

## MODELOWANIE ODPLYWU WÓD OPADOWYCH Z DACHÓW ZIELONYCH

Ewa Burszta-Adamiak<sup>1</sup>, Wiesław Fiałkiewicz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, e-mail: ewa.burszta-adamiak@up.wroc.pl; fialkiewicz@iis.ar.wroc.pl

### STRESZCZENIE

Modelowanie odpływów z dachów zielonych, obok bezpośrednich pomiarów, jest cennym źródłem informacji o efektywności działania tego typu konstrukcji w aspekcie hydrologicznym. Wśród stosowanych modeli największe zastosowanie mają modele numeryczne. Pozwalają one na dokonanie oceny wpływu dachów zielonych na zmniejszenie i spowolnienie spływu, redukcję szczytowej fali odpływu oraz wielkość retencji. W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań wielkości odpływów z dachów zielonych otrzymane przy zastosowaniu modelu GARDENIA. Analizę przeprowadzono dla wybranych zdarzeń opadowych, zarejestrowanych w ramach prowadzonych badań, na dachach zielonych, wykonanych w skali półtechnicznej. Otrzymane wyniki badań wskazują na zadowalające dopasowanie danych obserwowanych z symulowanymi.

**Słowa kluczowe:** dachy zielone, model GARDENIA, odpływ, retencja.

## MODELING OF STORM WATER RUNOFF FROM GREEN ROOFS

### ABSTRACT

Apart from direct measurements, modelling of runoff from green roofs is valuable source of information about effectiveness of this type of structure from hydrological point of view. Among different type of models, the most frequently used are numerical models. They allow to assess the impact of green roofs on decrease and attenuation of runoff, reduction of peak runoff and value of water retention. This paper presents preliminary results of research on computing the rate of runoff from green roofs using GARDENIA model. The analysis has been carried out for selected rainfall events registered during measuring campaign on pilot-scale green roofs. Obtained results are promising and show good fit between observed and simulated runoff.

**Keywords:** green roofs, GARDENIA model, runoff, retention

### WSTĘP

Dachy zielone zaliczane są do systemów typu LID (*Low Impact Development*), które dzięki infiltracji, retencji i ewapotranspiracji umożliwiają zagospodarowanie wód opadowych w sposób zrównoważony. Sporządzanie opracowań koncepcyjnych/

projektów zagospodarowania wód opadowych na danym terenie, podejmowanie trafnych decyzji ze strony służb komunalnych oraz władz lokalnych, uwzględniających wykorzystanie dachów zielonych, wymaga posiadania wiarygodnych informacji na temat ich funkcjonowania.

Głównym źródłem informacji o efektywności działania dachów zielonych, w aspekcie hydrologicznym, są wyniki badań prowadzonych w skali laboratoryjnej, półtechnicznej i technicznej (na zrealizowanych obiektach). Pomiarów tego typu są wykonywane w wielu ośrodkach naukowo-badawczych zagranicą [Bengtsson i Villarreal 2005; Palla i in. 2011] oraz od kilku lat również w Polsce [Szajda-Birnfel'd i in. 2012; Burszta-Adamiak 2010, 2012]. Wyniki badań wykazują dużą efektywność zielonych dachów, w zmniejszaniu objętości odpływu (retencji), spowolnieniu spływu wód opadowych oraz redukcji szczytowej fali odpływu. Wyniki badań często różnią się między sobą, gdyż na wielkość odpływu ma wpływ wiele czynników związanych z lokalnym klimatem, opadami i samą konstrukcją dachu.

Alternatywnym sposobem pozyskiwania praktycznych informacji na temat wielkości odpływów z dachów zielonych jest zastosowanie modeli matematycznych [Zimmer i Geiger 1997; Kowalska i Drozdal 2004], modeli empirycznych [Carson i in. 2013] oraz modeli numerycznych (programów komputerowych). Wykorzystanie programów komputerowych jest zalecane przez wytyczną FLL [FLL 2008], najważniejszą wytyczną do planowania, projektowania i utrzymywania dachów zielonych. Dostępność do tego typu programów jest coraz większa, co umożliwia ich szerokie zastosowanie w praktyce. Próby modelowania odpływu z dachów zielonych zostały już przeprowadzone m.in. w programie HYDRUS-1D [Hilten i in., 2008], WWHM (*Western Washington Hydrology Model*) [Beyerlein i in. 2005] oraz w rekomendowanym przez US EPA (Amerykańską Agencję Ochrony Środowiska) programie SWMM [Palla 2011, Stec i Hypiak 2011; Burszta-Adamiak i Mrowiec 2013].

