podstawie radaru. Dane opadowe z disdrometru i radaru (obserwowane w rozdzielczości 1 min i 10 min) posłużyły do analizy związków korelacyjnych między nimi i adekwatnymi pomiarami z deszczomierza. Zakres pracy obejmował również porównanie wartości sum opadu oszacowanych dla pojedynczych zdarzeń z wykorzystaniem disdrometru i radaru z danymi z deszczomierza. Ostatni etap analiz obejmował korektę wysokości opadu oszacowanych na podstawie disdrometru przy zastosowaniu prostej metody, którą przedstawiono w pracy.

Słowa kluczowe: deszczomierz korytkowy, disdrometr laserowy, radar meteorologiczny, hydrologia, intensywność i suma opadu, korelacja danych opadowych.

Keywords: *tipping-bucket rain gauge, laser disdrometer, meteorological radar, hydrology, rainfall intensity and totals, correlation of rainfall data.*

Wstęp

Monitorowanie i prognozowanie zjawisk opadowych ma zasadnicze znaczenie dla rozwoju metod modelowania matematycznego w hydrologii i warunkuje możliwość ich stosowania w praktyce inżynierskiej (Rafieeinassab et al., 2015; Niemi et al., 2017). Ponadto, aby lepiej zrozumieć procesy hydrologiczne w różnych skalach przestrzennych, konieczne staje się zastosowanie bardziej zintegrowanych i zaawansowanych technik wykrywania i szacowania opadów niż wykorzystywanie tylko danych z konwencjonalnej sieci deszczomierzy (Somorowska, 2012).

Dobrej jakości dane opadowe o dużej rozdzielczości przestrzennej i/lub czasowej są szczególnie wymagane przy zastosowaniu modelowania hydrodynamicznego do zarządzania wodami opadowymi na obszarach miejskich (Thorndahl et al., 2017; Barszcz,

2019). Berne et al. (2004) wykazali w swojej pracy, że do prawidłowego zasilania modeli hydrodynamicznych w zlewniach miejskich niezbędne są dane opadowe o rozdzielczości czasowej 3-5 min i rozdzielczości przestrzennej 2-3 km. Licznar et al. (2005) zwracają uwagę na problemy związane z pozyskiwaniem danych opadowych do realizacji zadań w zakresie projektowania i eksploatacji miejskich systemów odwodnienia, szczególnie w odniesieniu do powszechnie wdrażanego zagranicą systemu sterowania odpływem w czasie rzeczywistym RTC (Real Time Control). Alternatywą dla stosowania w systemach RTC i w modelowaniu hydrodynamicznym sieci deszczomierzy jest wykorzystanie danych o opadach z radarów meteorologicznych, które zapewniają dane o dużej rozdzielczości przestrzennej i ciągłe w czasie (Atencia et al., 2011). Rozdzielczość czasowa dostępnych danych radarowych w Polsce, pochodzących z systemu POLRAD, wynosi 10 min.

Jedną z najważniejszych zalet radarowego pomiaru opadów jest ciągłość przestrzenna obserwacji. Podstawową wadą jest niedokładność uzyskiwanych danych opadowych, która wynika z faktu, że jest to pomiar pośredni (Krajewski et al., 2010; Delrieu et al., 2014). Klasyczny radar mierzy odbiciowość radarową Z , która na podstawie określonej zależności jest przeliczana na intensywność opadu R lub sumę opadu (Moszkowicz i Tuszyńska, 2006). Kalibracja zależności Z - R ma duży wpływ na ostateczne wartości opadów. Jakość danych opadowych pochodzących z radaru bez korekty wysokości opadów jest niewystarczająca dla hydrologii operacyjnej (Löwe et al., 2014). Analizę zależności między odbiciowością radarową a intensywnością opadów rejestrowanych przez deszczomierze przeprowadzili dla warunków krajowych m.in. Jakubiak et al. (2014) i Barszcz (2018, 2019). Autorzy ci wykazali, że zależności między tymi wielkościami mają jedynie statystyczny charakter – parametry funkcji opisującej zależność pomiędzy odbiciowością a intensywnością wyznacza się metodami statystycznymi na podstawie danych pomiarowych dla możliwie długich okresów. Wyniki badań dotyczących kalibracji danych radarowych i metodyki ich szacowania na potrzeby zastosowań operacyjnych w IMGW-PIB (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy) można znaleźć w kilku publikacjach opracowanych w Polsce (Ośróodka et al., 2014; Giszterowicz et al., 2018; Otop et al., 2018; Szturc et al., 2018; Jurczyk et al., 2020).

Do ilościowego oszacowania opadów mogą być również wykorzystane disdrometry laserowe (Krajewski et al., 2006; Johannsen et al., 2020). Pomiaru prowadzone za pomocą disdrometru umożliwiają określenie struktury opadów (rozkładu wielkości kropeł opadu i ich prędkości), co jest zaletą w stosunku do informacji uzyskiwanych z radaru meteorologicznego lub deszczomierza. Na podstawie zarejestrowanego rozkładu wielkości hydrometeorów wbudowane oprogramowanie disdrometru wylicza m.in. odbiciowość radarową i intensywność opadu. Ta nowoczesna technologia umożliwia rejestrację intensywności opadu z dużą rozdzielczością czasową, wynoszącą nawet 10 sekund. Disdrometry nie tylko mają duży potencjał w zakresie monitorowania opadów, ale także mają zasadnicze znaczenie dla poprawy kalibracji intensywności opadów za pomocą radaru, poprzez porównanie danych mierzonych za pomocą tych dwóch technologii (Conti et al., 2015). Jak dotąd nieliczni autorzy w Polsce (Licznar, 2009; Burszta-Adamiak, 2012; Licznar i Siekanowicz-Grochowina, 2015; Licznar i Krajewski, 2016) przedstawili wyniki analiz przy zastosowaniu disdrometru laserowego Parsivel. W swoich pracach wykazali, że disdrometr ma wysoki potencjał operacyjnego wykorzystania przede wszystkim do monitorowania opadów, ale również do kalibracji obrazów radarowych oraz wiarygodnej oceny zależności między odbiciowością radarową a intensywnością opadów. Kilku autorów wykorzystało w swoich

badaniach na terenie Polski inny typ disdrometru optycznego – Thies Clima (Szewrański, 2009; Biniak-Pieróg et al., 2015; Biniak-Pieróg, 2017). Stan wiedzy w Polsce w zakresie dokładności danych opadowych pozyskiwanych z wykorzystaniem disdrometru, adekwatnie jak w przypadku technologii radarowej, jest nadal niewystarczający.

Zasadniczym celem tej pracy była ocena przydatności disdrometru laserowego (Parsivel1) i radaru meteorologicznego (w paśmie C) do szacowania wielkości opadów deszczu. Prowadzone na stacji meteorologicznej SGGW w Warszawie w latach 2012–2014 oraz 2019–2020 pomiary opadów atmosferycznych z wykorzystaniem deszczomierza korytkowego i disdrometru laserowego posłużyły do analizy związku korelacyjnego między wysokościami opadu 24-godzinnego obliczonymi na ich podstawie. Ze zbioru danych w latach 2012–2014 wybrano do dalszej analizy 21 pojedynczych zdarzeń, dla których dysponowano również danymi opadowymi oszacowanymi na podstawie radaru meteorologicznego w Legionowie. Ze względu na to, że każde z trzech wymienionych urządzeń reprezentuje inną technologię pomiaru opadów, konieczna była czasowa synchronizacja danych oszacowanych z wykorzystaniem tych urządzeń. Dane opadowe dla zdarzeń pomierzonych przy użyciu disdrometru i radaru, w rozdzielczościach wynoszących odpowiednio 1 min i 10 min, posłużyły do analizy związków korelacyjnych między tymi danymi i adekwatnymi pomiarami z deszczomierza. Następnie porównywano wartości sum opadu oszacowanych dla pojedynczych zdarzeń za pomocą disdrometru i radaru względem danych z deszczomierza. Ostatni etap analiz obejmował korektę wysokości opadu zarejestrowanych przez disdrometr w określonych interwałach czasowych w czasie trwania zdarzenia przy zastosowaniu prostej metody, którą przedstawiono w tej pracy. Korekta danych radarowych będzie przedmiotem obszernych analiz w ramach innej publikacji.

Materiały i metody

Urządzenia pomiarowe

Stacja meteorologiczna, na której zainstalowane są disdrometr laserowy Parsivel1 i automatyczny deszczomierz korytkowy (fot. 1), wykorzystane w tej analizie, jest zlokalizowana w podmiejskiej części Warszawy, na terenie kampusu Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiej-



Fot. 1. Deszczomierz korytkowy (A) i disdrometr Parsivel1 (B) na stacji meteorologicznej SGGW (fot. M. Barszcz)
The tipping-bucket rain gauge (A) and a Parsivel1 disdrometer (B) at the WULS-SGGW Meteorological Station

skiego w Warszawie (SGGW) przy ul. Nowoursynowskiej (współrzędne: 52°09'34.85" N; 21°02'58.40" E).

