

Paweł Licznar, Bartosz Szelaǳ

## Analiza zmienności czasowej opadów atmosferycznych w Warszawie

W 1971 r. została opublikowana pierwsza wersja modelu komputerowego kanalizacji deszczowej znana pod akronimem SWMM (storm water management model). Początkowo jego stosowanie ograniczało się do prowadzenia symulacji odpływu wód opadowych w przypadku pojedynczych deszczów, a z czasem zostało rozszerzone do symulacji ciągłych prowadzonych na bazie szeregów czasowych opadów [1]. Jeszcze z końcem XX w. ograniczenia wydajności obliczeniowej komputerów tłumaczyły częstą praktykę uciekania się do tzw. pluwiogramu wzorcowego lub też pluwiogramu syntetycznego przy próbach stosowania modeli hydrodynamicznych. Zakładano, że pojedynczy deszcz wzorcowy (modelowy), ewentualnie grupa deszczów wzorcowych przy różnych czasach trwania i prawdopodobieństwach wystąpienia, mogą być traktowane jako wiarygodna podstawa do symulacji przyszłej pracy systemu kanalizacji. Praktykę taką w znacznym stopniu tłumaczył także brak dostępu do rzeczywistych rejestracji deszczów. Rejestracje opadów atmosferycznych wykonywano wówczas głównie przy pomocy klasycznych pluwiografów, które wymagały systematycznej obsługi, a analogowe zapisy deszczów trzeba było dodatkowo transformować do formatu cyfrowego. Za warsztatem deszczów wzorcowych przemawiało także ich powiązanie ze stosowanymi tradycyjnie już od bez mała 100 lat formułami natężeń deszczów miarodajnych (zależności IDF lub DDF, wiążące natężenie deszczu lub jego warstwę z czasem trwania i częstością występowania). Z formuł tych, po przyjęciu odpowiedniego prawdopodobieństwa wystąpienia, szacowano całkowitą wysokość warstwy deszczu syntetycznego, czy też warstw cząstkowych w przypadku krótszych czasów. Tak estymowane warstwy opadów atmosferycznych rozkładano następnie w czasie według przyjmowanej zwykle w sposób umowny metody deterministycznej. Owocem tej tradycji są zapisy niemieckiego komentarza do wytycznej ATV-118 [2], często stosowane w praktyce także w Polsce. Zgodnie z nimi deszcz modelowy do zasilania hydrodynamicznych modeli splotu winien być przyjmowany według modelu Eulera (typ II). Deszcz modelowy Eulera (typ II) lub też nawet grupy deszczów modelowych są zalecanym typem obciążenia opadem atmosferycznym do prowadzenia obliczeń sprawdzających systemów kanalizacyjnych oraz

weryfikacji częstości ich nadpiętrzenia. Ponadto deszcz modelowy jest uznawany za możliwe obciążenie opadem atmosferycznym do obliczania nowo projektowanych systemów kanalizacyjnych oraz wariantów ich renowacji.

Bardzo szeroki zakres stosowania deszczu modelowego Eulera (typ II) i jego coraz częstsze przypadki użycia w modelowaniu hydrodynamicznym systemów odwodnienia w Polsce każe postawić pytanie – na ile to rozwiązanie jest uzasadnione? Autorom nie są znane jakiegokolwiek doniesienia literaturowe wskazujące na wcześniejsze badania weryfikujące zasadność adaptacji deszczu modelowego Eulera (typ II) do warunków krajowych. Co więcej – pewne wątpliwości co do przyjęcia deszczu modelowego według Eulera (typ II) mogą się rodzić już nawet na terenie Niemiec, gdyż zasadniczo genezą modelu nie było kompleksowe opracowanie statystycznego licznego zbioru zapisów deszczów rzeczywistych, lecz zapis pewnej ogólnej (uproszczonej) inżynierskiej koncepcji deszczu (prywatna dyskusja z prof. Theo Schmittem, 2009 r.). Nie mniej jednak istotną przesłanką do podjęcia badań nad analizą zmienności czasowej deszczów oraz zagadnieniem hietogramów wzorcowych jest ewidentny niedobór krajowych opracowań w tym obszarze hydrologii miejskiej. Pionierską i do niedawna jedyną pracą w tym zakresie było studium z 1984 r. [3], prezentujące pluwiogram syntetyczny otrzymany w przypadku Raciborza. Dopiero całkiem niedawno ukazała się publikacja [4], której autor analizował znormalizowane rozkłady warstwy deszczu w czasie trwania opadów atmosferycznych na podstawie 71 zdarzeń zarejestrowanych przez trzy deszczomierze zlokalizowane w zlewni Potoku Służewieckiego. Autor na podstawie zapisów deszczów opracował syntetyczny rozkład znormalizowany, który (jak ustalił) był zbliżony do powszechnie znanych rozkładów DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau) i SCS Typ II (Soil Conservation Service). Te dwa rozkłady znajdują jednak większe zastosowanie w modelowaniu hydrologii małych, niekontrolowanych zlewni, a nie przy modelowaniu hydrodynamicznym miejskich systemów odwadniania.

