

Dobór optymalnej objętości zbiornika retencyjnego przy użyciu cyfrowego kalkulatora wykorzystania wód opadowych in situ

The optimal volume of a retention tank estimation using rainwater harvesting digital calculator

PAULINA NAPIERAJ, EWA BURSZTA-ADAMIAK, PIOTR CZARNOCKI, PAWEŁ LICZNAR

DOI 10.36119/15.2024.4.4

Wzrastająca liczba inwestycji w zakresie retencjonowania i wykorzystywania wód opadowych in situ, będąca odpowiedzią na postępujące zmiany klimatu oraz ekstremalne zjawiska pogodowe, w tym przede wszystkim suszę i nawalne opady deszczu, a także znaczącą podaż bezzwrotnych środków finansowych z funduszy zarówno krajowych jak i zagranicznych na tego typu działania wiąże się z potrzebą znajomości metod i narzędzi do wiarygodnego projektowania i doboru optymalnej objętości zbiorników retencyjnych (magazynujących).

W Polsce dotychczas brak jest ogólnie przyjętych i uznanych norm i wytycznych dotyczących zagospodarowania wód opadowych in situ. Szacowanie objętości zbiorników metodami uproszczonymi prowadzi najczęściej do dużych rozbieżności w otrzymywanych wynikach. W artykule przedstawiono dobór optymalnej objętości zbiorników retencyjnych z wykorzystaniem nowo powstałego cyfrowego narzędzia jakim jest „Kalkulator wykorzystania wód opadowych in situ” na platformie WaterFolder, uwzględniający w obliczeniach zarówno uwarunkowania lokalizacyjne jak i warunki opadowe dla danego regionu. Obliczenia demonstracyjne przeprowadzono dla 18 studiów przypadku (obejmujących trzy najczęściej praktykowane warianty wykorzystania wody opadowej, trzy lokalizacje oraz trzy wielkości powierzchni spływu). Wyniki badań wykazały, że na dobór optymalnej objętości zbiornika wpływa nie tylko wielkość powierzchni spływu i zapotrzebowania na wodę na przyjęte cele gospodarcze, ale także w znacznym stopniu lokalizacja, tzn. lokalne warunki opadowe w rejonie planowanej inwestycji. Korzystanie z tego typu narzędzi cyfrowych może usprawnić proces projektowania i ułatwić inwestorom podejmowanie decyzji w wyborze optymalnej objętości zbiornika magazynującego wody opadowe w instalacjach do ich wykorzystania in situ.

Słowa kluczowe: zbiornik retencyjny, wykorzystanie wód opadowych, retencja, kalkulator, optymalna objętość zbiornika

The increasing number of investments in the retention and use of rainwater in situ, in response to the ongoing climate change and extreme weather events, including primarily drought and heavy rainfall, as well as the significant supply of non-refundable funding from both domestic and foreign funds for such activities, is associated with the need for knowledge of methods and tools for reliable design and selection of the optimal volume of retention tanks.

To date, there is a lack of standards and guidelines for in situ rainwater management in Poland. Using simplified methods to estimate tank capacity often results in significant discrepancies. This paper presents the selection of optimal retention tank volumes using a newly developed digital tool, the rainwater harvesting calculator on the WaterFolder platform, which takes into account both site conditions and precipitation conditions for a given region in the calculations. Demonstration calculations were carried out for 18 case studies (covering the three most common rainwater harvesting options, three locations and three runoff area sizes). The results showed that the selection of the optimal tank capacity is influenced not only by the size of the runoff area and the water demand for the chosen economic purposes, but also to a significant extent by the location, i.e., the local rainfall conditions in the area of the planned project. The use of such digital tools can streamline the design process and make it easier for developers to decide on the optimal capacity of a rainwater retention tank for on-site use.

Keywords: retention tank, rainwater harvesting, retention, calculator, optimum tank capacity

mgr inż. Paulina Napieraj, <https://orcid.org/0009-0001-7340-4757> – Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Bydgoska, Miejskie Wodociągi i Kanalizacja w Bydgoszczy sp. z o.o.

dr hab. inż. Ewa Burszta-Adamiak, prof. UPWr, <https://orcid.org/0000-0003-3755-2047> – Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

mgr Piotr Czarnocki – Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Departament Funduszy Europejskich, Warszawa

prof. dr hab. inż. Paweł Licznar, <https://orcid.org/0000-0002-2559-5296> – Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, Warszawa. Adres do korespondencji / Corresponding Author: ewa.burszta-adamiak@upwr.edu.pl

Wstęp

Dynamiczna urbanizacja obszarów miejskich prowadząca do zwiększenia ilości i szybkości odpływu oraz konsekwencje zmian klimatu przyczyniają się do narastania wyzwań związanych z gospodarowaniem wodami opadowymi [20]. Z tych powodów oraz ze względu na dostępność w Polsce znaczących bezwrotnych środków na dofinansowanie przedsięwzięć w obszarze zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi zarówno z funduszy zagranicznych jak i krajowych, coraz częściej podejmowane są działania, mające na celu zatrzymanie na miejscu odpływu wód opadowych i roztopowych z powierzchni utwardzonych. Warto wskazać na fakt, że w wielu gminach w Polsce wprowadza się obowiązek lub zalecenia zatrzymywania wody deszczowej w granicach działki (nieruchomości, inwestycji), a niedawno pojawiły się propozycje zmian legislacyjnych, wprowadzające opłaty za brak retencjonowania wód opadowych na działkach o powierzchni uszczelnienia przekraczających wskazany próg (projekt ustawy z 12 sierpnia 2020 r. o inwestycjach w zakresie przeciwdziałania skutkom suszy (UD101)) – nie jest wykluczone, że prace dotyczące stosownych rozwiązań legislacyjnych w tym zakresie zostaną wznowione. Obowiązek zatrzymania wody opadowej jest na przykład wprowadzany przez gminy w prawie lokalnym, w tym poprzez wymagania konieczne do spełnienia warunków technicznych na przyłączenie do sieci odwadniającej dla planowanej inwestycji lub dla projektu gminnego systemu odwadniającego lub też na budowę urządzeń wodnych. Ponadto, niektóre gminy w Polsce wprowadziły opłaty za odprowadzenie wód opadowych do systemu kanalizacji deszczowej, co ma stymulować działania mieszkańców lub też innych adresatów tych opłat do zatrzymania i retencji wód opadowych na terenie posesji. Działania te wpisują się w szersze zmiany w ustawie Prawo wodne uchwalone w dniu 20 lipca 2017 r., które wyłączyły wody opadowe z zakresu definicji ścieków, nadając im tym samym status cennego zasobu, co było tylko potwierdzeniem prawnym oczywistego faktu.