W literaturze można znaleźć także doniesienia na temat zastosowania programów komputerowych do obliczeń symulacyjnych. Analizy tego typu mają za zadanie ocenę wpływu dachów zielonych na funkcjonowanie systemów odwodnień w miastach. Symulacje przeprowadzone dla jednej ze zlewni w Genui (Włochy) z wykorzystaniem programu EPA SWMM [Palla i in. 2008] wykazały, że wprowadzenie dachów zielonych na 10% budynków pozwala na redukcję maksymalnego odpływu ze zlewni o 5%, a zazielenienie 100% budynków zmniejszy odpływ o 51%. Levellius (2005) zakładając wykonanie zielonych dachów na 85% budynków (ok. 14% całkowitej powierzchni z 140 ha analizowanego obszaru) w Lund (Szwecja) dowiódł, że zazielenienie takiej powierzchni zlewni może przyczynić się do redukcji odpływu na poziomie budynku o 22–58%, zaś w skali zlewni o 4–6%. W prezentowanych wynikach symulacji nie bierze się zazwyczaj pod uwagę możliwości budynku do przeniesienia dodatkowych obciążeń wynikających z wykonania na nim założonego dachu zielonego. Stąd w rzeczywistości, ze względu na ograniczenia wytrzymałościowych niektórych budynków, liczba możliwych do zazielenienia dachów najprawdopodobniej byłaby mniejsza. Wariant zazielenienia istniejących dachów w 100% jest mało prawdopodobny.

W grupie programów symulacyjnych znajdują się także modele numeryczne opracowane przez firmy zajmujące się projektowaniem i wykonywaniem dachów zielonych. Przykładem tego typu programów jest RWS (niem. *RegenWasserSpeicher*) firmy Optigrün [Mann i Szajda 2008]. W programach „firmowych” analiza wielkości odpływu oraz właściwości retencyjnych zielonych dachów ograniczana jest najczęściej do układów konstrukcyjnych, oferowanych przez twórcę programu. Wymóg wprowadzenia do programu lokalnych danych opadowych obejmujących kilkuletni okres pomiarowy (z min. 5–10 lat), w warunkach polskich jest trudny do spełnienia, z uwagi na brak kompletnych danych o opadach z tak długiego okresu dla każdej lokalizacji.

Z wymienionych programów komputerowych największe zastosowanie w praktyce ma program SWMM (*Storm Water Management*). Powszechność jego wykorzystania wynika z dostępności do programu. Jest on programem typu *public domain* (ogólnodostępnym). Najnowsza wersja programu EPA SWMM została poszerzona o możliwość modelowania hydrologicznego urządzeń typu LID (obiektów bioretencji, rowów infiltracyjnych, zbiorników do gromadzenia wód opadowych, nawierzchni porowatych oraz rowów i niecek trawiastych). Dachy zielone w programie, deklarywane są, jako obiekty bioretencji. Podjęte w badaniach Burszty-Adamiak i Mrowca (2013) próby modelowania odpływów z dachów zielonych, objętych monitoringiem, z zastosowaniem programu SWMM5 z modułem LID (wersja 5.0.022) nie dały satysfakcjonującego dopasowania danych pomiarowych do symulowanych. W zdecydowanej większości przypadków, dla wybranego okresu badawczego, szczytowe natężenia odpływu otrzymane podczas modelowania były kilkukrotnie większe od rzeczywiście rejestrowanych. Powodem powyższych rozbieżności najprawdopodobniej był przyjęty w programie schemat obliczeniowy, opierający się wyłącznie na bilansie objętości wód. Dodatkowo model hydrologiczny spływu w programie jest bardzo uproszczony. Nie uwzględnia spływu powierzchniowego a także takich parametrów jak: spadek dachu, współczynnik szorstkości powierzchni oraz rodzaj roślinności.