Nawiązując do pokrewnego zagadnienia transformacji fal wezbraniowych na małych ciekach górskich należy wspomnieć o monografii [5], której Autorzy opracowali charakterystyczne krzywe zmian natężenia deszczu w czasie w wydzielonych typach opadów atmosferycznych (opady konwekcyjne, frontalne i niżowe) w przypadku stacji Gdańsk, Toruń, Kielce i Wisła, reprezentujących różne regiony pluwigraficzne Polski. Warto jednak podkreślić, że badania te, choć o charakterze ogólnopolskim, zrealizowano na stosunkowo skromnym materiale, wybierając jedynie po

Dr hab. inż. P. Licznar: Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Zaopatrzenia w Wodę, wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, [pawel.licznar@pwr.edu.pl](mailto:pawel.licznar@pwr.edu.pl)

Dr inż. B. Szelaǳ: Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

10 zdarzeń o zbliżonym średnim natężeniu każdego typu deszczu w przypadku każdej z czterech stacji. Jak dotąd nie są znane próby wykorzystania uzyskanych hietogramów do modelowania hydrodynamicznego kanalizacji deszczowej. Podsumowując niewielki dorobek krajowych badań nad hietogramami wzorcowymi trzeba podkreślić zwykle bardzo skromny materiał badawczy, jakim dysponowali ich autorzy i wskazać na często skrajnie prosty i zarazem dyskusyjny warsztat wykorzystany do opracowania wyników.

Mając na uwadze niedostateczny stan wiedzy krajowej o hietogramach wzorcowych, zasadniczym celem pracy było stworzenie nowej propozycji warsztatu analizy zmienności czasowej deszczów, a następnie jego wykorzystanie w warunkach miejskiego pola opadowego Warszawy. Podjęte badania miały też na celu odpowiedzieć na pytania, czy opady atmosferyczne rejestrowane na obszarze pojedynczego miasta rzeczywiście wykazują pewnego rodzaju podobieństwo dające możliwość zapisu ich przebiegu w czasie uproszczonym (deterministycznym) wzorcem, a jeśli tak, to na ile ten wzorzec jest zbliżony do powszechnie przyjmowanego deszczu modelowego Eulera (typ II)?

### Poligon badawczy i metody badań

Badania przeprowadzono na podstawie szeregów deszczów zarejestrowanych przez sieć 25 deszczomierzy rozmieszczonych na terenie Warszawy. Zbiór szeregów zarejestrowanych deszczów obejmował przedział czasu od 15 września 2008 r. do 19 listopada 2010 r. Sieć monitoringu opadów atmosferycznych należąca do MPWiK w m.st. Warszawie należy do największych i najbardziej nowoczesnych w Europie, a zbiór zarejestrowanych danych był już wykorzystywany we wcześniejszych pracach z zakresu hydrologii miejskiej [6, 7]. Bardziej szczegółową charakterystykę samej sieci i rejestrowanych szeregów można odnaleźć w obu źródłach, przy czym w pracy [6] przedstawiono lokalizację wszystkich 25 deszczomierzy.

Na wstępie badań oryginalne szeregi pomiarowe o rozdzielczości 1 min zostały zagregowane do rozdzielczości wynoszącej 5 min. Był to zabieg wynikający z jednej strony z chęci dostosowania rozdzielczości czasowej deszczów do rozdzielczości spotykanych w przypadku deszczów modelowych, a z drugiej strony mający zniwelować typowy błąd pomiarowy spotykany w przypadku elektronicznych deszczomierzy wagowych (błąd skokowej odpowiedzi – step response error). Z uzyskanych szeregów deszczów o rozdzielczości 5 min dokonano wydzielenia poszczególnych zdarzeń opadowych. W przeciwieństwie do wcześniej wymienionych prac, wydzielenia deszczów postanowiono dokonać w sposób ścisły i według obiektywnych zasad. Przyjęto przy tym kryteria służące doborowi serii deszczów nawalnych zdefiniowane w pracy [2], w komentarzu do wytycznej ATV-A118P. Zgodnie z nimi każdy deszcz nawalny musi mieć warstwę co najmniej 10 mm i być oddzielony od innych zdarzeń czasem minimum 4 godzin bez opadu atmosferycznego. Kryteria te są stosowane w krajowej praktyce modelowania systemów odwadniania, np. w pracy [8] zastosowano je we Wrocławiu do identyfikacji deszczów zarówno w szeregach obserwacyjnych, jak i syntetycznych.

Na kolejnym etapie badań w przypadku każdego z wydzielonych deszczów wyznaczano jego całkowitą wysokość ( $P_c$ ) i całkowity czas trwania ( $T_c$ ). Wartości warstwy każdego z opadów ( $P_i$ ) w kolejnych przedziałach czasu równych 5 min dzielono przez całkowitą wysokość ( $P_c$ ),

uzyskując bezwymiarowe warstwy deszczów ( $P_i/P_c$ ), wyrażone ostatecznie w procentach. W ten sposób wszystkie deszcze przekonwertowano w hietogramy znormalizowane. Metoda ta była częściowo zgodną z opisaną w pracy [4], niemniej jednak – co jest bardzo istotne – normalizacji nie poddawano zmiennej czasu. Zabieg taki uznano za niewłaściwy, gdyż za bezzasadną uznano dalszą wspólną analizę rozkładów znormalizowanych wszystkich deszczów razem. Oznaczałoby to sytuację, w której na przykład hietogram deszczu o czasie  $T_c = 25$  min jest porównywany z hietogramami deszczów o czasach trwania o rząd, a nawet dwa rzędy wyższych. W tym przypadku znormalizowana rozdzielczość czasowa analizowanych jednocześnie deszczów różniłaby się diametralnie. Przy okazji dochodziłoby do nieuniknionego przemieszania deszczów o różnych typach genetycznych. Szczegółową dyskusję tego zagadnienia można znaleźć w pracy [5], której autorzy wydzieliли osobno deszcze konwekcyjne, trwające do 1,5 godz., deszcze frontalne o czasach 2,5÷7,5 godz. oraz deszcze niżowe trwające dłużej niż 10,5 godz.