Na przedsięwzięcia dotyczące retencji wód opadowych alokowane zostały w Polsce znaczące środki finansowe, pochodzące zarówno z funduszy Unii Europejskiej (między innymi w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2014-2020 oraz Programu Fundusze

Europejskie na Infrastrukturę, Klimat, Środowisko 2021-2027 i Programu Fundusze Europejskie dla Polski Wschodniej 2021-2027), jak i z Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz Norweskiego Mechanizmu Finansowego, a także z programów krajowych. W kontekście środków krajowych na uwagę zasługuje Program Priorytetowy Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej „Moja Woda”, który doczekał się już trzeciej edycji. Celem tego Programu jest ochrona zasobów wody poprzez zwiększenie retencji na terenie posesji przy budynkach jednorodzinnych oraz wykorzystywanie zgromadzonej wody opadowej i roztopowej, w tym dzięki rozwojowi zielono-niebieskiej infrastruktury. Rząd przeznaczył na dwie dotychczasowe edycje programu 236 mln zł., co umożliwiło zgromadzenie i wykorzystanie na terenie prywatnych nieruchomości około 2,5 miliona m³ wód opadowych rocznie. Dzięki trzeciej edycji programu przewiduje się, że ta ilość wzrośnie o dodatkowe 1,2 miliona m³ deszczówki rocznie. Finalnym celem programu jest dofinansowanie 67,6 tysiąca przydomowych systemów retencyjnych, w których zostanie zagospodarowane 3,38 miliona m³ wody opadowej i roztopowej każdego roku.

Retencja wód z wykorzystaniem stosunkowo prostych rozwiązań, takich jak zbiorniki podziemne i naziemne, to jeden z pożądaných kierunków dla zrównoważonego zarządzania wodami opadowymi in situ. Zasadniczym zadaniem podczas projektowania instalacji do wykorzystania wód opadowych jest prawidłowe określenie objętości zbiornika magazynującego. W Polsce dotychczas brak jest powszechnie przyjętych i uznanych oraz precyzyjnych norm i wytycznych dotyczących projektowania i eksploatacji systemów zagospodarowania wód opadowych. Wprawdzie poszczególne gminy wprowadzają wytyczne dla projektantów dotyczące zagospodarowania i zatrzymania wody opadowej na terenie planowanej inwestycji, które mogą stać się wymogiem w przypadku, gdy od ich spełnienia zależy wydanie warunków technicznych lub stosownych pozwoleń na realizację inwestycji – niemniej jednak przedmiotowe wytyczne lub wymogi często bazują na metodach uproszczonych lub dostosowanych do lokalnych warunków, przez co nie mogą zostać wykorzystane w innych lokalizacjach. Częściowym uzupełnieniem tych braków może być korzystanie z doświadczeń z pobliskich Niemiec i opracowanych tam norm z serii DIN. Jednak szacowanie objętości zbiornika magazynujące-

go metodą uproszczoną zgodnie z normą DIN 1989-1 [5], nie uwzględnia rozkładu opadów (zwłaszcza opadów deszczy w miesiącach letnich) oraz wielkości powierzchni przeznaczanej do podlewania, co może prowadzić do mało wiarygodnych wyników szczególnie w przypadku występowania skrajnych rozbieżności pomiędzy powierzchnią dachu i powierzchnią nawadnianą. Z tych względów nadal poszukiwane są metody umożliwiające dobór optymalnej objętości zbiornika, które będą bazowały na aktualnych danych opadowych i wiarygodnych bilansach wodnych, a przy tym będą przystępne w obsłudze dla użytkownika.

Celem artykułu jest przedstawienie funkcjonalności cyfrowego i jednocześnie ogólnodostępnego narzędzia jakim jest „Kalkulator wykorzystania wód opadowych in situ” na platformie WaterFolder dla doboru i optymalizacji objętości zbiornika retencyjnego, z którego wody opadowe mogą być przeznaczone na różne potrzeby. Analizy przeprowadzono na wybranych studiach przypadku dla trzech polskich miast tj. Wrocławia, Bydgoszczy i Gdańska z uwzględnieniem różnych wielkości powierzchni spływu oraz dla najczęściej praktykowanych celów gospodarczych, wykorzystujących wody opadowe.