Disdrometr Parsivel1 firmy OTT HydroMet GmbH umożliwia pomiar intensywności opadu, wielkości, prędkości opadania i ilości cząstek opadu, jak również odbiciowości radarowej w minimalnym interwale czasowym 10 s. Deklarowana przez producenta disdrometru dokładność pomiarów intensywności opadów wynosi $0,001 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Informacje na temat metody pomiaru za pomocą disdrometru Parsivel1 można znaleźć w pracy Jaffrain'a i Berne (2011).

Pomierzone za pomocą disdrometru dane opadowe były porównywane z adekwatnymi danymi zarejestrowanymi przy zastosowaniu automatycznego deszczomierza korytkowego firmy Theodor Friedrichs & Co., który jest zlokalizowany na tej samej stacji meteorologicznej. Ten deszczomierz jest precyzyjnie wyskalowanym urządzeniem, w którym pomiar następuje po każdym napełnieniu wodą i przechyleniu korytka pomiarowego o objętości odpowiadającej wysokości opadu 0,1 mm. Na stacji SGGW do pomiaru opadów służy także manualny deszczomierz Hellmanna.

W tej pracy wykorzystano również dane z radaru meteorologicznego, zlokalizowanego w Legionowie, ok. 30 km na północ od analizowanej stacji meteorologicznej w Warszawie. Należy on do sieci radarowej POLRAD i jest obsługiwany przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy. Jest to radar dopplerowski z pojedynczą polaryzacją fali elektromagnetycznej (spolaryzowaną poziomo), o częstotliwości sygnału (wysyłanego) w paśmie C (fala ok. 5 cm), który jest przeznaczony do obserwacji długiego zasięgu w strefie klimatu umiarkowanego. Maksymalny zasięg radaru w Legionowie wynosi 250 km. Wyczerpujące informacje związane z technologią radarów należących do sieci IMGW można znaleźć w pracy Moszkowicza i Tuszyńskiej (2006).

Dane opadowe

W pierwszym etapie analiz wykorzystano dane opadowe oszacowane na podstawie deszczomierza korytkowego i disdrometru laserowego (zlokalizowanych na stacji meteorologicznej SGGW, fot. 1), obejmujące wybrane miesiące w latach 2012-2014 oraz 2019-2020 (łącznie 30 miesięcy w okresach od kwietnia do października), dla których dane były kompletne. Następnie ze zbioru danych w latach 2012-2014 wydzielono 21 pojedynczych zdarzeń opadowych, dla których dysponowano również danymi radarowymi w postaci produktu PAC (ang. Precipitation Accumulation).

Poszczególne zdarzenia charakteryzują się bardzo zróżnicowanymi wartościami parametrów, takimi jak wysokość (suma), czas trwania i intensywność opadu (średnia i maksymalna), w odniesieniu do danej metody pomiaru opadów (tab. 1). Bardzo duże różnice w wartościach parametrów występują również dla określonych zdarzeń, które pomierzono za pomocą trzech różnych technologii i urządzeń: deszczomierza (DE), disdrometru (DI) i radaru (R). Dotyczy to m.in. wartości sum opadu dla zdarzeń. Przeważnie (poza jednym zdarzeniem) sumy opadu zarejestrowane za pomocą disdrometru były większe niż odpowiadające im wartości zarejestrowane przez deszczomierz. Z kolei sumy opadu dla zdarzeń oszacowanych za pomocą radaru były mniejsze (dla 16 zdarzeń) lub większe (dla 2 zdarzeń) niż adekwatne wartości uzyskane przy wykorzystaniu deszczomierza. Do 2015 r. opady były rejestrowane przez deszczomierz w 1-minutowych przedziałach czasowych, a później z rozdzielczością 10 min. Natomiast disdrometr stale rejestrował dane w przedziałach 1-minutowych.

Tabela 1. Wartości podstawowych parametrów dla analizowanych zdarzeń opadowych
Values of basic parameters for the rainfall events analysed

Lp.	Data zdarzenia	Suma opadu (mm)			Czas trwania opadu (min)			Średnia intensywność opadu (mm·h ⁻¹)			Maks. intensywność opadu (mm·h ⁻¹)		
		DE ¹	DI ²	R ³	DE	DI	R	DE	DI	R	DE	DI	R
1	20.04.2012	1,3	1,9	2,2	25	41	50	3,1	2,7	2,6	6,0	9,7	5,8
2	23.04.2012	10,0	12,4	9,9	331	348	360	1,8	2,1	1,7	12,0	11,3	8,8
3	04.05.2012	3,5	4,3	3,3	164	188	200	1,3	1,4	1,0	6,0	7,1	2,2
4	10.06.2012	15,5	18,7	9,4	345	354	360	2,7	3,2	1,6	30,0	41,4	6,8
5	21.06.2012	8,6	11,0	–	56	58	–	9,2	11,4	–	30,0	41,9	–
6	25.06.2012	3,3	4,2	2,4	213	230	240	0,9	1,1	0,6	12,0	12,9	2,2
7	03.07.2012	3,1	4,3	4,3	56	68	80	3,3	3,8	3,2	48,0	69,2	7,4
8	03.08.2012	6,5	9,9	1,4	36	37	40	10,8	16,1	2,1	54,0	118,5	2,7
9	05.08.2012	4,6	6,4	4,5	64	74	80	4,3	5,2	3,4	30,0	35,5	8,3
10	29.05.2013	10,7	15,6	4,3	28	36	50	22,9	26,1	5,2	90,0	151,0	15,6
11	04.06.2013	6,3	8,2	0,9	25	31	40	15,1	15,8	1,3	48,0	52,9	2,6
12	21.10.2013	15,9	21,8	–	218	221	–	4,4	5,9	–	30,0	37,3	–
13	24.10.2013	2,8	4,2	–	131	141	–	1,3	1,8	–	6,0	8,7	–
14	28.04.2014	4,2	4,7	1,4	16	22	30	15,8	12,9	2,8	30,0	35,8	8,2
15	17.05.2014	10,5	11,1	3,5	85	86	100	7,4	7,7	2,1	42,0	57,3	3,6
16	26.05.2014	25,1	34,9	18,5	192	199	210	7,8	10,5	5,3	84,0	124,8	45,6
17	21.06.2014	4,5	7,0	0,7	18	21	30	15,0	19,9	1,5	60,0	100,6	4,3
18	29.06.2014	3,7	5,8	0,9	14	20	30	15,9	17,4	1,8	42,0	67,5	4,5
19	10.07.2014	3,1	4,9	3,0	65	69	80	2,9	4,2	2,2	18,0	25,4	9,4
20	15.07.2014	2,7	2,7	0,1	9	30	40	18,0	5,3	0,2	54,0	48,0	0,2
21	23.07.2014	8,6	13,3	3,6	108	116	130	4,8	6,9	1,7	54,0	86,0	4,5
Minimum		1,3	1,9	0,1	9	20	30	0,9	1,1	0,2	6,0	7,1	0,2
Maksimum		25,1	34,9	18,5	345	354	360	22,9	26,1	5,3	90,0	151,0	45,6
Wartość średnia		7,4	9,9	4,1	105	114	119	8,0	8,6	2,2	37,4	54,4	7,9
Wartość mediany		4,6	7,0	3,1	64	69	80	4,8	5,9	2,0	30,0	41,9	5,2

¹ dane zarejestrowane przez deszczomierz korytkowy w przedziałach czasowych 1 min

² dane zarejestrowane przez disdrometr w przedziałach czasowych 1 min

³ dane zarejestrowane przez radar meteorologiczny w przedziałach 10 min

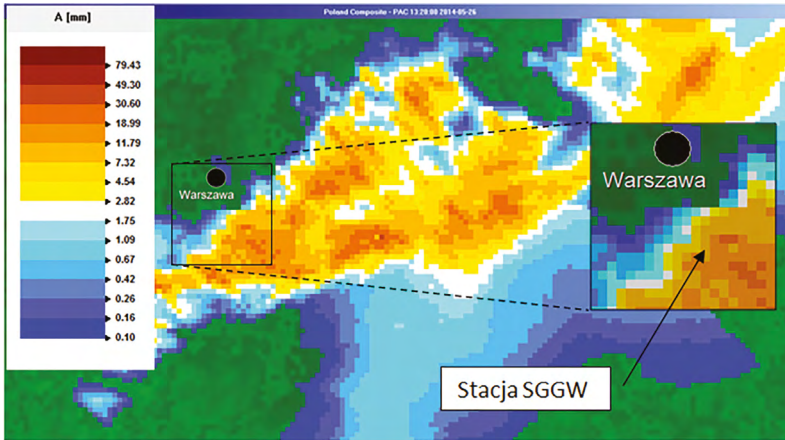
Opracowanie własne na podstawie m.in. danych radarowych, których źródłem pochodzenia jest IMGW-PIB.