W świetle tych uwag, w miejsce zabiegu normalizacji zmiennej czasowej, dokonano jedynie podziału wydzielonych deszczów na podzbiory o wzrastających czasach trwania ( $T_c$ ). Sekwencja wydzielonych podzbiorów obejmowała deszcze mieszczące się w następujących przedziałach czasu (wyrażonych w minutach):  $<0÷45>$ ,  $(45÷60>$ ,  $(60÷90>$ ,  $(90÷120>$ ,  $(120÷180>$ ,  $(180÷240>$ ,  $(240÷300>$ ,  $(300÷360>$ ,  $(360÷420>$ . Oznaczało to, że w każdym podzbiore mogły znaleźć się też deszcze o krótszych czasach trwania, mniejszych od górnej granicy przedziału czasu. Hietogram każdego z takich deszczów był automatycznie wydłużony po przyjęciu zerowych wartości znormalizowanych warstw deszczu w brakujących przedziałach 5-minutowych, dopełniających zapis do górnej granicy przedziału czasu. W efekcie analogicznych operacji w każdym z podzbiorów znormalizowane hietogramy były definiowane przez wektory liczbowe o jednakowej długości, co otwierało możliwość zastosowania techniki analizy skupień do oceny ich wzajemnego podobieństwa oraz podobieństwa względem deszczu modelowego Eulera (typ II). W tym celu każdy z podzbiorów był dodatkowo uzupełniany o wzorzec deszczu modelowego, wyznaczany według zapisów zawartych w wytycznej [2] i na podstawie najpopularniejszej formuły natężeń deszczów miarodajnych w przypadku Warszawy [9], zwyczajowo nazywanej „formułą Błaszczyka”.

Podstawowym nowym elementem metodyki badawczej było zastosowanie analizy skupień w celu obiektywnej oceny podobieństwa analizowanych hietogramów. Analiza skupień jest zespołem metod służących do wyodrębnienia jednorodnych podzbiorów (obiektów). Na podstawie zmiennych charakteryzujących analizowane obiekty, analiza skupień znajduje grupy (skupienia, czy też klastry) obiektów podobnych do siebie i ukazuje, jak bardzo jedna grupa podobna jest do innych lub też, co jest często ważniejsze, jak mocno różni się od innych grup i obiektów w nich zawartych. Przystępując do badań hietogramów zwrócono uwagę na potencjał zastosowania technik aglomeracyjnych. W technikach tych każdy obiekt wstępnie jest odrębnym skupieniem i w toku prowadzonej analizy, krok po kroku, najbardziej podobne obiekty łączy się w nowe skupienia, finalnie uzyskując jedno duże skupienie. Końcowym rezultatem tego procesu jest dendrogram, czyli drzewo hierarchiczne ułożonych skupień, pozwalający na łatwe i czytelne graficzne przedstawienie wyników analiz.

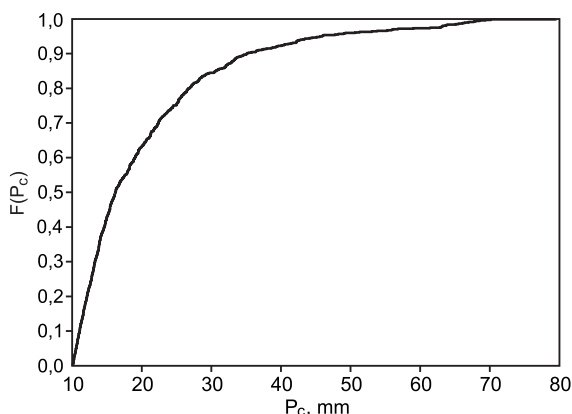
Na dendrogramach do wyrażenia bliskości analizowanych obiektów stosuje się pewną specyficzną miarę odległości. Obiekty o dużym podobieństwie dzieli mała odległość i w sposób naturalny łączą się one w większe klastry, podczas gdy duża odległość separuje mocno różniące się obiekty. Istnieje bardzo wiele definicji stosowanych miar odległości, których przegląd można znaleźć w pracy [10]. W badaniach zastosowano najpopularniejszą metrykę, nazywaną odległością euklidesową, która w przypadku dowolnych dwóch porównywanych hietogramów, opisanych przez ciąg  $p$  liczb rzeczywistych – znormalizowanych warstw opadu  $(x_1, x_2, \dots, x_p)$  oraz  $(y_1, y_2, \dots, y_p)$ , wyrażała się wzorem:

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

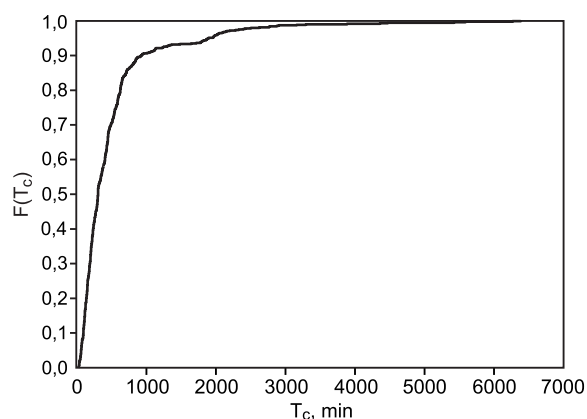
w którym  $p$  oznacza liczbę 5-minutowych przedziałów czasów opadów atmosferycznych. W celu określenia odległości między kształtującymi się skupieniami obiektów stosowano nie mniej popularną metodę pojedynczego wiązania. Metoda ta często jest też określana mianem metody najbliższego sąsiedztwa, gdyż opiera się na minimalnej odległości między obiektami różnych skupień, co oznacza, że odległość między dwoma skupieniami określona jest przez odległość między dwoma najbliższymi obiektami należącymi do tych skupień. Zgodnie z tą zasadą obiekty, jeśli są podobne, to łącząc się w ciągi, tworzą skupienia, a finalne skupienia układają się w charakterystyczne „łańcuchy”.