Systemy do retencjonowania i wykorzystywania wód opadowych w praktyce

Systemy zbierania wody opadowej (ang. *Rainwater Harvesting Systems*) wyposażane w różnej wielkości zbiorniki retencyjne (nazywane też zbiornikami magazynującymi) znajdują swoje zastosowanie w budynkach prywatnych celem wykorzystania zgromadzonej wody do podlewania ogrodu, spłukiwania ustępów czy robienia prania [7]. Retencjonowana w zbiornikach woda opadowa może zastąpić wodę wodociągową również na szerszą skalę w budynkach i obiektach użyteczności publicznej, w których objętość gromadzonej wody opadowej jest znacznie większa, niż w przypadku obiektów mieszkalnych ze względu na większą powierzchnię spływu (najczęściej dachu). Przykładem są zbiorniki retencyjne znajdujące się na stadionach sportowych w Gdańsku, Warszawie oraz Wrocławiu. Woda opadowa w tych obiektach wykorzystywana jest do spłukiwania toalet oraz częściowego podlewania murawy boiska lub terenów zieleni znajdującej się w obrębie stadionu [3]. Innym dobrym przykładem wdrożenia systemów retencjonujących wody opadowe jest

praktyka zastosowana w Hotelu Gołębiowskim w Karpaczu, w którym wody opadowe są wykorzystywane jako uzupełnienie wód w basenach (po uprzednim oczyszczeniu), do celów przeciwpożarowych oraz do nawadniania zieleni wokół hotelu [8]. Wody opadowe znajdują również zastosowanie w takich obiektach jak stacje benzynowe, gdzie można pozyskać je z dużej powierzchni dachu i wykorzystać do spłukiwania ustępów bądź spłukiwania nawierzchni betonowych [15]. Z kolei na obszarach miejskich z powodzeniem zgromadzona w zbiornikach retencyjnych woda opadowa może być wykorzystywana do mycia chodników oraz ulic. Wiele miast wdraża również programy wsparcia finansowego na zakup instalacji do gromadzenia wody opadowej oraz wprowadza projekty zachęcające mieszkańców do zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi.

Projektowanie zbiorników retencyjnych (magazynujących) wody opadowe celem ich wykorzystania in situ

Kluczowym zadaniem podczas projektowania systemów retencyjnych i wykorzystujących wody opadowe in situ jest dobranie optymalnej pojemności zbiornika. Na dobór pojemności zbiornika składa się kilka czynników, takich jak uwarunkowania lokalizacyjne (wielkość powierzchni spływu, wielkość powierzchni zazielenionej, liczba użytkowników, itp.) oraz warunki meteorologiczne, w tym wysokość, intensywność i czas trwania opadów, a także długość trwania okresów bezopadowych. Niedoszacowanie pojemności zbiornika skutkuje budową systemów, które nie są w stanie zapewnić wystarczającego, niezawodnego źródła wody. Większa pojemność zbiorników pozwala magazynować większą ilość wód opadowych oraz zmniejsza prawdopodobieństwo wystąpienia przepełnień i oddawania nadmiaru wód opadowych do sieci kanalizacyjnej [4]. Warto jednak zwrócić uwagę, że przewymiarowanie zbiornika retencyjnego zwiększa koszty inwestycyjne ponoszone przy ograniczonych korzyściach i powoduje potencjalne pogorszenie jakości magazynowanej w zbiorniku wody.

W Polsce, w obliczu braku uznanych i powszechnie przyjętych wytycznych i norm do projektowania zbiorników retencyjnych, istnieje niedostatek wiedzy dotyczącej odpowiedniego projektowania takich systemów, w tym przede wszystkim doboru optymalnej ich pojemności. Opisane

przez Królikowską i Królikowskiego [9] metody przybliżonego szacowania pojemności zbiornika na wodę (np. jako 5% średniego rocznego opadu, 1 m³ zbiornika na 1 osobę, korzystając z instalacji, czy 1 m³ pojemności zbiornika na 25 m² dachu, z którego zbierana jest woda opadowa) nadają się do zastosowania tylko do bardzo małych obiektów (np. budynków jednorodzinnych), a nawet w tak małej skali dają rozbieżne, a nawet sprzeczne wyniki. Jako alternatywę w publikacji [9] podaje się szczegółowy bilans dopływu wody do zbiornika (w oparciu o opady dobowe) i dobowe zapotrzebowanie na wodę. Zaleca się go w przypadku wymiarowania instalacji w dużych obiektach, gdyż bilans taki pozwala na optymalny dobór wielkości zbiornika z uwzględnieniem specyfiki opadów w danym rejonie. Można domniemywać, że szczegółowy bilans dopływu wody do zbiornika jest w zasadzie odpowiednikiem symulacji komputerowych (niem. *Differenziertes Verfahren*) zgodnie z normą DIN 1989-1 [5]. Według normy DIN 1989-1, która w Niemczech, w kraju o dłuższej praktyce w projektowaniu i wdrażaniu zbiorników retencyjnych jest normą obowiązującą, symulacje komputerowe są najlepszym sposobem do wyznaczenia optymalnej pojemności zbiorników do wykorzystania wód opadowych in situ w przypadku dużych instalacji, zwłaszcza o indywidualnej strukturze zużycia wody. Niestety w normie [5] z 2002 roku ani w jej zaktualizowanym wydaniu [6] z 2022 nie jest zamieszczony algorytm przeprowadzania takich obliczeń. Ogólnie zaznacza się, że obliczenia powinny być przeprowadzone na podstawie bilansowania dopływów wód opadowych na podstawie zweryfikowanych sum dobowych opadów oraz rozborów wody, a więc oszacowanych lub pomierzonych dobowych rozborów wody. Podkreśla się także, że obliczenia bilansowe powinny być prowadzone na podstawie co najmniej 5 – 10 letnich szeregów opadowych, a wiarygodność uzyskiwanych wyników wzrasta wraz z wydłużeniem okresu symulacyjnego.