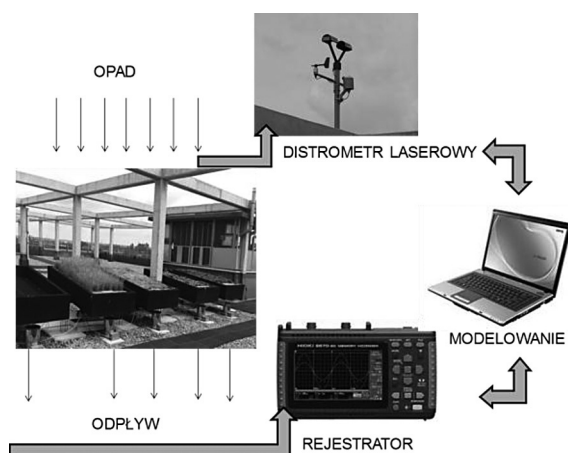
Wspomniane ograniczenia, napotymane przy modelowaniu odpływów z dachów zielonych z wykorzystaniem wyżej wspomnianych programów, sprawiają, że potrzeba poszukiwania modeli, które ze względu na swoją prostotę i dobre odwzorowanie danych eksperymentalnych, będą miały zastosowanie praktyczne, wciąż jest aktualna. Tym bardziej, że narzędzia do modelowania pozwalają na określanie wielkości odpływu z dachów zielonych, znacznie szybciej oraz zazwyczaj przy niższych kosztach niż badania terenowe. Nie znaczy to jednak, że pomiary na dachach zielonych nie powinny być prowadzone. Wręcz przeciwnie, są one niezbędne, gdyż na ich podstawie przeprowadzana jest kalibracja i weryfikacja modeli.

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań wielkości odpływów z dachów zielonych otrzymane przy zastosowaniu modelu GARDENIA. Analizę przeprowadzono dla wybranych zdarzeń opadowych, zarejestrowanych w ramach prowadzonych badań, na dachach zielonych, wykonanych w skali póltechnicznej.

## MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Do modelowania wielkości odpływów z dachów zielonych wykorzystano dane pomiarowe pochodzące ze stanowisk badawczych zlokalizowanych na dachu budynku Centrum Naukowo-Dydaktycznego (CND) Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Stanowiska były wykonane w formie kuwet o wymiarach zewnętrznych: 2,40 m (dł.), 1,20 (szer.) oraz 0,35 m (wys.). Na czterech stanowiskach (DZ-1÷DZ-4) znajdowały się modele zielonych dachów typu ekstensywnego, wykonane jako układy wielowarstwowe z zastosowaniem materiałów powszechnie używanych w praktyce inżynierskiej. Piąta kuweta (oznaczona w artykule, jako DR) pełniła rolę stanowiska kontrolnego (referencyjnego).

Pomiary natężenia i wysokości opadów oraz odpływów ze stanowisk były prowadzone w sposób ciągły. Do przechwytywania odpływów posłużyły mierniki Naja 0404, służące do wagowego pomiaru spływów, które były podłączone do rejestratora Memory Hilogger 8430-20 firmy HIOKI. Dane o opadach pochodziły z distrometru laserowego Parsivel, produkcji firmy OTT MESSTECHNIK GmbH & Co. KG, zlokalizowanego w niedalekiej odległości od stanowisk badawczych. Distrometr współpracował z datalogerem rejestrującym dane co 30 sekund. System rejestracji opadów obsługiwało specjalistyczne oprogramowanie ASDO. Tak zarejestrowane dane o opadzie i odpływie wymagały obróbki, w celu przygotowania ich do wymaganego formatu danych wejściowych do modelu. System pomiaru i rejestracji danych ze stanowisk badawczych przedstawiono na rysunku 1. Wstępną weryfikację zastosowanego modelu oparto na danych o opadach i odpływach, zarejestrowanych w październiku 2009 r. Opady z tego okresu charakteryzowały się zróżnicowaną wysokością i intensywnością (tab. 1). Październik, na tle pozostałych miesięcy w analizowanym roku, był okresem mokrym, z przewagą dni z opadem (77.4% dni).