### Dyskusja wyników badań

Z szeregów deszczów zarejestrowanych przez 25 deszczomierzy zlokalizowanych na obszarze Warszawy wydzielono łącznie 669 opadów atmosferycznych, których skumulowane rozkłady całkowitych sum wysokości ( $P_c$ ) i całkowitych czasów ( $T_c$ ) przedstawiono odpowiednio na rysunkach 1 i 2. Suma wysokości deszczów przyjmowała wartości w zakresie od 10,01 mm do 79,48 mm, a ich średnia wartość wynosiła 20,68 mm. Całkowity czas trwania deszczów wahał się od zaledwie 25 min do nawet 6385 min, a jego średnia wartość nieco przewyższała 505 min. Jak jednak widać wyraźnie na rysunku 2, dominowały deszcze krótkotrwałe, na których skupiono całkowicie dalszą uwagę. Deszczów o czasie trwania do 420 min było łącznie 423, co stanowiło 63,2% wszystkich zdarzeń. Tylko deszcze o czasie nieprzekraczającym 7 godz. wydają się mieć



Rys. 1. Wykres skumulowanego rozkładu całkowitej sumy opadów atmosferycznych ( $P_c$ )  
Fig. 1. Cumulative distribution plot of precipitation totals ( $P_c$ )

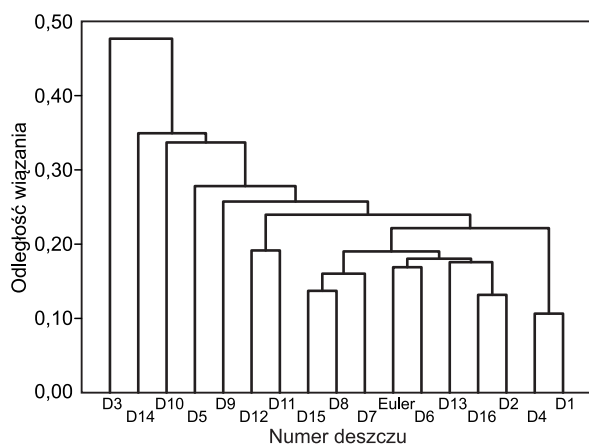


Rys. 2. Wykres skumulowanego rozkładu całkowitego czasu trwania opadów atmosferycznych ( $T_c$ )  
Fig. 2. Cumulative distribution plot of precipitation total duration time ( $T_c$ )

istotne znaczenie w funkcjonowaniu systemów odwadniania, zwłaszcza w kontekście możliwości ich przeciążania i powstawania nadpiętrzeń. Zgodnie z wynikami badań [5], w obrębie czasu trwania do 7,5 godz. mieszczą się deszcze konwekcyjne i frontalne, a więc potencjalnie najintensywniejsze opady atmosferyczne o silnie zmiennych w czasie hietogramach. W przypadku czasów dłuższych, zwłaszcza przekraczających 10,5 godz., obserwuje się natomiast deszcze niżowe o stosunkowo wyrównanych w czasie, mniejszych natężeniach chwilowych. Ponadto, co trzeba jasno podkreślić, większość z długotrwałych opadów atmosferycznych wystąpiła w półroczu zimowym, zatem było wysoce prawdopodobne, że wystąpiły one w postaci opadów śniegu, czego jednak nie można było jednoznacznie ustalić, dysponując jedynie szeregami rejestracyjnymi z deszczomierzy wagowych.

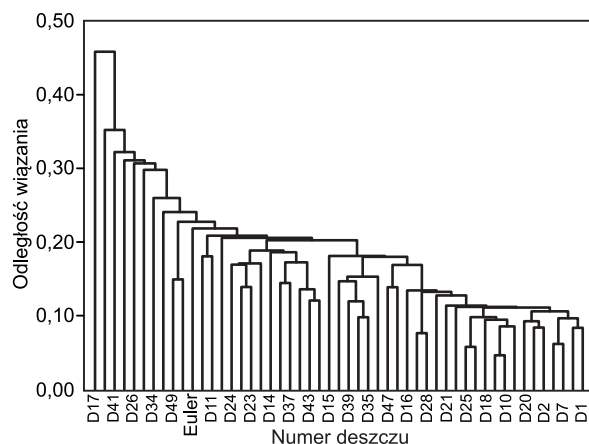
Łączna liczba 669 opadów atmosferycznych wydzielonych z 25 deszczomierzy w Warszawie z szeregów o długości niemal 114 tygodni odpowiadała liczbie 12,3 zdarzeń przypadających na pojedynczy deszczomierz i rok obserwacji. Prowadząc analogiczną analizę w przypadku szeregów pluwiograficznych z Wrocławia uzyskano częstość deszczów niemal o połowę mniejszą, równą 6,6 w ciągu roku obserwacji [11]. Rozbieżność ta była w pełni zrozumiała, gdyż zapisy deszczów dotyczyły tylko półrocza letniego. Z tych samych zapewne powodów czas trwania deszczów wydzielonych z obserwacji we Wrocławiu wahał się w węższym przedziale od 25 min do 1970 min. W szeregach pomiarowych z Warszawy znajdowały się deszcze o dłuższym (nawet trzykrotnie) czasie trwania, jednak ich genezę należy łączyć zapewne z przejściem głębokich ośrodków niżowych w półroczu zimowym.