W Polsce doświadczenia w obszarze symulacji komputerowych systemów do wykorzystania wód są bardzo skromne. Możliwość takich symulacji została zademonstrowana w przypadku instalacji dualnej wykorzystującej wody deszczowe do spłukiwania toalet przez Sucharaba i Iwanek [19]. Niemniej symulacje były możliwe dzięki zastosowaniu programu SWMM 5.1 i opracowaniu w nim modelu instalacji, a same modelowanie przeprowadzono na podstawie pojedynczego roku hydrolo-

gicznego. Szersze obliczenia bilansowe efektywności systemu gospodarczego wykorzystania wód opadowych zostały przeprowadzone przez Słystia [18]. Opierały się one na 10-letnich danych opadowych zarejestrowanych na stacji Rzeszów-Jasionka, a ich celem było określenie parametru efektywności, określającego oszczędność wody pochodzącej z systemu wodociągowego, wynikającej z zastąpienia jej wodą opadową. Efektywność ta była analizowana dla różnych założonych pojemności zbiornika magazynującego i przyjętych poziomów zapotrzebowania dobowego na wodę do spłukiwania toalet. Wyniki tych badań wykazały, że istnieje pewna krytyczna pojemność zbiornika retencyjnego, dla której oszczędność wody osiąga wartość maksymalną, a zwiększenie pojemności zbiornika powyżej tej wartości nie skutkuje wzrostem efektywności systemu, powodując natomiast nieuzasadniony wzrost kosztów inwestycyjnych. Ponadto zostało stwierdzone, że wspomniana pojemność krytyczna zależy przede wszystkim od powierzchni dachu oraz zapotrzebowania na wodę [18]. Ponownie jednak ograniczeniem przytoczonych studiów było skoncentrowanie się na wykorzystaniu wód opadowych tylko do spłukiwania toalet i do pojedynczej lokalizacji. Wśród prac naukowych można znaleźć także i takie, w których autorzy rozwijali różne techniki i modele służące do projektowania, optymalizacji i oceny wydajności zbiorników retencyjnych, w tym m.in., nieparametryczne techniki oparte na macierzy prawdopodobieństwa [2] oraz nieliniowe algorytmy metaheurystyczne [16]. Jednak większość z nich, pomimo umożliwienia otrzymania wiarygodnych wyników, jest zbyt skomplikowana do zastosowania w praktyce w projektowaniu optymalnej pojemności zbiornika retencyjnego, z którego wody opadowe mogłyby być wykorzystywane do zaspokojenia założonych celów.

Metodyka badań

Założenia obliczeniowe „Kalkulatora wykorzystania wód opadowych in situ”

„Kalkulator wykorzystania wód opadowych in situ” został opublikowany w 2023 roku i jest dostępny na platformie cyfrowej WaterFolder (www.waterfolder.com). Dane opadowe niezbędne do przeprowadzenia symulacji z użyciem kalkulatora pochodzą z cyfrowej bazy projektu Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów PANDa, tj. z sieci 100 stacji w Polsce z 30 lat obserwacji (najczęściej z wielolecia 1986-2015) [10]. Bilansowanie zasobów

wodnych jest prowadzone tylko w przypadku opadów ciekłych (występujących w okresach miesięcy o dodatnich temperaturach – od kwietnia do października). Takie założenie ma swoje uzasadnienie, gdyż w okresach zimowych część opadów śniegu może zalegać przez dłuższy czas na pości dachowej i trudno jest określić w sposób wiarygodny jaka część tego opadu dostanie się do zbiornika retencyjnego, a jaka część ulegnie ewapotranspiracji. Ponadto w okresie tym wody pochodzącej z opadów nie wykorzystuje się do podlewania ogrodów lub zieleni. Założenie to jest również spójne z ograniczeniami cyfrowej bazy danych projektu PANDa, która w przypadku wielu lat opierała się na zdigitalizowanych rejestracjach z pluwiografów, a więc rejestracji opadów pochodzących tylko z okresów miesięcy o dodatnich temperaturach.

Dopływ wody do zbiornika w określonym czasie obliczany jest jako iloczyn powierzchni dachu (rzutu poziomego dachu) A oraz opadu efektywnego P_E .

$$V = A \cdot P_E \quad (1)$$

Bilansowanie dopływów i rozborów wód opadowych przyjęto w skali czasowej 1 doby, zgodnie z rekomendacjami normy DIN 1989-1 [5]. W tym przypadku opad efektywny był ustalany dla każdego dnia osobno na podstawie modelu SCS-CN [12], zgodnie z zależnością podaną poniżej:

$$P_{Ei} = \begin{cases} 0 & \text{jeśli } P_i - 0,2 \cdot s \leq 0 \\ \frac{(P_i - 0,2 \cdot S)^2}{P_i + 0,8 \cdot S} & \text{jeśli } P_i - 0,2 \cdot s > 0 \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

P_{Ei} – dobowy opad efektywny dla i -tego okresu, np. dnia [mm];

P_i – suma dobowa opadu dla i -tego dnia [mm];

S – potencjalna retencja [mm].

Metoda SCS-CN została opracowana w USA przez United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service [12]. Jest to prosta i zweryfikowana metoda, opierająca się na pojedynczym parametrze CN, który może teoretycznie zmieniać się w zakresie od 1 do 100. W praktyce metoda ta jest zaimplementowana np. w programie SWMM 5.1 i była wykorzystywana np. w badaniach Suchoraba i Iwanek [19].