Produkt radarowy PAC

Dane radarowe dla analizowanych w tej pracy zdarzeń opadowych uzyskano na podstawie produktu hydrologicznego PAC, generowanego przez system radarowy należący do IMGW-PIB i przedstawiającego obraz rozkładu godzinnych sum opadu (wyrażanych w jednostkach mm) odświeżanych co 10 min, w warstwie położonej na wysokości 1 km nad poziomem ziemi. Produkt PAC tworzony jest na bazie wartości opadu w produkcie SRI

(Surface Rainfall Intensity), poprzez sumowanie chwilowych intensywności opadu w zdefiniowanym przedziale czasu (Tuszyńska, 2011).

Na podstawie danych pozyskanych z produktu PAC obliczono w tej pracy wartości 10-minutowych sum opadu w czasie trwania określonych zdarzeń. Odpowiadają one danym z pikselu o powierzchni 1 km^2 adekwatnego do lokalizacji stacji meteorologicznej SGGW. Rycina 1 przedstawia przykładowy produkt PAC dla jednego z analizowanych zdarzeń opadowych.



Ryc. 1. Produkt radarowy PAC (mapa), przedstawiający przestrzenny rozkład 1-godzinnej sumy opadu dla zdarzenia w dniu 26.05.2014 r. o godz. 13:20 wg czasu UTC; wskazany na mapie piksel odpowiada lokalizacji stacji meteorologicznej SGGW

A – 1-godzinna suma opadu

PAC radar product (map) showing the spatial distribution of hourly sums for precipitation in the case of the event of May 26, 2014, at time 13:20 UTC; the pixel indicated on the map corresponds to the location of the WULS-SGGW Meteorological Station

Opracowanie własne (wykorzystano mapę produktu PAC, której źródłem pochodzenia jest IMGW-PIB).

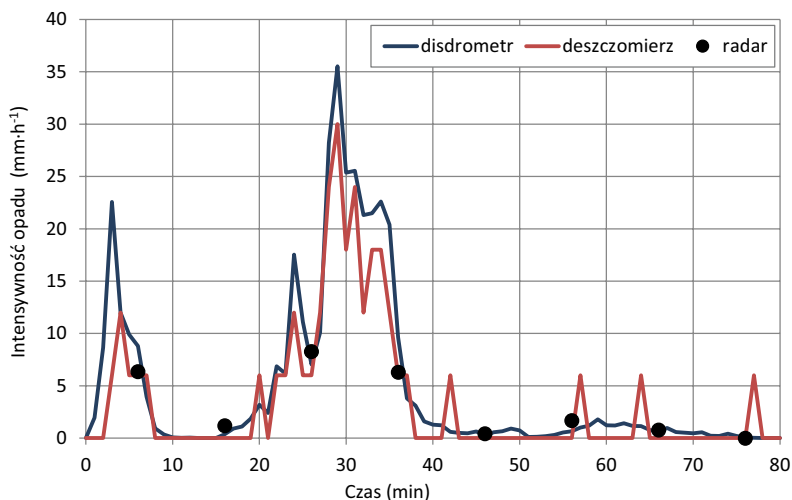
Synchronizacja danych opadowych

Wartości intensywności opadu dla analizowanych zdarzeń opadowych zostały oszacowane przy wykorzystaniu trzech różnych urządzeń (deszczomierza, disdrometru i radaru), które posiadają własne i niezależne systemy generowania i rejestracji danych. W przypadku rejestracji opadów przez deszczomierz występuje deformacja hietogramu opadu w stosunku do jego rzeczywistego przebiegu, przy zachowaniu wysokości (objętości) całkowitej opadu, wywołana błędem nazywanym *step response*, co można przetłumaczyć jako błąd stopniowej odpowiedzi (Licznar, 2018). Lanza et al. (2005) na podstawie przeprowadzonych testów laboratoryjnych deszczomierzy różnych producentów wykazali, że w przypadku większości elektronicznych deszczomierzy błąd stopniowej odpowiedzi jest szacowany na 3-4 min. Wynikiem tego jest wzajemne przesunięcie czasowe danych zarejestrowanych za pomocą deszczomierza i disdrometru, co spowodowało konieczność ich synchronizacji. Dane radarowe również są przesunięte w czasie względem danych deszczomierzowych, co wynika z faktu, że pomiar radarowy jest realizowany na wysokości 1 km i hydrometeory muszą zdążyć jeszcze dolecieć do ziemi. Przy założeniu, że prędkość opadania hydromete-

orów wynosi przeciętnie $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, czas potrzebny na pokonanie przez nie odległości 1 km do ziemi wynosi ok. 2 min.

Ponadto, dane opadowe zostały oszacowane w różnych interwałach czasowych. W przypadku danych radarowych interwał wynosi 10 min. Wartości wysokości opadu, które oszacowano przy wykorzystaniu danych z deszczomierza i disdrometru, posiadają krok czasowy wynoszący 1 min. Określone analizy w dalszym etapie pracy wymagały również ujednolicenia interwału czasowego danych. W tym celu wysokości opadów oszacowane za pomocą disdrometru i deszczomierza sumowano w przedziałach czasowych wynoszących 10 min, a następnie przeliczano na wartości intensywności opadu ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$).

Synchronizacja danych dla poszczególnych zdarzeń polegała na przesuwaniu szeregów czasowych wartości intensywności opadu (również wysokości opadu) zarejestrowanych przez disdrometr względem adekwatnych danych z deszczomierza, aż do uzyskania najlepszej zgodności między nimi. Przeprowadzono ją na podstawie danych z disdrometru, których sygnatura czasowa w pierwszej kolejności wynosiła 1 min, a później 10 min. Przesunięcie czasowe analizowanych danych wynosiło zazwyczaj nie więcej niż kilka minut, a dla niektórych zdarzeń opadowych nie było ono konieczne. W tych analizach nie realizowano przesunięcia czasowego danych radarowych względem deszczomierzowych. Jedynie w celu sporządzenia wykresu (ryc. 2) dla jednego przykładowego zdarzenia opadowego uwzględniono przesunięcie czasowe wartości radarowych intensywności opadu, wynoszące 2 min. Na rycinie 2 przedstawiono serie czasowe intensywności opadu dla zdarzenia w dniu 5.08.2012 r., których relacje czasowe są wynikiem synchronizacji danych (rozdzielczość danych z disdrometru i deszczomierza wynosi 1 min). Ocenę czasowej synchronizacji danych przeprowadzono na podstawie wartości współczynnika korelacji (dążąc do uzyskania największej wartości tego współczynnika), jak również wizualnie na podstawie wykonanych wykresów serii czasowych intensywności opadu.



Ryc. 2. Serie czasowe intensywności opadu dla zdarzenia w dniu 5.08.2012 r., uzyskane w wyniku synchronizacji danych oszacowanych za pomocą deszczomierza, disdrometru i radaru

Rainfall intensity time-series for the event of August 5, 2012, obtained through synchronisation of data estimated with the rain gauge, disdrometer and radar

Opracowanie własne na podstawie m.in. danych radarowych, których źródłem pochodzenia jest IMGW-PIB.

Korekta wysokości opadu z disdrometru

W celu zmniejszenia różnic między korespondującymi wartościami sum opadu z disdrometru i deszczomierza dla 21 analizowanych zdarzeń (tab. 1), przeprowadzono korektę wysokości 10-minutowych sum opadu w czasie trwania tych zdarzeń, oszacowanych na podstawie disdrometru. Korekta danych radarowych będzie przedmiotem analiz w innej pracy.

Zastosowana metoda korekty danych z disdrometru opiera się na prostej zależności, będącej stosunkiem korespondujących wysokości opadów (wyrażonych w mm) oszacowanych na podstawie deszczomierza P_{DE} i disdrometru P_{DI} :

$$a = \frac{P_{DE}}{P_{DI}} \quad (1)$$

Do wyznaczenia wartości parametru a we wzorze (1) przyjęto adekwatne wysokości opadów w poszczególnych przedziałach czasowych (148 par danych), agregowane w czasie dla przedziałów wynoszących 10 min, w odniesieniu do 9 zdarzeń zarejestrowanych w 2012 r., wybierając je w sposób arbitralny z pośród 21 analizowanych zdarzeń w okresie 2012-2014 (tab. 1). Dane w interwałach 10-minutowych ustalono na podstawie wartości obserwowanych w rozdzielczości 1 min. Pozostałe zdarzenia wykorzystano do weryfikacji zaproponowanej metody korekty danych. Na podstawie wartości parametru a , obliczonych ze wzoru (1) dla wszystkich par danych, wyznaczono wartość mediany wynoszącą 0,78.