Po podziale deszczów nawalnych na podzbiory o czasie trwania ( $T_c$ ) mieszczącym się w następujących przedziałach (wyrażonych w minutach):  $<0 \div 45>$ ,  $(45 \div 60>$ ,  $(60 \div 90>$ ,  $(90 \div 120>$ ,  $(120 \div 180>$ ,  $(180 \div 240>$ ,  $(240 \div 300>$ ,  $(300 \div 360>$  i  $(360 \div 420>$  uzyskano następujące liczebności kolejnych podzbiorów: 16, 19, 28, 50, 82, 81, 57, 48 i 42. Przykładowe dendrogramy opracowane w obrębie poszczególnych podzbiorów zaprezentowano na rysunkach 3–7, natomiast na rysunkach 8 i 9 zamieszczono odpowiednio wykresy hietogramów znormalizowanych w przypadku deszczów o najkrótszych i najdłuższych czasach trwania. Na osi pionowej wszystkich dendrogramów zaznaczono odległość wiązania obliczoną zgodnie z miarą euklidesową (1), a na osi poziomej numery kolejnych deszczów.



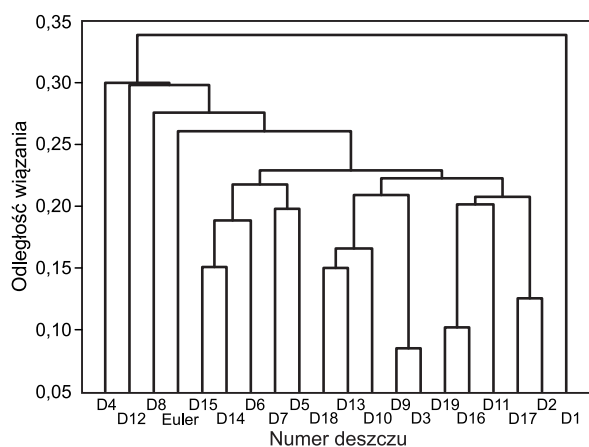
Rys. 3. Dendrogram deszczów o całkowitym czasie trwania ( $T_c$ ) do 45 min

Fig. 3. Dendrogram obtained for precipitation of total duration time ( $T_c$ ) up to 45 min



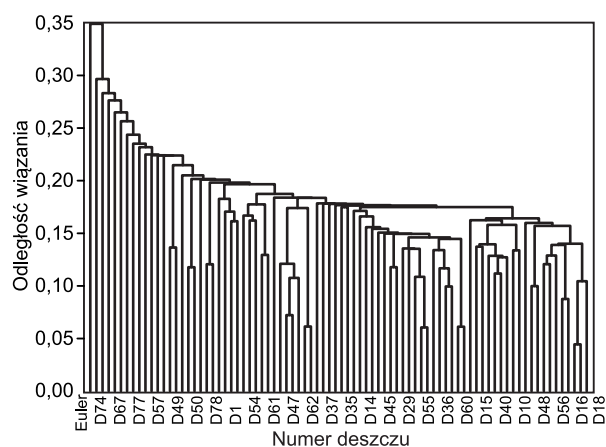
Rys. 6. Dendrogram deszczów o całkowitym czasie trwania  $T_c \in (90+120 \text{ min})$

Fig. 6. Dendrogram obtained for precipitation of total duration time  $T_c \in (90-120 \text{ min})$



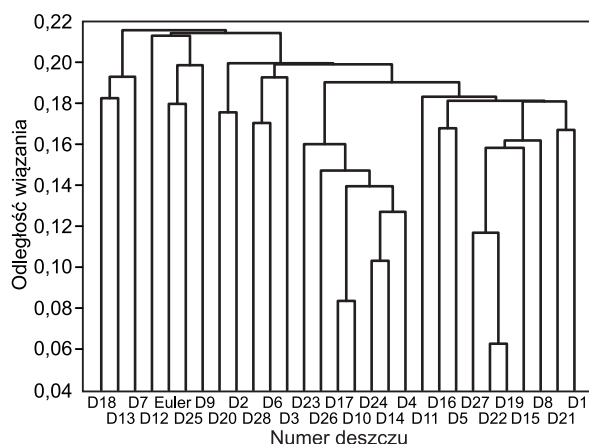
Rys. 4. Dendrogram deszczów o całkowitym czasie trwania  $T_c \in (45+60 \text{ min})$

Fig. 4. Dendrogram obtained for precipitation of total duration time  $T_c \in (45-60 \text{ min})$



Rys. 7. Dendrogram deszczów o całkowitym czasie trwania  $T_c \in (180+240 \text{ min})$

Fig. 7. Dendrogram obtained for precipitation of total duration time  $T_c \in (180-240 \text{ min})$



Rys. 5. Dendrogram deszczów o całkowitym czasie trwania  $T_c \in (60+90 \text{ min})$