Wartość potencjalnej retencji dachu S (w rzeczywistości stanowiącej straty wody opadowej, wynikające np. z parowania, jej przesiąkania) obliczano z równania (3) dla przyjętej uprzednio wartości parametru CN:

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

Zakres definiowania w kalkulatorze potencjalnych sposobów zagospodarowania wód opadowych obejmuje użycie wód opadowych do następujących celów gospodarczych: podlewanie ogrodu, pranie, splukiwanie toalet oraz prac porządkowych w obrębie budynku i jego otoczenia, np. do zmywania schodów, elewacji, itp. Przyjęto, że wszystkie wymienione użycia wody mogą mieć dla danego obiektu charakter fakultatywny, a łączne zapotrzebowanie na wodę jest superpozycją wybranych użyci.

Dobowe zapotrzebowanie na wody opadowe wykorzystywane do ww. celów (poza podlewaniem ogrodu) przyjęto na podstawie liczby użytkowników (np. mieszkańców budynku), przyjmując normy rocznego zapotrzebowania, wynoszące 10, 6 i 1 m³/osobę odpowiednio do splukiwania ustępów, prania i jako woda gospodarcza [13]. Wspomniane normy oznaczają dobowe zapotrzebowanie na wodę do splukiwania toalet na poziomie około 27 dm³/osobę, do prania na poziomie około 16 dm³/osobę i jako wody gospodarczej około 3 dm³/osobę. Dane te są spójne, bądź co najmniej porównywalne z danymi dotyczącymi struktury zużycia wody w gospodarstwach domowych, gdzie stwierdza się, że w przeliczeniu na dzień każdy Polak/Polka zużywa ok. 92 litry wody, a z tego 30%, 15% i 6% pożytkujemy odpowiednio na splukiwanie toalety, pranie i sprzątanie [11]. Zapotrzebowanie na wodę opadową do splukiwania toalet na poziomie około 27 dm³/osobę w ciągu doby jest również bliskie wartości normowej wskazywanej w niemieckiej normie DIN 1989-1 (24 dm³/osobę na dzień).

W przypadku wody do podlewania ogrodu (zieleni) obliczenia są odnoszone do deklarowanej powierzchni nawadniania. Celem urealnienia szacowania ilości wody niezbędnej do podlewania uwzględniono częstotliwość tej operacji (rozumianej jako, co ile dni podlewany jest ogród) i okres jej trwania, czyli wybierane przez użytkownika miesiące. W kalkulatorze dodatkowo zaproponowano przyjęcie trzech poziomów intensywności podlewania, tj. niskiej (2,5 dm³/m²), średniej (5,0 dm³/m²) oraz wysokiej (7,5 dm³/m²). Przyjęte progi obejmują zakres wartości intensywności podlewania zalecanych przez firmy specjalizujące się w wykonywaniu i utrzymywaniu trawników. Ponadto przyjęte progi intensywności podlewania są zbliżone do wysokości dobowego parowania

w Polsce. W miesiącach letnich w Polsce [1], szacowanego na poziomie około 3 mm (3,0 dm³/m²).

Bilansowanie retencji wód opadowych w zbiorniku magazynującym

W ramach obliczeń przeprowadzany jest bilans retencji wód opadowych w zbiorniku. Dla każdego dnia o indeksie (i) obliczana jest Retencja(i) zgodnie z zależnością (4). Poprzez Retencję rozumie się objętość wody w m³ jaka znajduje się w zbiorniku w poszczególnych dniach.

$$\begin{aligned} \text{Retencja}(i) = \\ \text{Retencja}(i-1) + \text{Dopływ}(i) - \text{Zc}(i) \end{aligned} \quad (4)$$

Zgodnie z powyższym równaniem Retencja w konkretnym dniu (i) to Retencja w dniu poprzednim ($i-1$) zwiększona o Dopływ w konkretnym dniu (i) i pomniejszona o Zapotrzebowanie całkowite (Rozbiór całkowity) Zc w tym dniu (i).

Rozwiązanie równania bilansowego odbywa się w oparciu o dwa warunki logiczne, zapisane zależnościami (5 ÷ 10).

$$\text{jeśli } \text{Retencja}(i) > V_{zb}, \text{ to:} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \text{Strata}(i) = \text{Retencja}(i) - V_{zb}; \\ \text{Retencja}(i) = V_{zb}; \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{w przeciwnym przypadku:} \\ \{\text{Strata}(i) = 0\}. \quad (7)$$

Zależności (5 ÷ 7) oznaczają, że jeśli Retencja(i) z równania (4) przekracza objętość zbiornika V_{zb} , to woda przelewa się i pojawia się Strata(i), a po przelaniu się zbiornik jest pełen, więc Retencja(i) równa się V_{zb} . W przeciwnym razie nie dochodzi do strat wód opadowych w dniu (i), czyli Strata(i) równa się zero.

Warunek logiczny nr 2 sprawdzany jest jak poniżej:

$$\text{jeśli } \text{Retencja}(i) < 0, \text{ to:} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \text{Niedobor}(i) = - \text{Retencja}(i); \\ \text{Retencja}(i) = 0; \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{w przeciwnym przypadku:} \\ \{\text{Niedobor}(i) = 0\}. \quad (10)$$

Zależności (8 ÷ 10) wykazują, że jeśli Retencja(i) z równania (8) jest ujemna, to Retencja(i) po zmianie znaku odpowiada Niedoborowi wody deszczowej w dniu (i), a rzeczywista Retencja(i) wynosi zero. W przeciwnym razie nie pojawia się niedobór wód opadowych w dniu (i), czyli Niedobor(i) równa się zero.