Ustalono, że skorygowana wartość wysokości opadu $P_{DI\text{ kor}}$ (mm), oszacowana na podstawie oryginalnych danych z disdrometru P_{DI} (mm), jest wyrażona równaniem:

$$P_{DI\text{ kor}} = P_{DI} \times 0,78 \quad (2)$$

Miary statystyczne

Do ilościowego określenia różnic w pomiarach opadów przeprowadzonych z wykorzystaniem disdrometru, radaru i deszczomierza, jak również związków korelacyjnych pomiędzy danymi opadowymi, zastosowano kilka statystycznych miar. Należą do nich: pierwiastek błędu średniokwadratowego ($RMSE$), procentowy błąd względny (δ), współczynnik determinacji (R^2) i współczynnik korelacji (R).

Pierwiastkowy błąd średniokwadratowy, oznaczony w tej pracy symbolem $RMSE$ (ang. Root Mean Square Error), obliczono ze wzoru:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2} \quad (3)$$

gdzie:

x_i – wartość oszacowana na podstawie deszczomierza,

x_0 – wartość oszacowana na podstawie disdrometru lub radaru,

N – liczba obserwacji wykorzystanych w analizie.

Wartości $RMSE$ mniejsze niż połowa odchylenia standardowego dla analizowanych danych można uznać za niskie (Moriasi et al., 2007).

Procentowy błąd względny δ obliczono ze wzoru:

$$\delta = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_0) \times 100}{\sum_{i=1}^N (x_i)} \right] \quad (4)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (3).

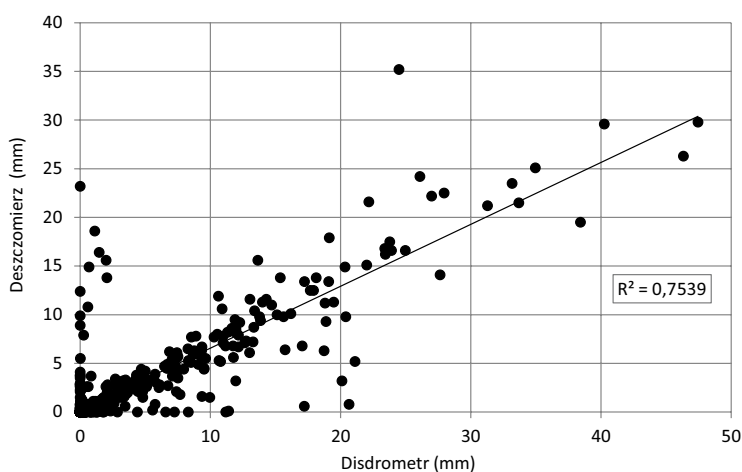
Optymalna wartość błęd δ wynosi 0. Wartości dodatnie wskazują błąd niedoszacowania, natomiast wartości ujemne wskazują błąd przeszacowania.

Wyniki i dyskusja

Korelacja danych opadowych dla całego okresu badawczego

Zbadano związek korelacyjny między wysokościami opadu 24-godzinnego (sumami opadu pomierzonymi w ciągu określonych 24 godzin, licząc od godziny 0.00), oszacowanymi na podstawie danych z deszczomierza korytkowego i disdrometru laserowego (zlokalizowanych na stacji meteorologicznej SGGW) w całym okresie badawczym, obejmującym 30 miesięcy w latach 2012-2014 oraz 2019-2020 (ryc. 3). Wykorzystano dane opadowe zarejestrowane za pomocą deszczomierza w interwale 1 h oraz disdrometru w interwale 1 min, które następnie zsumowano w 24-godzinnych przedziałach czasowych. Uzyskano współczynnik korelacji R wynoszący 0,87 (bez uwzględnienia skorelowanych wzajemnie okresów z zerowym opadem rejestrowanym przez deszczomierz i disdrometr uzyskano współczynnik korelacji $R = 0,73$), co oznacza, że siła związku między analizowanymi zmiennymi jest bardzo wysoka.

Sumy opadu dla całego okresu badawczego, obliczone na podstawie danych z deszczomierza korytkowego i disdrometru Parsivel1 w 24-godzinnych przedziałach czasowych, wynosiły odpowiednio 1596,9 mm i 2236,8 mm. Suma opadu obliczona dla danych z disdrometru była większa o 40,1% od adekwatnej wartości z deszczomierza. Można przy-



Ryc. 3. Wykres korelacji 24-godzinnych sum opadu w odniesieniu dla całego okresu badawczego
Scatter plot for the correlation of 24-hour rainfall totals in relation to the entire study period

puszczać, że przyczyną zawyżenia opadów pomierzonych za pomocą disdrometru jest technika pomiaru oparta na laserowej optyce i większa czułość pomiaru intensywności opadu. Natomiast długoterminowe analizy dziennych sum opadu na terenie Austrii (Johannsen et al., 2020) dały odmienne wnioski, że disdrometr Parsivel1 niedoszacowuje opady. Procentowy błąd pomiaru opadów za pomocą disdrometru wynosił 29%. Należy mieć na uwadze, że deszczomierze są również obciążone błędami pomiarowymi.

Na stacji meteorologicznej SGGW opady mierzone są również za pomocą manualnego deszczomierza Hellmanna. Suma opadu oszacowana przy wykorzystaniu tego urządzenia w adekwatnym okresie czasu wynosiła 1673,7 mm. W tym przypadku zawyżenie wysokości opadu wynosiło 4,8% w porównaniu do automatycznego deszczomierza korytkowego.

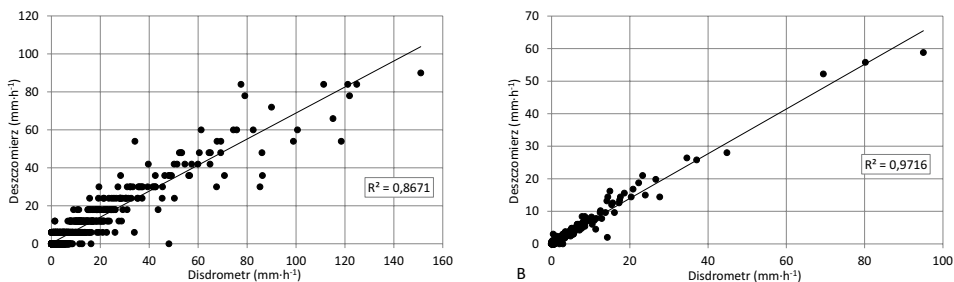
Ocena zgodności danych opadowych dla pojedynczych zdarzeń

Ze zbioru danych opadowych dla całego okresu badawczego wybrano 21 pojedynczych zdarzeń, dla których dysponowano danymi oszacowanymi jednocześnie przy zastosowaniu deszczomierza korytkowego, disdrometru laserowego i radaru meteorologicznego. Wybrane do analizy zdarzenia charakteryzują się zróżnicowanymi wartościami parametrów, takimi jak suma i czas trwania opadu, średnia i maksymalna intensywność opadu (tab. 1). Wartości intensywności lub wysokości opadu w czasie trwania tych zdarzeń, zarejestrowane przez deszczomierz i disdrometr, miały rozdzielczość czasową 1 min. Z kolei wartości intensywności opadu, uzyskane na podstawie produktu radarowego PAC (opracowanego przez IMGW-PIB), miały rozdzielczość 10 min. Zgodnie z wcześniej podaną informacją, przyjęte do analizy dane radarowe zostały wygenerowane w odniesieniu do punktu w przestrzeni odpowiadającemu lokalizacji stacji meteorologicznej SGGW, w której prowadzone są pomiary opadów za pomocą deszczomierza i disdrometru.

Wartości intensywności opadu (w jednostkach $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), oszacowane na podstawie disdrometru i radaru, wykorzystano w pierwszej kolejności do analizy związków korelacyjnych między nimi i adekwatnymi danymi z deszczomierza (wysokości opadu pomierzone przez deszczomierz przeliczono na wartości intensywności opadu). Ze względu na to, że analizowane dane zostały oszacowane przy wykorzystaniu trzech różnych urządzeń (technologii), konieczna była ich czasowa synchronizacja, którą opisano w jednym z poprzednich rozdziałów. Synchronizacja danych jest istotną kwestią, a często jest pomijana w doświadczeniach polowych (Krajewski et al., 2006).

Do określenia związków korelacyjnych pomiędzy wyżej wymienionymi danymi opadowymi zastosowano współczynnik korelacji Pearsona R . Do oceny jakościowego dopasowania wartości intensywności opadu oszacowanych na podstawie disdrometru i deszczomierza zastosowano również pierwiastkowy błąd średniokwadratowy (równanie 3), oznaczony symbolem $RMSE$. Wyniki obliczeń współczynnika korelacji R i wskaźnika $RMSE$ w odniesieniu do poszczególnych zdarzeń zestawiono w tabeli 2 (pod nagłówkiem: wyniki dla danych bez korekty).