Rys. 1. System pomiaru i rejestracji danych ze stanowisk badawczych (opracowanie własne)

**Tabela 1.** Podstawowe dane o opadach w okresie od 1.10.2009 do 22.10.2009

Data	Wysokość opadu, mm	Średnia intensywność opadu, mm/h	Czas trwania opadu, h	Okres bezopadowy, h	Odptyw z DR, %	Odptyw z DZ-1, %	Odptyw z DZ-2, %	Odptyw z DZ-3, %	Odptyw z DZ-4, %
2009-10-01	4.5	0.19	2.3	36.6	65.9	14.9	5.09	18.8	12.9
2009-10-02	0.9	0.04	1.5	18.0	24.4	0	0	0	0
2009-10-04	0.8	0.01	17.8	41.6	10	0	0	0	0
2009-10-05/06	4.8	0.11	7.1	46.3	78.3	15.5	8.86	24.5	12.3
2009-10-07	6.8	0.29	2.5	8.5	77.9	60.9	31.4	30.2	10.3
2009-10-10	7.3	0.29	5.6	54.5	91.8	20.1	18.7	15.5	11.8
2009-10-11	1.3	0.06	2.8	4.7	55.6	21.4	22.6	9.0	16.5
2009-10-12	6.8	0.27	11.5	10.7	85.4	6.3	8.4	17.3	11.7
2009-10-13	1.5	0.06	1.7	6.8	63.3	15.3	17.0	5.4	1.4
2009-10-14/15	22.8	0.48	32.3	12.9	85.5	60.3	41.1	55.4	51.3
2009-10-17	1.4	b.d.	3.0	7.0	59	18.1	28.1	12.2	0
2009-10-18	7.9	0.36	8.8	19.4	69.8	41.8	31.3	47.9	8.9
2009-10-20	1.7	0.07	4.1	39.7	63.8	16.0	12.1	18.4	0
2009-10-22	0.6	0.52	1.20	55.9	38.1	0	15.4	0	0

b.d. – brak danych.

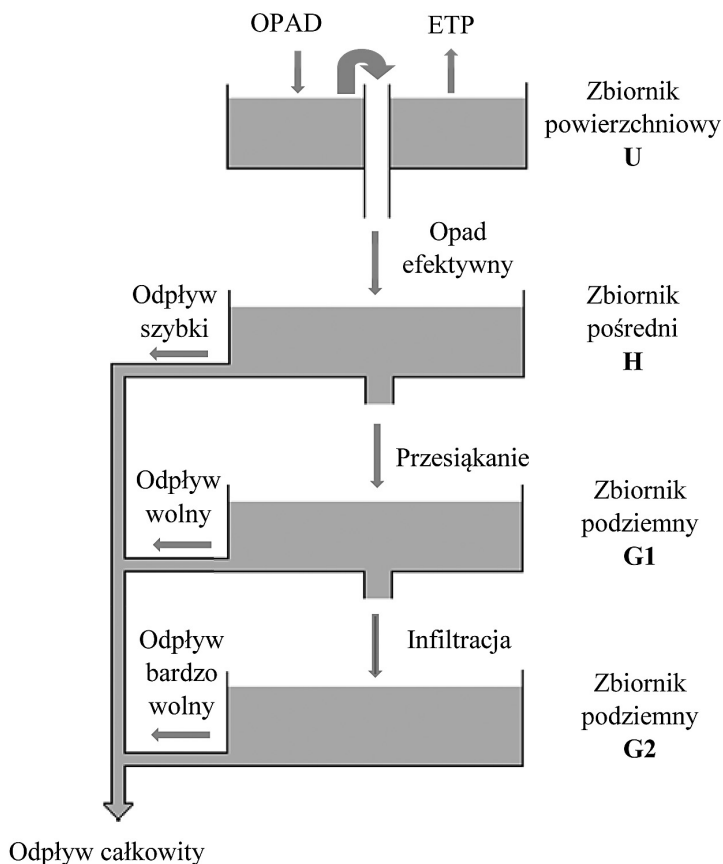
Do wykonania obliczeń odpływu wód opadowych z dachów zielonych wykorzystano model GARDENIA [Thiery, 2003]. Model ten opisuje cykl obiegu wody w zlewni. Jest to model globalny służący do symulacji zależności pomiędzy odpływem ze zlewni lub poziomem zwierciadła wody podziemnej, a wielkością zasilania w postaci opadu atmosferycznego. Funkcjonowanie modelu opiera się na przepływie wody pomiędzy trzema lub czterema zbiornikami ustawionymi kaskadowo, które reprezentują różne fazy przepływu wody w zlewni (rys. 2).

Poszczególne zbiorniki przedstawiają:

- strefę kilku centymetrów gleby, gdzie odbywa się ewapotranspiracja,
- strefę pośrednią, która generuje szybki odpływ (powierzchniowy i podpowierzchniowy),
- jedną lub dwie strefy, gdzie odbywa się odpływ opóźniony (podziemny).