Jak łatwo zauważyć sprawdzenie warunku logicznego nr 1 (równania 5 ÷ 7)

wymaga a priori znajomości objętości zbiornika V_{zb} . Aby rozwiązać ten problem w kalkulatorze obliczenia są prowadzone dla szeregu założonych objętości zbiorników V_{zb} . Obliczenia przeprowadza się dla 1000 założonych objętości od objętości $0,001 \cdot V_{max}$ do V_{max} (gdzie V_{max} równa się sumie średniej wartości rozbioru Z_c i trzykrotnej wartości maksymalnego dopływu wód opadowych).

Po ustaleniu w każdej z 1000 iteracji konkretnej objętości zbiornika V_{zb} , obliczenia bilansowe z warunkami logicznymi (równania 5÷10) są przeprowadzane dla wszystkich dni z dostępnych szeregów opadowych. Na końcowym etapie analiz w każdej z 1000 iteracji obliczane są sumy całkowite i średnie roczne wartości *Retencji*, *Strat* i *Niedoborów* (równania 11÷16):

$$Retencja_{tot}(V_{zb}) = \sum_{i=1}^{i=l.dni} Retencja(i), \quad (11)$$

$$Strata_{tot}(V_{zb}) = \sum_{i=1}^{i=l.dni} Strata(i); \quad (12)$$

$$Niedobor_{tot}(V_{zb}) = \sum_{i=1}^{i=l.dni} Niedobor(i); \quad (13)$$

$$\bar{S}_{Retencja}(V_{zb}) = \frac{Retencja_{tot}(V_{zb})}{liczba\ lat}; \quad (14)$$

$$\bar{S}_{Strata}(V_{zb}) = \frac{Strata_{tot}(V_{zb})}{liczba\ lat}; \quad (15)$$

$$\bar{S}_{Niedobor}(V_{zb}) = \frac{Niedobor_{tot}(V_{zb})}{liczba\ lat}. \quad (16)$$

Opracowany kalkulator oparty o przedstawiony powyżej algorytm został po raz pierwszy opracowany i wdrożony pilotażowo dla Bydgoszczy. Stanowił on element uzupełniający realizowanego projektu adaptacji do zmian klimatu miejskiego systemu zagospodarowania wód opadowych i został zamieszczony na stronie internetowej MWiK w Bydgoszczy. Doświadczenia zdobyte na tym etapie pozwoliły na udoskonalenie narzędzia i stworzenie ogólnopolskiej wersji kalkulatora, który został opublikowany na powszechnie dostępnej platformie projektowej www.waterfolder.com. Obliczenia w kalkulatorze noszącym nazwę „Wykorzystanie wód opadowych in situ” odbywają się w trzech prostych krokach:

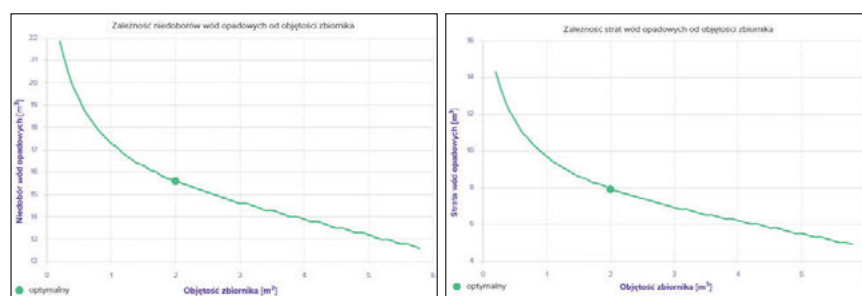
Krok 1: Dane o inwestycji, tj. nazwa oraz geolokalizacja (z możliwością wybrania konkretnego miejsca na mapie);

Krok 2: Wybór parametrów: Cel/e gospodarczy/e wykorzystania wód opadowych, powierzchnia dachu, rodzaj pokrycia dachu i w zależności od wybranego celu pozostałe dane, mające wpływ na wielkość zbiornika, np. powierzchnia

ogrodu, częstotliwość i intensywność podlewania, okres realizacji wybranego celu/ów, liczba osób w gospodarstwie;

Krok 3: Wyniki symulacji: Optymalna objętość zbiornika, średnia wysokość opadu w okresie symulacji, wysokość opadu efektywnego oraz parametry opisujące efektywność dobranego zbiornika, tj. oszczędność wody (retencja), niedobór (objętość wody wodociągowej, którą należy użyć, aby pokryć zapotrzebowanie wody na dany cel) oraz strata wody (rozumiana jako przelew ze zbiornika).

Optymalna objętość zbiornika jest ustalana w kalkulatorze na podstawie wykresów strat/niedoborów wody opadowej w porównaniu z objętością zbiornika V_{zb} , takich jak te przedstawione na rys. 1.



Rys.1
Wykresy zależności: a) niedoborów i b) strat wód opadowych od objętości zbiornika
Fig.1 Graphs of the dependence of: a) shortages and b) rainwater losses on reservoir volume

Charakterystyka studium przypadku

W obliczeniach demonstracyjnych kalkulatora uwzględniono trzy realne (najczęściej praktykowane) warianty wykorzystania wody opadowej (W1 – podlewanie ogrodu, W2 – splukiwanie ustępów oraz W3 – podlewanie ogrodu i splukiwanie ustępów). Analizy przeprowadzono dla trzech różnych lokalizacji (Wrocław (W), Bydgoszcz (B) i Gdańsk (G)). Założone powierzchnie dachu (spływu) w każdej lokalizacji wynoszą 100, 150 i 200 m². Dla porównania wyników pomiędzy lokalizacjami przyjęto stałe dane wejściowe tj.: powierzchnia ogrodu (300 m²), intensywność nawadniania (2,5l/m²), okres nawadniania (kwiecień – wrzesień) i częstotliwość wykonywania podlewania (co 2 dni, w okresach bezdeszczowych). Dane dotyczące nawadniania przyjęto w oparciu o Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody (Dz.U. 2002 nr 8 poz.70). Dla każdego miasta, w przypadku wariantów W2 i W3 założono, że w gospodarstwie domowym mieszka 4 osoby.