Analizę korelacji między danymi oszacowanymi przy wykorzystaniu deszczomierza i disdrometru przeprowadzono w odniesieniu do wartości intensywności opadu w oryginalnej rozdzielczości pomiarowej przyrządów (1 min) oraz wartości uśrednionych w przedziałach 10-minutowych. Czasowa agregacja tych danych (wzrost przedziałów czasu od 1 do 10 min) pozwoliła ujednoczyć ich rozdzielczość względem danych uzyskanych na podstawie produktu radarowego PAC. Rycina 4 przedstawia wykresy korelacji między



Ryc. 4. Wykresy korelacji wartości intensywności opadu w 1-minutowych przedziałach czasowych (A) i uśrednionych w przedziałach 10-minutowych (B) dla analizowanych zdarzeń
Scatter plots for the correlation of rainfall-intensity values across 1-min time intervals (A), or averaged over 10-min intervals (B) in the case of the events analysed
 Opracowanie własne.

danymi z disdrometru i deszczomierza dla wszystkich zdarzeń, sporządzone dla dwóch przedziałów czasowych. Siła związku korelacyjnego dla danych w rozdzielczości 10 min była większa, co ilustrują wykresy (ryc. 4).

Obliczone współczynniki korelacji R w odniesieniu do wartości intensywności opadu w 1-minutowych przedziałach oszacowanych przez disdrometr (DI_{1min}) i deszczomierz, zmieniały się w zakresie od 0,37 do 0,98 dla poszczególnych zdarzeń (tab. 2). Zatem korelacja między tymi zmiennymi była w zakresie od niskiej do bardzo wysokiej. Natomiast wartości średnia i mediana dla wszystkich zdarzeń wynosiły odpowiednio 0,83 i 0,93. Wartości współczynnika R (nie wykazane w tej pracy), które otrzymywano w adekwatnej analizie przed uwzględnieniem procesu czasowej synchronizacji wartości intensywności opadu, były przeważnie dużo mniejsze dla poszczególnych zdarzeń. To potwierdziło, że synchronizacja danych zarejestrowanych za pomocą deszczomierza i disdrometru była konieczna. Współczynniki korelacji R , które uzyskano dla wartości intensywności opadu w przedziałach 10-minutowych (DI_{10min}), zawierały się w zakresie od 0,88 do 1,00, przy wartościach średniej i mediany wynoszących 0,98 i 0,99. Współczynniki R były znacząco większe niż uzyskane na podstawie danych z rozdzielczością 1 min. W innej analizie również zaobserwowano bardzo wysoką korelację między wartościami intensywności opadu oszacowanymi z wykorzystaniem disdrometru Parsivel1 i deszczomierza korytkowego (Cha i Yum, 2021).

Wartości średniej i mediany wskaźnika $RMSE$ (pierwiastkowy błąd średniokwadratowy), który zastosowano do ilościowego określenia różnic w wartościach intensywności opadu oszacowanych na podstawie disdrometru i deszczomierza w przedziałach 10-minutowych, wynosiły odpowiednio 3,60 i 2,31 dla wszystkich zdarzeń. Wartość odchylenia standardowego wynosiła 3,36. Przyjmuje się, że wartości $RMSE$ mniejsze niż połowa odchylenia standardowego można uznać za niskie. Z całego zbioru zdarzeń dla 9 z nich uzyskano wartości błędów $RMSE$ mniejsze niż połowa odchylenia standardowego, która wynosi 1,68.

Wartości intensywności opadu deszczu w poszczególnych przedziałach czasowych, oszacowane z wykorzystaniem disdrometru Parsivel1, były przeważnie większe niż adekwatne wartości uzyskane z wykorzystaniem deszczomierza (ryc. 4B). Błąd bezwzględny pomiaru wartości intensywności opadu za pomocą disdrometru wynosił przeciętnie 29,2%.

Tabela 2. Wartości danych i miar statystycznych oszacowanych dla pojedynczych zdarzeń opadowych
Values of data and statistical measures estimated for single rainfall events

Lp.	Data zdarzenia	Wyniki dla danych bez korekty						Dane po korekcie	
		δ^4 (%)		R^5 (-)	R (-)	$RMSE^6$	R (-)	P^7 (mm)	δ (%)
		DI ¹	Radar ²	DI _{1min}	DI _{10min}	DI _{10min}	Radar	DI _{10min}	DI _{10min}
1	20.04.2012	-43,1	-66,2	0,74	0,94	0,97	0,94	1,45	-11,6
2	23.04.2012	-23,6	0,9	0,68	0,98	0,67	0,77	9,64	3,6
3	04.05.2012	-23,7	7,1	0,37	0,94	0,42	0,36	3,38	3,5
4	10.06.2012	-20,8	39,5	0,86	1,00	1,02	0,37	14,60	5,8
5	21.06.2012	-27,8	–	0,93	0,99	2,75	–	8,57	0,3
6	25.06.2012	-28,5	27,9	0,45	0,88	0,67	0,50	3,31	-0,2
7	03.07.2012	-38,4	-38,4	0,95	0,99	1,67	0,85	3,35	-7,9
8	03.08.2012	-52,3	78,8	0,94	1,00	8,61	0,42	7,72	-18,8
9	05.08.2012	-38,3	1,7	0,93	0,96	2,87	0,47	4,96	-7,8
10	29.05.2013	-46,1	60,5	0,98	1,00	11,05	0,90	12,19	-13,9
11	04.06.2013	-29,5	85,9	0,98	1,00	4,27	0,91	6,36	-1,0
12	21.10.2013	-37,2	–	0,88	1,00	2,31	–	17,02	-7,0
13	24.10.2013	-50,0	–	0,49	0,95	0,84	–	3,28	-17,0
14	28.04.2014	-12,4	66,7	0,98	0,99	1,96	0,59	3,68	12,3
15	17.05.2014	-5,2	66,9	0,92	0,98	1,34	0,76	8,59	18,2
16	26.05.2014	-38,9	26,4	0,93	0,99	8,86	0,78	27,20	-8,4
17	21.06.2014	-54,7	83,8	0,96	0,94	9,63	0,98	5,43	-20,6
18	29.06.2014	-56,5	75,1	0,93	0,96	8,39	0,94	4,52	-22,1
19	10.07.2014	-57,1	3,5	0,81	1,00	2,41	0,94	3,80	-22,5
20	15.07.2014	1,5	96,3	0,88	0,99	1,61	0,33	2,07	23,2
21	23.07.2014	-54,2	57,8	0,94	0,99	3,30	0,45	10,34	-20,3
Minimum ³		1,5	0,9	0,37	0,88	0,42	0,33	1,45	0,2
Maksimum ³		57,1	96,3	0,98	1,00	11,05	0,98	27,20	23,2
Wartość średnia ³		35,2	49,1	0,83	0,98	3,60	0,68	7,69	11,7
Wartość mediany ³		38,3	59,1	0,93	0,99	2,31	0,77	5,43	11,6
Odchylenie stand. ³		16,3	30,8	0,18	0,03	3,36	0,23	5,98	7,7

¹ wyniki uzyskane dla danych oszacowanych na podstawie disdrometru w rozdzielczości 1 min

² wyniki uzyskane dla danych oszacowanych na podstawie radaru w rozdzielczości 10 min

³ miary obliczone dla danych w tabeli bez uwzględnienia znaków minus

⁴ procentowy błąd względny dla sum opadu

⁵ współczynnik korelacji dla wartości intensywności opadu z disdrometru i deszczomierza

⁶ pierwiastkowy błąd średniokwadratowy dla wartości intensywności opadu z disdrometru i deszczomierza

⁷ wysokość (suma) opadu dla zdarzenia

Opracowanie własne na podstawie m.in. danych radarowych, których źródłem pochodzenia jest IMGW-PIB.

W podobnej analizie przeprowadzonej przez Licznara (2009) na podstawie testów polowych w specjalnym laboratorium pomiarów opadów atmosferycznych, wykazano zawyżanie wartości intensywności opadu deszczu przez disdrometr Parsivel1 względem danych

z deszczomierza wagowego firmy OTT Pluvio2, wynoszące około 30%. W przypadku opadów śniegu zawyżenie ich intensywności przed disdrometr dochodziło do około 50%. Wyniki tych analiz są zgodne z przedstawionymi w tej pracy i potwierdzają, że dane opadowe oszacowane na podstawie disdrometru mogą znacznie różnić się od adekwatnych danych pomierzonych z wykorzystaniem deszczomierza.

W literaturze można również znaleźć prace, w których wykazano, że wartości intensywności opadu mogą być niedoszacowane. Przy użyciu 14 zlokalizowanych obok siebie disdrometrów Parsivel, Tapiador et al. (2017) stwierdzili, że pojedynczy disdrometr może zaniżać intensywność opadu nawet o 70% ze względu na ograniczony obszar pomiarowy urządzenia. Niedoszacowanie opadów przez disdrometr Parsivel1, względem danych z deszczomierza firmy OTT Pluvio2, stwierdzono również w pracy Johannsena et al. (2020).