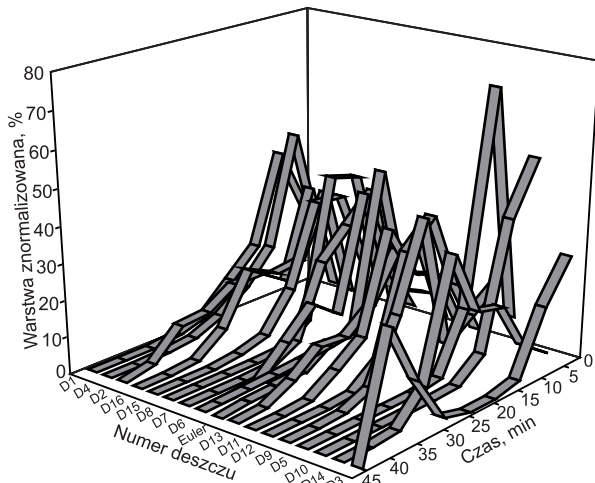
Fig. 5. Dendrogram obtained for precipitation of total duration time  $T_c \in (60-90 \text{ min})$

Wyniki analizy skupień w postaci dendrogramu (rys. 3) wskazują, że rzeczywiste deszcze różniły się wyraźnie kształtami swoich hietogramów. W strukturze otrzymanego dendrogramu trudno było zidentyfikować występowanie wyraźnych skupień. Owszem, pojawiły się deszcze

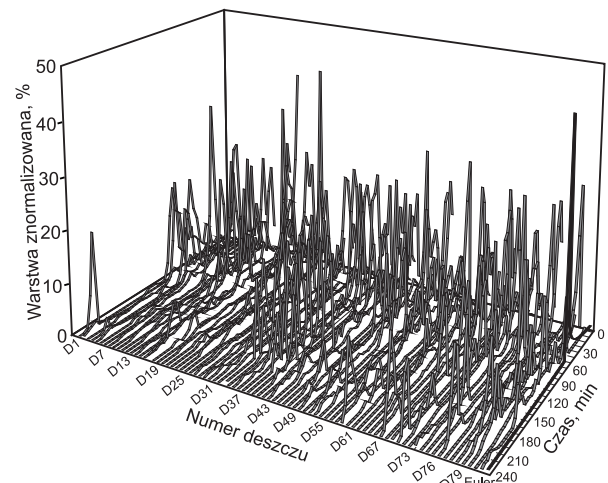
łącznie się w pary, jak np. D1 i D4 czy też D2 i D16 oraz D8 i D15, których podobieństwo wynikało z faktu, że opisywały zdarzenia z tego samego dnia zarejestrowane przez pobliskie deszczomierze. Wymienione pary deszczów, dodatkowo wraz ze zdarzeniami D13, D7 i D6 oraz deszczem modelowym Eulera (typ II), utworzyły słabo rysujące się skupienie. O słabości tego skupienia świadczyła miara połączeń w jego obrębie, która przekraczała wartość 0,22. Oczywiście miara ta była wielkością względną, lecz do pewnego stopnia można jej skalę lepiej zrozumieć, biorąc pod uwagę, że jest to pierwiastek z sumy kwadratów różnic znormalizowanych wysokości deszczów w 9 kolejnych przedziałach czasu od 0 do 45 min, a same znormalizowane warstwy opadów mieściły się w zakresie od 0 do 100% i sumowały się do 100%. Z tego punktu widzenia odległość wiązania około 22% była wartością znaczną. Jeszcze większe odległości dzieliły skupienie i zawarty w nim deszcz modelowy Euler (typ II) od pozostałych deszczów – D9, D5, D10, D14 i D3. Odległość dzieląca deszcz modelowy Euler (typ II) od skrajnego deszczu D3 wynosiła aż 48%.

Wszystkie powyższe obserwacje znajdują swoje uzasadnienie w kształtach hietogramów znormalizowanych przedstawionych na rysunku 8. Przy tworzeniu wykresu kolejność poszczególnych serii zdarzeń dostosowano do zarejestrowanej w czasie analizy sekwencji procesu





Rys. 8. Hietogramy znormalizowane deszczów o całkowitym czasie trwania ( $T_c$ ) do 45 min  
 Fig. 8. Normalized hyetographs for precipitation of total duration time ( $T_c$ ) up to 45 min



Rys. 9. Hietogramy znormalizowane deszczów o całkowitym czasie trwania  $T_c \in (180-240 \text{ min})$   
 Fig. 9. Normalized hyetographs for precipitation of total duration time  $T_c \in (180-240 \text{ min})$

aglomeracji deszczów. Stąd też można doszukiwać się pewnych podobieństw w obrębie przynajmniej lewej strony wykresu. Zestawione tam deszcze mają swoje najwyższe natężenia w początkowej fazie. Jednak apogeum natężenia chwilowego bynajmniej nie było tak wyraźne jak w przypadku deszczu modelowego Eulera (typ II), a jego pojawienie się nie zawsze miało miejsce w 15. minucie deszczu, a więc w 1/3 długości całkowitej ( $T_c$ ). Nie zawsze też była spełniona druga żelazna zasada deszczu modelowego Eulera (typ II) mówiąca, że natężenia chwilowe w początkowej fazie deszczu do jego apogeum mają zawsze natężenia większe od drugiej fazy wygasającego deszczu. Na rysunku 8 widać, że w naturze mogą wystąpić także deszcze mające apogeum w pierwszym przedziale (D10), w środkowym przedziale (D14) lub też nawet w jednym z końcowych przedziałów czasu (D3).