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Wydaje się, że odpływ z dachu zielonego powinien być analogiczny do odpływu wody ze zlewni, gdzie wykładniczy zanik przepływu w rzece przypomina opróżnianie zbiornika. Dlatego też odpływ z dachu zielonego postanowiono zweryfikować za pomocą szeregu kaskadowo połączonych zbiorników, których opróżnianie opisuje



Rys. 2. Schemat koncepcyjny modelu GARDENIA

funkcja nieliniowa. Dzięki temu złożony system, jakim jest dach zielony, został opisany za pomocą prostych wzajemnie połączonych układów.

Funkcjonowanie modelu GARDENIA z układem czterech zbiorników (rys. 3) polega na napełnianiu zbiornika powierzchniowego U wodą pochodzącą z opadu. Zbiornik U jest opróżniany w wyniku ewapotranspiracji lub przelewania się nadmiaru wody do zbiornika pośredniego H, po przekroczeniu maksymalnej pojemności zbiornika U (parametr RUMAX). Zbiornik H jest napełniany wodą przelewającą się ze zbiornika U, a następnie opróżniany poprzez przepływ do zbiornika podziemnego G1 (parametr THG) symulujący prześiakiwanie oraz odpływ opóźniony opisujący spływ powierzchniowy (parametr RUIPER). Zbiornik G1 reprezentujący formację wodonośną jest z kolei opróżniany w wyniku powolnego wypływu (parametr TG1) i drenażu (parametr TG12) zasilającego drugi zbiornik podziemny G2 reprezentujący najniższą część formacji wodonośnej, z którego woda wypływa bardzo powoli i jest kontrolowana za pomocą parametru TG2. Opróżnianie wszystkich zbiorników opisane jest funkcjami wykładniczymi.

Do symulacji odpływu z analizowanych dachów zielonych wykorzystany został układ dwóch zbiorników, co pozwoliło uwzględnić zarówno szybką jak i wolną fazę odpływu. Parametrami fizycznymi modelu, które należało wyznaczyć dla każdego dachu zielonego, były: RUMAX, RUIPER, THG i TG1. Danymi wejściowymi modelu była seria pomiarowa wysokości opadu uzyskana na stanowisku badawczym oraz wartość ewapotranspiracji potencjalnej, którą dla analizowanego okresu przyjęto, jako wartość stałą wynoszącą 3.8 mm/d [Gromaire i in. 2013]. Parametry fizyczne modelu (tab. 2) zostały uzyskane w wyniku automatycznej kalibracji wykonanej w programie GARDENIA. Model wykorzystuje nieliniowy algorytm optymalizacji oparty na metodzie Rosenbrocka (1960), który zmienia optymalizowane parametry do momentu, kiedy zostanie osiągnięte najlepsze dopasowanie pomiędzy obserwowanymi i symulowanymi wartościami odpływu. Krok czasowy, z jakim wykonywane były obliczenia wyniósł 5 min.

**Tabela 2.** Parametry fizyczne modelu

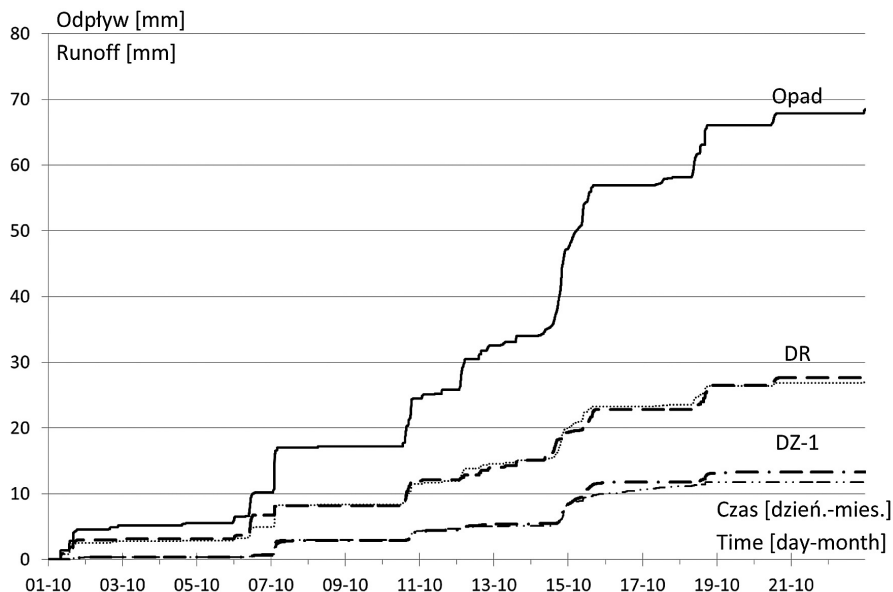
Parametr	DR	DZ-1	DZ-2	DZ-3	DZ-4
RUMAX (mm) – pojemność zbiornika U lub ilość wody dostępna dla ewapotranspiracji	250	3	5	3,4	62
RUIPER (mm) – poziom w zbiorniku H, dla którego natężenie odpływu jest równe przesiąkaniu	1000	2	1,7	2,3	9990
THG (miesiące) – czas połowicznego napełnienia zbiornika G1	0,1	1	0,1	1,5	6,5
TG1 (miesiące) – czas połowicznego opróżniania zbiornika G1	0,1	6	11	4,5	0,1