Najważniejszym zadaniem kalkulatora jest wskazanie optymalnej objętości zbiornika. Służy temu analiza wyników uzyskanych w tysiącu iteracji kalkulatora dla szeregu zakładanych a priori objętości zbiornika na wody opadowe. Dane opadowe niezbędne do przeprowadzenia symulacji z użyciem kalkulatora pochodzą z cyfrowej bazy projektu Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów PANDa, która uwzględnia czasową i lokalizacyjną zmienność opadów. W związku z czym pomimo potencjalnie tych samych założeń wejściowych – optymalna objętość dobranego zbiornika, jak również parametry świadczące o jego efektywności funkcjonowania (m.in. niedobór i straty wody) różnią się pomiędzy miastami i wynikają

one bezpośrednio z odmiennych danych opadowych, jakie zostały uwzględnione w algorytmie kalkulatora. Można zatem przyjąć, że wykorzystane dane opadowe w modelu symulacyjnym pozwalają na uzyskanie miarodajnych wyników obliczeń na terenie całej Polski.

Wyniki badań

W kalkulatorze wyniki obliczeń optymalnej objętości zbiornika na wody opadowe bazują na bilansie ilości wody z powierzchni dachu i potencjalnego jej zużycia w sezonie symulacji dla danej lokalizacji i celu gospodarczego. Wynikiem obliczeń są również wielkości niedoborów i strat wód opadowych we wskazanym okresie symulacji, które pozwalają projektantowi przeanalizować wpływ objętości zbiornika na efektywność systemu. Zależność pomiędzy objętością zbiornika a niedoborem wody w każdym z trzech wariantów, wskazuje na to, że w sposób zgodny z logiką zwiększając objętość zbiornika, zmniejsza się niedobór wody (ilość wody wodociągowej niezbędnej do napełnienia systemu lub wykorzystania na dany cel). W tym miejscu należy zwrócić uwagę na fakt, że po przekroczeniu pewnej granicznej

objętości zbiornika, krzywa ulega wypraszczaniu, tym samym wskazując na niekorzystny trend spadkowy. Co zatem idzie dalsze zwiększanie objętości zbiornika magazynującego nie przynosi już dalszych realnych korzyści, nie obserwuje się efektu istotnego obniżenia niedoborów wód opadowych, pomimo zwiększonej inwestycji w objętość zbiornika magazynującego, co przedstawia rys. 2.

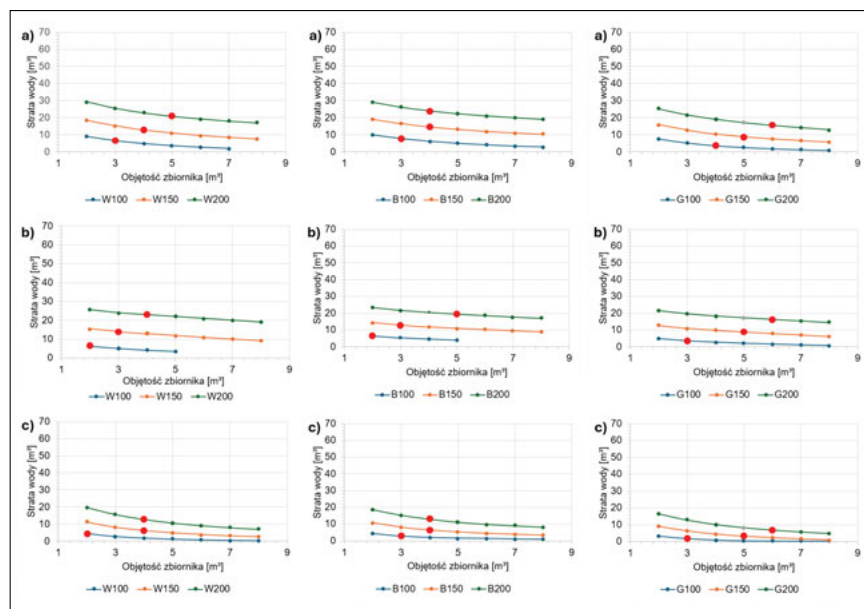
Analiza wariantowa wykazała, że przy wykorzystaniu wód opadowych zarówno do celu podlewania ogrodu (W1) jak i spłukiwania toalet (W2) wielkości średnich niedoborów wody są do siebie zbliżone i wynoszą odpowiednio około 20 m^3 i 19 m^3 , natomiast w wariancie mieszanym, którego celem jest wykorzystywanie wód opadowych do celów podlewania ogrodu i spłukiwania toalet (W3), średnia wartość niedoboru wody wyniosła około 54 m^3 i jest o 270% oraz 284% większa w porównaniu do W1 i W2. Zależność ta jest prawidłowa i wskazuje, że zapotrzebowanie na wodę opadową determinowane jest przez wodochłonność danego celu zagospodarowania wód (W1, W2, W3), przy czym wielkość powierzchni spływu ma bezpośredni wpływ na ilość niedoborów wody w danym wariancie. Im większa powierzchnia dachu, tym więcej wody można zretencjonować, a tym samym zmniejsza się wartość niedoborów wody. W analizowanych przypadkach zapotrzebowanie na wodę opadową w każdym z trzech wariantów przewyższało możliwości pozyskania spływów. Ilość wody wymaganej na zaspoko-

jenie zadeklarowanych celów nie została pokryta ze względu na zbyt małą powierzchnię dachu.