Wartości współczynnika korelacji R , które wyznaczono w odniesieniu do wartości intensywności opadu oszacowanych na podstawie produktu radarowego PAC w przedziałach 10-minutowych, zawierały się w przedziale od 0,33 do 0,98 dla poszczególnych zdarzeń (tab. 2). Wartości tej miary statystycznej były bardzo zbliżone do zakresu uzyskanego dla danych z disdrometru w przedziałach 1-minutowych (0,37-0,98). Wartości średniej i mediany współczynnika R dla wszystkich zdarzeń wynosiły 0,68 i 0,77, co odpowiada wysokiej i bardzo wysokiej korelacji. Jednocześnie uzyskane wyniki wskazują, że siła związków korelacyjnych między danymi z radaru i deszczomierza była mniejsza niż w przypadku danych z disdrometru i deszczomierza o adekwatnej rozdzielczości czasowej 10 min.

Wartości intensywności opadu deszczu, oszacowane z wykorzystaniem radaru, były przeważnie mniejsze niż adekwatne wartości z deszczomierza. Błąd bezwzględny pomiaru wartości intensywności opadu za pomocą radaru wynosił przeciętnie 55,0%. Jak sugeruje Jakubiak et al., 2014, przyczyną rozbieżności w wartościach intensywności opadu może być niewystarczająca rozdzielczość czasowa danych radarowych (wynosząca najczęściej 10 lub 15 min) i niewystarczająca rozdzielczość przestrzenna deszczomierzy. To powoduje, że dla pikseli radarowych wskazujących na intensywne opady deszczu często znajdujemy małą ilość opadów mierzonych na ziemi za pomocą deszczomierza i na odwrót.

Zakres pracy obejmował również porównanie wartości sum opadu, oszacowanych dla poszczególnych zdarzeń z wykorzystaniem disdrometru i radaru, względem wartości z deszczomierza. Ocenę zgodności pomiędzy tymi danymi przeprowadzono na podstawie procentowego błędu (równanie 4), oznaczonego symbolem δ .

Sumy opadu oszacowane za pomocą disdrometru były większe niż adekwatne wartości z deszczomierza niemal dla wszystkich zdarzeń (podane w tabeli 2 wartości błędu δ były ujemne dla 20 zdarzeń), natomiast te uzyskane na podstawie danych radarowych były w większości przypadków mniejsze (ze zbioru 19 zdarzeń, dla których dysponowano danymi radarowymi, wartości δ były dodatnie w 12 przypadkach). Wartości ujemne wskazują błąd przeszacowania, natomiast wartości dodatnie – błąd niedoszacowania. Minimalna wartość błędu dla danych z disdrometru wynosiła 1,5%, a maksymalna 57,1%, przy wartościach średniej i mediany wynoszących odpowiednio 35,2 i 38,3% (wartości obliczone bez uwzględnienia znaków minus). W podobnej analizie, przeprowadzonej przez Johannsena et al. (2020) na terenie Austrii, stwierdzono, że sumy opadu dla pojedynczych zdarzeń oszacowane na podstawie disdrometru Parsivel1 były mniejsze niż pomierzone za pomocą deszczomierza. Procentowy błąd wynosił od -32,1% do 21,3% dla poszczególnych zdarzeń opadowych. Natomiast w analizie przeprowadzonej dla pojedynczych zdarzeń przez centrum lotów kosmicznych NASA w stanie Maryland (Tokay et al., 2014), błąd

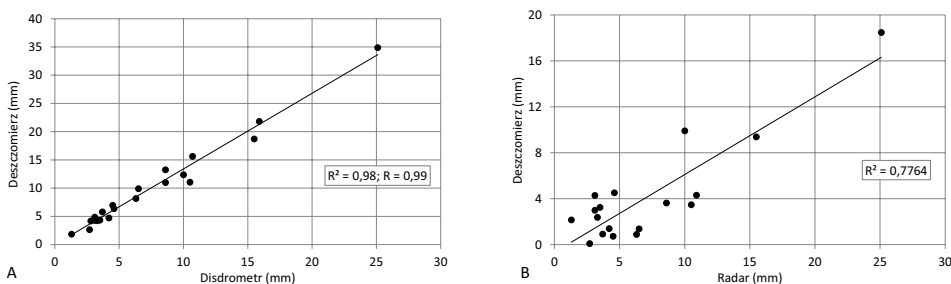
bezwzględny oszacowania opadów za pomocą disdrometru Parsivel1 wynosił 18%. W tej analizie sumy opadu dla połowy zdarzeń były przeliczane.

W przypadku danych oszacowanych na podstawie produktu radarowego PAC, wartości błędu bezwzględnego (obliczone na podstawie wartości bezwzględnych) zawierały się w zakresie od 0,9% do 96,3% (tab. 2). Wartości średniej i mediany wynosiły 49,1% i 59,1%, zatem były znacząco większe niż adekwatne wartości błędu uzyskane na podstawie danych z disdrometru (35,2% i 38,3%). Istnieje wiele przyczyn systematycznego odchylenia danych radarowych względem danych z deszczomierza, w tym niewłaściwa zależność między odbiciowością radarową i intensywnością opadu (Krajewski i Smith, 2002).

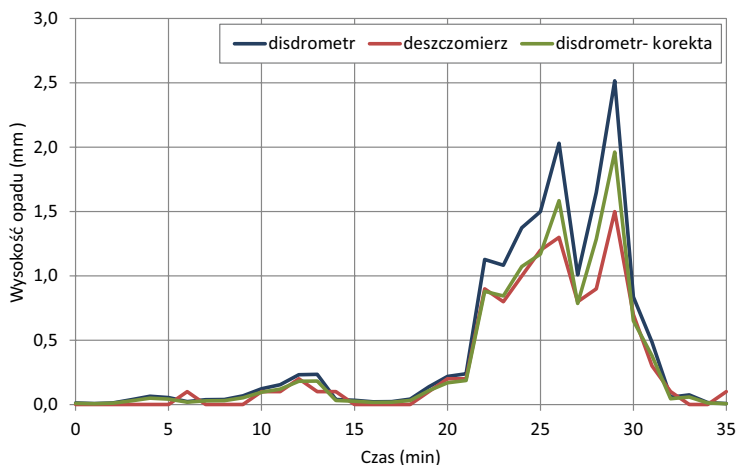
Zależność korelacyjna między wartościami sum opadu oszacowanych dla poszczególnych zdarzeń na podstawie danych z disdrometru i deszczomierza była bardzo wysoka i wynosiła $R = 0,99$ (ryc. 5A). Natomiast w odniesieniu do danych radarowych siła związku była mniejsza i wynosiła $R = 0,88$ (ryc. 5B). Mniejszą wartość współczynnika korelacji, wynoszącą $R = 0,72$ ($R^2 = 0,52$), uzyskała Somorowska (2012) w swoich analizach na podstawie wartości średnich letnich sum opadu w okresie 2004-2008 w zlewni rzeki Łasica dla danych z radaru i deszczomierza. Badaczka stwierdziła również, że wartości korelacji są ogólnie wyższe dla dłuższych interwałów czasowych.

W celu zmniejszenia różnic w wartościach sumy opadu dla analizowanych zdarzeń między danymi z disdrometru i deszczomierza, zaproponowano w ramach tej pracy prostą metodę korekty wysokości opadu w określonych przedziałach czasowych danego zdarzenia (przyjęto dane w przedziałach 10-minutowych) oszacowanych na podstawie disdrometru. Opis tej metody, która opiera się na ustalonej zależności (równanie 2), zamieszczono w jednym z poprzednich rozdziałów.

Wartości sumy opadu P (mm) dla analizowanych zdarzeń, które uzyskano na podstawie danych z disdrometru przy zastosowaniu względem nich korekty, zestawiono w tabeli 2 (pod nagłówkiem: dane po korekcie). Wartości procentowego błędu bezwzględnego, obliczone na podstawie skorygowanych danych z disdrometru i korespondujących wartości z deszczomierza, zawierały się w zakresie od 0,2% do 23,2%. Wartości średniej i mediany błędu wynosiły odpowiednio 11,7% i 11,6% (wartości obliczone bez uwzględnienia znaków minus), a więc były dużo niższe niż adekwatne wartości błędu uzyskane na podstawie



Ryc. 5. Wykresy korelacji wartości sum opadu oszacowanych dla poszczególnych zdarzeń na podstawie disdrometru (A) i radaru (B) względem wartości z deszczomierza
Scatter plots for the correlation of rainfall-total values estimated for individual events by reference to disdrometer (A) and radar (B), and in relation to rain-gauge values
 Opracowanie własne na podstawie m.in. danych radarowych, których źródłem pochodzenia jest IMGW-PIB.
 Opracowanie własne.