Przykładowe wyniki badań zaprezentowano na rysunkach 3 i 4. Uzyskane wyniki, przedstawione na wykresach skumulowanych, wykazują, że przyjęty model prawidłowo odwzorowuje funkcjonowanie dachów zielonych w dłuższym okresie, pomimo założenia, że w każdym kroku czasowym ewapotranspiracja potencjalna jest stała.

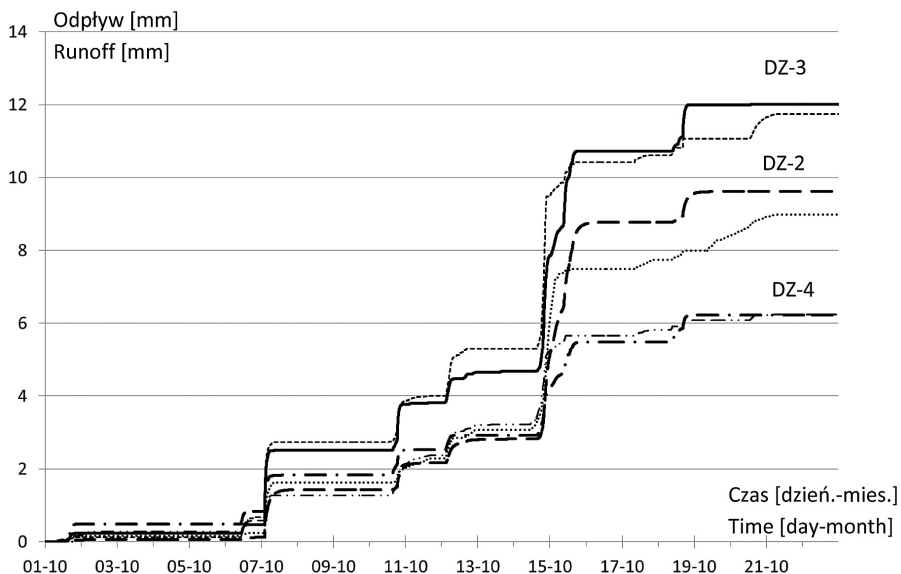
Bliższa analiza pojedynczych zjawisk opadowych wykazuje, że krótkotrwałe opady (rys. 5) są przez model lepiej odwzorowywane niż opady długotrwałe (rys. 6).

## PODSUMOWANIE

Program GARDENIA zastosowany do symulacji odpływu z zielonych dachów daje zadawalające wyniki zarówno w odniesieniu do dłuższego okresu czasu jak i do pojedynczego opadu. W większości przypadków zjawiska opadowe zmieniają się jednak bardzo dynamicznie, dlatego też uzasadnione jest prowadzenie pomiarów natężenia opadów oraz odpływu z dachów zielonych z małym krokiem czasowym. Powinny jednak temu towarzyszyć, równolegle prowadzone, pomiary podstawowych parametrów meteorologicznych pozwalających wyznaczyć zmienność ewapotranspiracji w ciągu doby.