Obserwacje poczynione w przypadku deszczów o najkrótszym czasie trwania pozostają w pełni obowiązujące w przypadku deszczów o dłuższym czasie trwania. Na rysunkach 4–7 trudno jest mówić o aglomeracji badanych deszczów w wyraźne klastry. Poszczególne deszcze różniły się hietogramami, a odległości występujące między nimi nadal przyjmowały wartości w zakresie 0,10–0,20. Trzeba przy tym pamiętać że miary te były obliczone przy szybko wzrastającej liczbie przedziałów ( $p$ ) we wzorze (1), co przy stałej wartości sum elementów  $x_i$  i  $y_i$  (równej zawsze 100%) powinno raczej faworyzować spadek obliczanej odległości euklidesowej. Tak się jednak nie działo, gdyż czasy występowania chwilowych pików w różnych opadach nie korespondowały całkowicie ze sobą i nie pasowały do sztywnego modelu hietogramu Eulera (typ II). Co więcej, pików natężeń chwilowych mogło być nawet kilka, a nie tylko jeden w 1/3 czasów całkowitych ( $T_c$ ). Wszystko to potwierdza rysunek 9, na którym deszcz modelowy Eulera (typ II) wyraźnie odstawał od pozostałych deszczów rzeczywistych, których kształty przypominały losową sekwencję zmiennych w czasie natężeń chwilowych. Opisanie takich, zgoła przypadkowych, hietogramów jakimś deterministycznym hietogramem nie było możliwe, natomiast ich losowe wygenerowanie było już możliwe przy zastosowaniu modelu kaskad losowych [11–13].

Po prześledzeniu sekwencji dendrogramów w przypadku podzbiorów o wzrastającym czasie ( $T_c$ ) można się było nawet pokusić o uogólnienie mówiące, że wraz ze

wzrostem całkowitego czasu deszczów, deszcz modelowy Eulera (typ II) coraz bardziej oddalał się od rzeczywistości zarejestrowanych zdarzeń. W efekcie na rysunku 8 deszcz modelowy Eulera (typ II) był ostatnim ogniwem łańcucha o największej odległości równej 0,35. Podobna sytuacja została zaobserwowana w przypadku dendrogramów o najdłuższych czasach ( $T_c$ ) równych 300 min, 360 min i 420 min (których nie zamieszczono w pracy). Każe to wnioskować, że model Eulera (typ II) w sposób drastyczny odstaje od deszczów rzeczywistych o czasie trwania ( $T_c$ ) powyżej 180 min.

**Podsumowanie**

Rozwój krajowego warsztatu modelowania hydrodynamicznego miejskich systemów odwadniania jest uzależniony od dostępu do danych opisujących opady atmosferyczne. W sytuacji braku dostępu do wieloletnich rejestracji lokalnych deszczów istnieje wśród naukowców i inżynierów wyraźna tendencja do stosowania prostego rozwiązania w postaci oparcia procesu modelowania na łatwych do sporządzenia hietogramach syntetycznych, w tym przede wszystkim na niemieckim wzorcu deszczu modelowego Eulera (typ II). Z tego względu autorzy niniejszej pracy podjęli próbę weryfikacji zasadności takiego podejścia w warunkach polskich, wykorzystując do tego celu wyniki badań przeprowadzonych na poligonie największej aglomeracji miejskiej kraju, wyposażonej w najbardziej rozbudowaną i nowoczesną sieć deszczomierzową. Zadanie to, stanowiące pretekst do podjęcia badań, stało się także punktem wyjścia do próby rozwiązania istotniejszego zagadnienia, jakim jest stworzenie bardziej nowoczesnego i zarazem obiektywnego warsztatu do analizy zmienności czasowej opadów atmosferycznych w Polsce. Potrzeba taka wydaje się oczywista z uwagi na bardzo zróżnicowany i często bardzo uproszczony i budzący wątpliwości warsztat nielicznych krajowych opracowań dotyczących hietogramów wzorcowych. Wyniki kompleksowych badań przeprowadzonych na zbiorze 423 deszczów o najkrótszym czasie trwania do 420 min, uprzednio wyselekcjonowanych z ogólnej populacji wstępnie zidentyfikowanych 669 opadów atmosferycznych, pozwoliły na sformułowanie następujących uogólnień:

♦ Analiza skupieŃ moĝe być skutecznym i obiektywnym narzēdzieniem słuĝącym do oceny zróżnicowania kształtów hietogramów znormalizowanych opadów atmosferycznych w wydzielonych podzbiórach deszczów o rōżnych zakresach całkowitego czasu trwania ( $T_c$ ). Otrzymywane w jej wyniku dendrogramy daję podstawę zarówno do wyławiania w jakiejś mierze podobnych hietogramów, jak i do szybkiej identyfikacji szczególnie nietypowych rozkładów deszczów w czasie.

♦ Deszcze na obszarze pola opadowego w Warszawie, nawet w obrębie podzbiórów o zbliżonym czasie trwania ( $T_c$ ), zwykle silnie różniły się swoimi hietogramami znormalizowanymi. Nieliczne przypadki podobnych wzajemnie opadów atmosferycznych zdarzały się bardzo rzadko i dotyczyły głównie deszczów o najkrótszym czasie trwania, rejestrowanych na pobliskich deszczomierzach i praktycznie w tych samych terminach. Nie stwierdzono przypadków identycznie zgodnych hietogramów deszczów.

♦ Hietogram deszczu modelowego Eulera (typ II) nie był spójny z kształtem hietogramów deszczów rzeczywistych. W przypadku deszczów o czasie ( $T_c$ ) większym od 180 min stosowanie deszczu modelowego Eulera (typ II) wydaje się całkowicie pozbawione sensu, gdyż silnie odstawał on od wszystkich różniących się od siebie wzorców deszczów rzeczywiście zarejestrowanych.