Ryc. 6. Serie czasowe wysokości opadu w 1-miutowych przedziałach czasowych dla zdarzenia w dniu 29.05.2013, oszacowane z wykorzystaniem deszczomierza i disdrometru (oryginalne i skorygowane wartości) *Time series for rainfall heights over 1-min time intervals for the event of May 29, 2013 estimated using the rain gauge and the disdrometer (original and corrected values)*
Opracowanie własne na podstawie m.in. danych radarowych, których źródłem pochodzenia jest IMGW-PIB.

danych z disdrometru bez uwzględnienia ich korekty (35,2% i 38,3%). Natomiast wartości średniej i mediany błędów dla 12 zdarzeń opadowych z okresu 2013-2014, które nie były wykorzystane do ustalenia równania (2) w ramach przedstawionej metody korekty danych z disdrometru, wynosiły odpowiednio 15,5% i 17,6%. Obliczone wartości błędów mieszczą się w umownej granicy akceptacji (25%), co potwierdza przydatność zaproponowanej metody do korekty danych oszacowanych na podstawie disdrometru.

Na rycinie 6 przedstawiono serie czasowe wysokości opadu dla przykładowego zdarzenia w dniu 29.05.2013 r., które oszacowano z wykorzystaniem deszczomierza oraz disdrometru (oryginalne oraz skorygowane dane z disdrometru). Błąd względny w odniesieniu do sumy opadu dla tego zdarzenia przed zastosowaniem korekty wynosił -46,1%, a po jej zastosowaniu -13,9% (tab. 2).

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone analizy pozwoliły wysunąć następujące uogólnienia i wnioski:

1. Deszczomierz i disdrometr posiadają własne i niezależne systemy rejestracji danych opadowych, skutkiem czego jest wzajemne przesunięcie czasowe danych oszacowanych za pomocą tych przyrządów. Z tego względu konieczna była czasowa synchronizacja danych opadowych wykorzystanych w tej pracy. Przeważnie przesunięcie czasowe danych wynosiło kilka minut.
2. Analiza wartości intensywności opadu dla 21 pojedynczych zdarzeń, oszacowanych z wykorzystaniem deszczomierza i disdrometru, wykazała, że istnieje silna zależność liniowa między tymi zmiennymi. To oznacza, że wzrost lub spadek wartości danych rejestrowanych przez disdrometr jest czasowo zsynchronizowany z adekwatny-

- mi (choć często nieproporcjonalnymi) zmianami wartości danych mierzonych za pomocą deszczomierza. Stwierdzono wyraźny wpływ agregacji czasowej danych na wzrost wartości współczynnika korelacji. Analiza wykazała również, że najczęściej występuje znaczne zawyżenie wartości intensywności opadu przez disdrometr Parsivel1 względem danych z deszczomierza. Wyniki tej analizy sugerują, że wskazane jest przeprowadzenie korekty danych z disdrometru przed ich zastosowaniem w badaniach hydrologicznych.
3. Natomiast analiza wartości intensywności opadu uzyskanych na podstawie produktu radarowego PAC wykazała, że są one przeważnie dużo niedoszacowane. Nie ma prostego sposobu na skorygowanie tych błędów systemu obserwacji, który byłby w stanie znacząco poprawić szacunki opadów deszczu z radarów meteorologicznych (Jakubiak et al., 2014). Jednak dalsze analizy autora będą ukierunkowane na doskonalenie metodyki przetwarzania danych radarowych, w tym obejmujące opracowanie właściwej zależności między odbiciowością radarową i intensywnością opadu.
 4. Wyniki z tego studium przypadku sugerują, że sumy opadu oszacowane z disdrometru i radaru dla poszczególnych zdarzeń nie zawsze odpowiadają adekwatnym wartościom obliczonym na podstawie danych mierzonych za pomocą deszczomierza. Obliczone dla tych danych wartości procentowego błędu były bardzo zróżnicowane dla poszczególnych zdarzeń. Dla niektórych z nich uzyskiwano małe błędy, ale ich przeciętne wartości przekraczały wartość uznawaną za umowną granicę akceptacji (25%). Uzyskane w tej analizie wyniki potwierdzają, że dane opadowe oszacowane z wykorzystaniem disdrometru i radaru wymagają wcześniejszej korekty przed potencjalnym ich wykorzystaniem, na przykład, do zasilania modeli hydrodynamicznych zlewni.
 5. Przedstawiona w tej pracy prosta metoda korekty danych z disdrometru pozwoliła znacznie zmniejszyć różnicę między wartościami sum opadu dla analizowanych zdarzeń, które obliczono na podstawie skorygowanych danych i odpowiadających im wartości z deszczomierza. Uzyskane w tej analizie wartości mediany błędu bezwzględnego wynosiły 11,6 i 17,6%, odpowiednio w odniesieniu do wszystkich analizowanych zdarzeń opadowych i 12 zdarzeń przyjętych do weryfikacji zaproponowanej metody. Obliczone wartości błędu są relatywnie małe, co stanowi potwierdzenie przydatności tej metody do korekty danych z disdrometru. Jednocześnie uzyskane wyniki uprawniają do stwierdzenia, że skorygowane wartości danych opadowych oszacowanych na podstawie disdrometru mogą być wykorzystywane w analizach hydrologicznych.

Autor dziękuje Katedrze Kształtowania Środowiska oraz Katedrze Hydrologii, Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Pani Annie Baryła, Panu Tomaszowi Stańczykowi oraz Panu Dariuszowi Gołaszewskiemu za udostępnienie zbioru danych opadowych zarejestrowanych na stacji meteorologicznej SGGW i pomoc w realizacji niniejszej pracy.

Informacja dotycząca danych radarowych:

Źródłem pochodzenia danych jest Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy.

Dane Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego zostały przetworzone.

Piśmiennictwo

- Atencia, A., Mediero, L., Llasat, M.C., & Garrote, L. (2011). Effect of radar rainfall time resolution on the predictive capability of distributed hydrologic model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 3809-3827.
- Barszcz, M. (2018). Radar Data Analyses for a Single Rainfall Event and Their Application for Flow Simulation in an Urban Catchment Using the SWMM Model. *Water*, 10(8), 1-18. <https://doi.org/10.3390/w10081007>
- Barszcz, M. (2019). Quantitative rainfall analysis and flow simulation for an urban catchment using input from a weather radar. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 2129-2144. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1682065>
- Berne, A., Delrieu, G., Cretin, J.-D., & Oblé, C. (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 166-179.
- Biniak-Pieróg, M. (2017). *Monitoring of atmospheric precipitation and soil moisture as basis for the estimation of effective supply of soil profile with water*. Monografie 207. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego.
- Biniak-Pieróg, M., Biel, G., Szulczewski, W., & Żyromski, A. (2015). Evaluation of methods of comparative analysis of sums of atmospheric precipitation measured with the classical method and with a contact-less laser rain gauge. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Land Reclamation*, 47, 371-382. <https://doi.org/10.1515/sggw-2015-0038>
- Burszta-Adamiak, E. (2012). Analysis of Stormwater Retention on Green Roofs/Badania Retencji Wód Opadowych Na Dachach Zielonych. *Archives of Environmental Protection*, 38, 3-13. <https://doi.org/10.2478/v10265-012-0035-3>
- Cha, J.W. & Yum, S.S. (2021). Characteristics of precipitation particles measured by Parsivel disdrometer at a mountain and a coastal site in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 57, 261-276. <https://doi.org/10.1007/s13143-020-00190-6>
- Conti, F.L., Francipane, A., Pumo, D., & Noto, L.V. (2015). Exploring single polarization X-band weather radar potentials for local meteorological and hydrological applications. *Journal of Hydrology*, 531, 508-522. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.071>
- Delrieu, G., Bonnifant, L., Kirstetter, P.-E., & Boudevillain, B. (2014). Dependence of radar quantitative precipitation estimation error on the rain intensity in the Cévennes region, France. *Hydrological Sciences Journal*, 59(7), 1308-1319.
- Giszterowicz, M., Ośródk, K., & Szturc, J. (2018). Nowcasting of rainfall based on extrapolation and evolution algorithms. Preliminary results. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, 17(4), 59-67. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2018.17.4.59>
- Jaffrain, J., & Berne, A. (2011). Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARSIVEL disdrometers. *Journal of Hydrometeorology*, 12, 352-370. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1244.1>
- Jakubiak, B., Licznar, P., & Malinowski, Sz.P. (2014). Rainfall estimates from radar vs. raingauge measurements. Warsaw case study. *Environment Protection Engineering*, 40(2), 159-170. <https://doi.org/10.5277/epel140212>