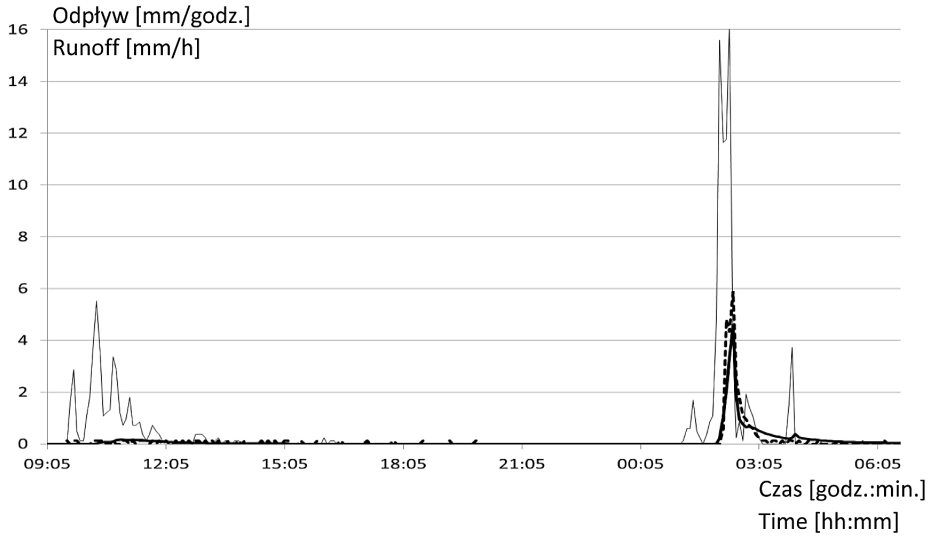


**Rys. 3.** Skumulowane wartości opadu (linia ciągła), odpływu zmierzonego (linia przerywana) i symulowanego (linia kropkowana) dla dachu referencyjnego DR oraz odpływu zmierzonego (linia kreska kropka) i symulowanego (linia kreska dwie kropki) dla dachu zielonego DZ-1

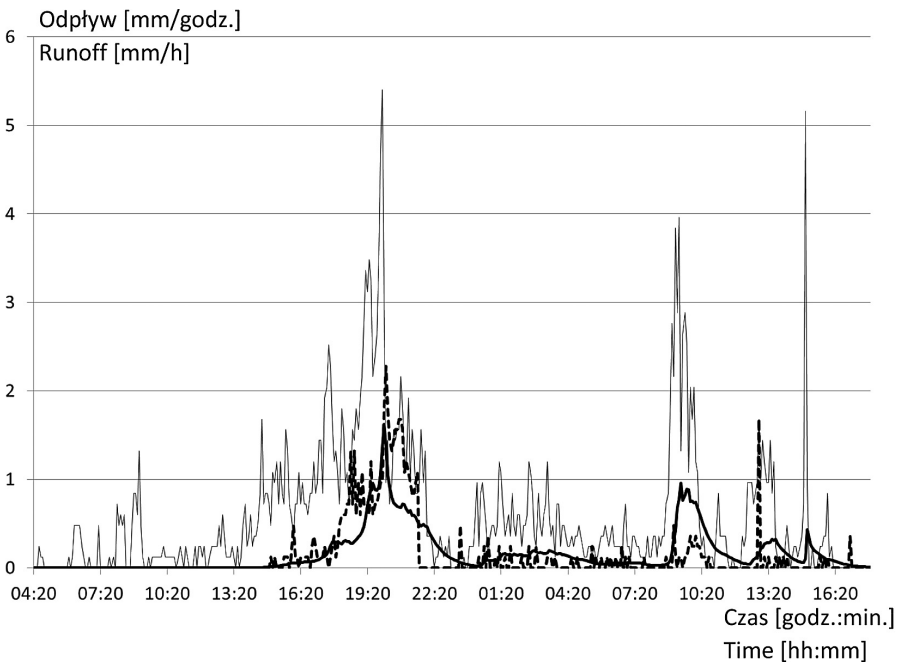


**Rys. 4.** Skumulowane odpływy zmierzonego (linia ciągła) i symulowanego (linia kreskowa krótka) dla dachu zielonego DZ-3, odpływu zmierzonego (linia kreskowa długa) i symulowanego (linia kropkowana) dla dachu zielonego DZ-2 oraz odpływu zmierzonego (linia kreska kropka) i symulowanego (linia kreska dwie kropki) dla dachu zielonego DZ-4





**Rys. 5.** Szeregi czasowe pomierzonych opadów (ciągła linia cienka), odpływu (linia przerywana) oraz modelowanego odpływu (ciągła linia szeroka) dla zielonego dachu DZ-3 w okresie od 06/10/2009 09:05 do 07/10/2009 04:40