♦ Należy zdecydowanie odchodzić od koncepcji uproszczonego podejścia do opisu zmienności czasowej deszczów w postaci statycznego deterministycznego wzorca deszczu modelowego. Chcąc przybliżyć modelowanie miejskich systemów odwadniania do warunków bliższych rzeczywistym trzeba uwzględnić na ich wejściu wyraźnie losową naturę deszczów, którą moĝna juĝ dziś osobno modelować z wykorzystaniem multiplikatywnych kaskad losowych. Należy podejmować kroki zmierzające do zmiany zapisów starych wytycznych technicznych w zakresie modelowania kanalizacji, które ukształtowały się jeszcze w czasie, kiedy nie były znane generatory deszczów syntetycznych, a ograniczenia mocy obliczeniowych komputerów zmuszały do ograniczania symulacji systemów odwadniania do pojedynczych opadów atmosferycznych.

*Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego pt. „Przestrzenno-czasowa analiza i modelowanie miejskiego pola opadowego”, sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji nr 2011/03/B/ST10/06338. Dane opadowe do badaŃ pozyskano dzięki uprzejmości MPWiK w m.st. Warszawie SA.*

## LITERATURA

1. T.D. FLETCHER, H. ANDRIEU, P. HAMEL: Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources* 2013, Vol. 51, pp. 261–279.
2. T.G. SCHMITT: Komentarz do ATV-A118P: Hydrauliczne wymiarowanie systemów odwadniających. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2000.
3. A. GRUSZECKA: Pluviogram syntetyczny jako podstawa określania hydrogramu przepływu ścieków deszczowych. *Ochrona Środowiska* 1984, vol. 6, nr 3–4, ss. 21–24.
4. M. BARSZCZ: Znormalizowane rozkłady warstwy opadu w czasie trwania deszczu na obszarze zlewni doświadczalnej w Warszawie. *Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie* 2012, (VII–IX), t. 12, z. 3(39), ss. 27–28.
5. E. KUPCZYK, R. SULIGOWSKI: Statystyczny opis struktury czasowej opadów atmosferycznych jako elementu wejścia do modeli hydrologicznych. W: U. SOCZYŃSKA [red.]: *Predykcja opadów i wezbraŃ o zadanym okresie powtarzalności*. Wydawnictwo UW, Warszawa 1997, ss. 17–82.
6. D.E. RUPP, P. LICZNAR, W. ADAMOWSKI, M. LEŚNIEWSKI: Multiplicative cascade models for fine spatial downscaling of rainfall: Parameterization with rain gauge data. *Hydrology and Earth System Sciences* 2012, Vol. 16, pp. 671–684.
7. B. JAKUBIAK, P. LICZNAR, S.P. MALINOWSKI: Rainfall estimates from radar vs. raingauge measurements. Warsaw case study. *Environment Protection Engineering* 2014, Vol. 40, No. 2, pp. 162–170.
8. P. LICZNAR: Wymiarowanie zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych na podstawie syntetycznych szeregów czasowych opadów deszczu (Stormwater reservoir dimensioning based on synthetic rainfall time series). *Ochrona Środowiska* 2013, vol. 35, nr 2, ss. 27–32.
9. W. BŁASZCZYK, M. ROMAN, H. STAMATELLO: *Kanalizacja t.1. Arkady*, Warszawa 1974.
10. A. STANISZ: *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny. Tom 3. Analizy wielowymiarowe*. StatSoft Polska, Kraków 2007.
11. P. LICZNAR: *Generatory syntetycznych szeregów opadów do modelowania sieci kanalizacji deszczowych i ogólnospławnych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław 2009.
12. P. LICZNAR, J. ŁOMOTOWSKI, D.E. RUPP: Random cascade driver rainfall disaggregation for urban hydrology: An evaluation of six models and a new generator. *Atmospheric Research* 2011, No. 99, pp. 563–578.
13. P. LICZNAR, T.G. SCHMITT, D.E. RUPP: Distributions of microcanonical cascade weights of rainfall at small timescales. *Acta Geophysica* 2011, Vol. 59, No. 5, pp. 1013–1043.

**Licznar, P., Szelaĝ, B. Temporal Variability Analysis of Atmospheric Precipitation in Warsaw (Poland).** *Ochrona Środowiska* 2014, Vol. 36, No. 3, pp. 23–28.

**Abstract:** Synthetic precipitation hyetographs are often used as input data for hydrodynamic modeling of urban drainage systems. Euler (type II) model rainfall is nowadays a common synthetic hyetograph used by engineers in Poland. Adoption of the German model results mostly from lack of local studies on rainfall temporal variability. Therefore, the aim of the study was to analyze temporal variability of atmospheric precipitation over Warsaw (Poland). Special attention was given to development of proper and objective methodology of precipitation hyetograph temporal variability analysis. The research was based on rainfall time series recorded by 25 modern electronic gauges deployed over the city area. A total of 669 precipitation events was identified. Studies were focused on the set of 423 most intense precipi-

tation events of total duration time not exceeding 420 min, further divided into 9 subsets depending on precipitation total duration times. Shapes of normalized precipitation hyetographs were compared by means of cluster analysis. Dendrograms resulting from aggregation procedure displayed clearly wide range of precipitation temporal variability that cannot be adequately described by deterministic pattern of a single synthetic hyetograph. Rather, it should be only handled stochastically by means of random rainfall generators. For precipitation events exceeding 180 min, the Euler (type II) model rainfall shapes significantly deviated from the recorded precipitation hyetographs. In conclusion, it is strongly advised to shift from urban drainage modeling based on model rainfalls only to more advanced probabilistic modeling based on random rainfall generators.

**Keywords:** Precipitation hyetograph, Euler (type II) model rainfall, cluster analysis, modeling, drainage system.