- Johannsen, L.L., Zambon, N., Strauss, P., Dostal, T., Neumann, M., Zumr, D., Cochrane, T.A., Blöschl, G., & Klik, A. (2020). Comparison of three types of laser optical disdrometers under natural rainfall conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 65(4), 524-535. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1709641>
- Jurczyk, A., Szturc, J., Otop, I., Ośródk, K., & Struzik, P. (2020). Quality-Based Combination of Multi-Source Precipitation Data. *Remote Sensing*, 12, 1709. <https://doi.org/10.3390/rs12111709>
- Krajewski, W.F., Kruger, A., Caracciolo, C., Golé, P., Barthes, L., Creutin, J-D., Delahaye, J-Y., Nikolopoulos, E.I., Ogden, F., & Vinson, J-P. (2006). DEVEX-Disdrometer Evaluation Experiment: Basic results and implications for hydrologic studies. *Advances in Water Resources*, 29, 311-325. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.03.018>
- Krajewski, W.F., & Smith, J.A. (2002). Radar hydrology: rainfall estimation. *Advances in Water Resources*, 25, 1387-1394.
- Krajewski, W.F., Villarini, G., & Smith, A. (2010). Radar-rainfall uncertainties. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 87-94.
- Lanza, L., Leroy, M., Alexandropoulos, C., Stagi, L., & Wauben, W. (2005). *WMO laboratory intercomparison of rainfall intensity gauges*. Final report, IOM Report 84, WMO/TD 1304.
- Licznar, P. (2009). Wstępne wyniki porównawczych testów polowych elektronicznego deszczomierza wagowego OTT Pluvio2 i disdrometru laserowego Parsivel. *Instal*, 7/8, 43-50.
- Licznar, P. (2018). *Analiza opadów atmosferycznych na potrzeby projektowania systemów odwodnienia*. Monografia 137. Wrocław: Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Środowiska.
- Licznar, P., & Krajewski, W.F. (2016). Precipitation Type Specific Radar Reflectivity-rain Rate Relationship for Warsaw, Poland. *Acta Geophysica*, 64(5), 1840-1857.
- Licznar, P., Łomotowski, J., & Rojek, M. (2005). Methods of rainfall intensity measurement for the Leeds of Urban drainage systems` design and exploitation. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 5, 209-2019.
- Licznar, P., & Siekanowicz-Grochowina, K. (2015). Wykorzystanie disdrometru laserowego do kalibracji obrazów pochodzących z radarów opadowych na przykładzie Warszawy. *Ochrona Środowiska*, 37(2), 11-16.
- Löwe, R., Thorndahl, S., Mikkelsen, P.S., Rasmussen, M.R., & Madsen, H. (2014). Probabilistic online runoff forecasting for urban catchments using inputs from rain gauges as well as statically and dynamically adjusted weather radar. *Journal of Hydrology*, 512, 397-407.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Moszkowicz, S., & Tuszyńska, I. (2006). *Meteorologia radarowa. Podręcznik użytkownika informacji radarowej IMGW*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.
- Niem, T.J., Warsta, L., Taka, M., Hickman, B., Pulkkinen, S., Krebs, G., Moisseev, D.N., Koivusalo, H., & Kokkonen, T. (2017). Applicability of open rainfall data to event-scale urban rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 547, 143-155. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.056>
- Ośródk, K., Szturc, J., Jakubiak, B., & Jurczyk, A. (2014). Processing of 3D weather radar data with application for assimilation into the NWP model. *Miscellanea Geographica – Regional Studies on Development*, 18(3), 31-39. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2014-0023>
- Otop, I., Szturc, J., Ośródk, K., & Djaków, P. (2018). *Automatic quality control of telemetric rain gauge data for operational applications at IMGW-PIB*. ITM Web of Conference 23, 00028. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20182300028>
- Rafieenasab, A., Norouzi, A., Kim, S., Habibi, H., Nazari, B., Seo, D.-J., Lee, H., Cosgrove, B., & Cui, Z. (2015). Toward high-resolution flash flood prediction in large urban areas – analysis of sensitivity

- ty to spatiotemporal resolution of rainfall input and hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 531, 370-388.
- Somorowska, U. (2012). Annual and seasonal precipitation patterns across lowland catchment derived from rain gauge and weather radar data. *Journal of Water and Land Development*, 17(7-12), 3-10.
- Szewrański, S. (2009). *Rozbryzg jako forma erozji wodnej gleb lessowych*. Monografie 78. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
- Szturc, J., Jurczyk, A., Ośródką, K., Wyszogrodzki, A., & Giszterowicz, M. (2018). Precipitation estimation and nowcasting at IMGW-PIB (SEINO system). *Meteorology Hydrology and Water Management*, 6(1), 3-12. <https://doi.org/10.26491/mhwm/76120>
- Tapiador, F.J., Navarro, A., Moreno, R., Jiménez-Alcázar, A., Marcos, C., Tokay, A., Durán, L., Bodoque, J.M., Martín, R., Petersen, W., & de Castro, M. (2017). On the optima measuring area for pointwise rainfall estimation: a dedicated experiment with 14 laser disdrometers. *Journal of Hydrometeorology*, 18(3), 753-760. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0127.1>
- Thorndahl, S., Einfalt, T., Willems, P., Nielsen, J.E., Veldhuis, M.-C., Arnbjerg-Nielsen, K., Rasmussen, M.R., & Molnar, P. (2017). Weather radar rainfall data in urban hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 1359-1380.
- Tokay, A., Wolff, D.B., & Petersen, W.A. (2014). Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel². *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31, 1276-1288. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00174.1>
- Tuszyńska, I. (2011). *Charakterystyka produktów radarowych*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy.

Summary

Contemporary challenges in the management of stormwater and modelling of rainfall-runoff processes (in urban areas in particular) require the use of rainfall-estimation devices more advanced than rain gauges. One such device is the laser disdrometer, which allows (alongside radar reflectivity) for measurement of the intensity of rainfall of high temporal resolution and an accuracy greater than that available using rain gauges. On the other hand, meteorological radar makes it possible to estimate rainfall with a high degree of spatial resolution. The disadvantage of radar observations is the inaccuracy of the rainfall data obtained.

Measurements of atmospheric precipitation conducted at the WULS-SGGW Meteorological Station in Warsaw in the years 2012-2014 and 2019-2020, using a tipping-bucket rain gauge and the laser disdrometer (Parsivel), were combined with data obtained from the meteorological radar in Legionowo (in the C-band), with this allowing data to be collected to allow for assessment of the usefulness of the disdrometer and radar where the estimation of rainfall is concerned. The two instruments have independent systems by which to record precipitation data, ensuring a mutual time shift. This made temporary synchronisation a necessity.

The data for the entire study period were used in analysing correlations between 24-hour rainfall depths estimated on the basis of the rain gauge, on the one hand; and the disdrometer on the other. The correlation coefficient R obtained was equal to 0.87.

However, the total amount of rainfall calculated on the basis of the data from the disdrometer was about 40% greater than the corresponding value from the rain gauge.

From the dataset for the years 2012-2014, 21 individual events were selected for further analysis, with these being ones for which radar-estimated rainfall data in the form of a PAC hydrological product generated by the system belonging to Poland's Institute of Meteorology and Water Management (*IMGW-PIB*) were also available. The data measured using the rain gauge and the disdrometer were characterised by a high time resolution, of 1 min. The rainfall-intensity values obtained from the PAC product had a temporal resolution of 10 min and a spatial resolution of 1 km. The rainfall data from the disdrometer and radar were then used in analysing the correlations between these and corresponding measurements made by rain-gauge. The mean and median values of the *R* correlation coefficient, obtained in these analyses on the basis of rainfall-intensity values averaged over 10-min time intervals (though observed at the basic 1-min resolution) were, when estimated using the disdrometer, of 0.98 and 0.99 respectively. Correlations based around rainfall-intensity values at the 1-min level of resolution only assumed lower values. The adequate values of the *R* coefficient, as determined for the radar data, were of 0.68 and 0.77 respectively.

The study also extended to include comparison of total values estimated for 21 individual rainfall events using the disdrometer and radar (the PAC hydrological product), as compared with data measured using the rain gauge. The analysed values from the disdrometer were greater than the corresponding rain-gauge values for almost all events, while those obtained using radar were lower in most cases. The mean and median values of the relative error, obtained in relation to the values of rainfall totals measured using the disdrometer, were 35.2 and 38.3% respectively. The relative error values, obtained in adequate analysis based around data from the PAC radar product, proved to be much higher, and amounted to 49.1 and 59.1% respectively. This analysis therefore made it clear how disdrometer- and radar-based data require prior correction before any potential use can be made of them, e.g. in hydrological analyses.

This paper's simple method of adjusting the heights of rainfall estimated on the basis of the disdrometer at specific (assumed 10-min) time intervals during the event was able to achieve a significant reduction of differences in the total rainfall values for single events, as supplied by data from the disdrometer and the rain gauge. In regard to the adjusted data from the disdrometer, the mean and median values for relative error were of 15.5 and 17.6% respectively, in respect of the 12 rainfall events used to verify the method.