**Rys. 6.** Szeregi czasowe pomierzonych opadów (ciągła linia cienka), odpływu (linia przerywana) oraz modelowanego odpływu (ciągła linia szeroka) dla zielonego dachu DZ-1 w okresie od 14/10/2009 4:20 do 15/10/2009 18:00

Dla uzyskania lepszych wyników symulacji odpływu, która wykonywana jest z pięciominutowym krokiem czasowym, konieczne jest, uwzględnienie w modelu, co najmniej godzinnych wartości ewapotranspiracji, której największe wartości występują w godzinach południowych a w nocy mogą być nawet bliskie zera.

## PIŚMIENNICTWO

1. Bengtsson L, Villarreal E.L. 2005. Response of a Sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering*. 25, 1–7.
2. Beyerlein D., Brascher J., White S., 2005. Green roof hydrology. [W:] *Materiały AWRA Annual conference*. November 7-10, Seattle, Washington ([http://www.biaaw.com/documents/LID/BMPS/green\\_roof\\_hydrology.pdf](http://www.biaaw.com/documents/LID/BMPS/green_roof_hydrology.pdf))
3. Burszta-Adamiak E. 2010. Retencja wód opadowych na dachach zielonych w warunkach wrocławskich. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* nr 3, 21–24
4. Burszta-Adamiak E. 2012. Analysis of stormwater retention on green roofs. *Archives of Environmental Protection*, Vol. 38, no. 4, 3–13.
5. Burszta-Adamiak E., Mrowiec M., 2013. Modelling of green roofs hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Science & Technology*, 68(1), 36–42.
6. Carson T. B., Marasco D.E., Culligan P. J., McGillis W.J., 2013. Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. *Environmental Research Letters* 8, 1–13.
7. FLL, 2008. Wytyczne niemieckiego Towarzystwa Naukowo-Badawczego Krajobrazu i Rolnictwa tzw. wytyczna FLL (niem. *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.*)
8. Gromaire M.C., Ramier D., Seidl M., Berthier E., Saad M., de Gouvello B., 2013. Impact of extensive green roofs on the quantity and the quality of runoff – first results of a test bench in the Paris region. *Proceedings NOVATECH 2013, 8th International Conference: Planning and Technologies for Sustainable Urban Water Management*, Lyon, France.
9. Hilten R.N., Lawrence T.M., Tollner E.W., 2008. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *Journal of Hydrology* 358, 288–293.
10. Kowalska W., Drożdżal E. 2004. Utilization of green roof for storing rainfall water in urban areas. [W:] *Selected Problem of Water Engineering*, Kraków, Poland 9-11 October 2003. Antony Cemagref France Ed., 56–74.
11. Levallius J., 2005. Green roof on municipal buildings in Lund – Modeling potential environmental benefit, Master of Science Thesis, Lund University, Lund, Sweden, 1–60 (<http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOid=1963098&fileOid=1963099>).
12. Mann G., Szajda E., 2008. Dachy zielone, jako element ekologicznego gospodarowania wodą opadową. *Monografia pod redakcją Janusza Łomotowskiego „Problemy zagospodarowania wód opadowych”*. Wrocław, 37–48.
13. Palla A., Lanza L.G., Barbera P.L., 2008. A green roof experimental site in the Mediterranean climate. [W:] *Materiały 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.

14. Palla A., Sansalone J.J., Gnecco I., Lanza L.G., 2011. Storm water infiltration in a monitored green roof for hydrologic restoration. *Water Science and Technology*. 64 (3), 766–773.
15. Rosenbrock H.H., 1960. An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function. *The Computer Journal* 3(3), 175–184.
16. Thiéry D., 2003. Logiciel GARDÉNIA version 6.0. Guide d'utilisation. Rapport public BRGM n° RP52832. (<http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-52832-FR>).
17. Stec A., Hypiak J. 2011. Modelowanie odpływu wód deszczowych z dachów zielonych w programie Storm Water Management Model. Instal nr 2, 38–42.
18. Szajda-Birnfeld E., Pływaczyk A., Skarżyński D., 2012. Zielone dachy. Zrównoważona gospodarka wodna na terenach zurbanizowanych. Wyd. Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.
19. Zimmer U., Geiger W.F., 1997. Model for the design of multilayered infiltration systems. *Water Science and Technology*, 36(8-9), 301–306.