Tożsąmą zależność odnotowano pomiędzy objętością zbiornika a stratą wody. Zmniejszenie objętości o 1 m^3 od wskazanej przez kalkulator granicznej wartości optymalnej objętości zbiornika wpływa na znaczne (około 3 m^3) zwiększenie strat wody, rozumianej jako ich przelew awaryjny do kanalizacji. Natomiast, w sytuacji odwrotnej zwiększenia objętości zbiornika

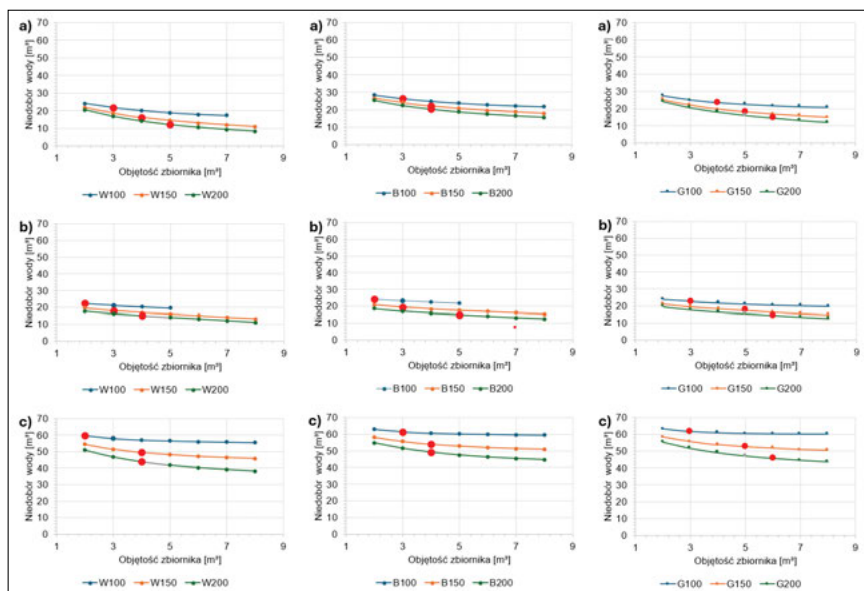
w stosunku do sugerowanej przez kalkulator optymalnej objętości, owszem straty (objętość średnia przelewów) spadają, ale ten spadek jest niski w odniesieniu do przyrostu wielkości zbiornika, a więc także kosztów samego systemu do wykorzystania wód opadowych in situ, co przedstawia rys. 3.

Analiza wariantowa wykazała, że przy wykorzystaniu wód opadowych zarówno do celu podlewania ogrodu (W1) jak i spłukiwania toalet (W2) wystąpiła



Rys. 3 Zależność pomiędzy objętością zbiornika, a stratą wody dla danej lokalizacji. Optymalną objętość zbiornika (dobraną w kalkulatorze) zaznaczono symbolem koła na czerwono dla: a) W1, b) W2, c) W3

Fig. 3 Relationship between tank capacity and water loss for given location. The optimal tank volume (indicated in the calculator) is marked in red with a circle symbol for: a) W1, b) W2, c) W3



Rys. 2 Zależność pomiędzy objętością zbiornika, a niedoborem wody dla danej lokalizacji. Optymalną objętość zbiornika (dobraną w kalkulatorze) zaznaczono symbolem koła na czerwono dla: a) W1, b) W2, c) W3

Fig. 2 Relationship between tank capacity and water shortages for given location. The optimal tank volume (indicated in the calculator) is marked in red with a circle symbol for: a) W1, b) W2, c) W3

taka sama średnia wartość strat wody i wyniosła około 12 m^3 , natomiast w wariancie mieszanym (W3), średnia wartość strat wody wyniosła około 5 m^3 i jest o 42% mniejsza w porównaniu do W1 i W2. Zależność ta jest również prawidłowa i wskazuje, że wariant trzeci (W3) wykorzystujący wody opadowe dla dwóch celach jednocześnie, charakteryzujący się ciągłością zużycia (spłukiwanie toalet) oraz dodatkowym sezonowym opróżnieniem zbiornika (podlewanie ogrodu), generuje o 42% mniejsze straty wody w porównaniu do W1 i W2.

Wykresy zależności średnich strat wód opadowych i średnich niedoborów wód opadowych od objętości zbiornika, wskazują każdorazowo na to, że zalecana przez kalkulator in situ optymalna objętość zbiornika jest przyjmowana jako minimalna objętość, po przekroczeniu której nie uzyskuje się proporcjonalnego przyrostu korzyści w postaci równego obniżenia niedoborów wód opadowych, jak również

spadku objętości strat wód opadowych (rys. 2 i rys 3).

W badaniach przeanalizowano również wpływ zwiększenia powierzchni dachu, przy zachowaniu tych samych danych wejściowych, na dobór objętości zbiornika retencyjnego odpowiednio dla wariantu W1, W2 i W3 (rys. 4). Z analiz tych wynika, że wraz ze wzrostem powierzchni dachu dobierana jest, przez kalkulator, większa objętość zbiornika, przeznaczonego na retencjonowanie wód opadowych dla pokrycia zapotrzebowania na dany cel, zdefiniowany w wariantach: W1, W2 i W3. Wyniki tych badań są tożsame z rezultatami analiz przeprowadzonych przez Słysia [17], dotyczących wykorzystania wód deszczowych na terenie miasteczka akademickiego. Warto jednak pokreślić, że jest to tendencja logiczna, gdyż większa powierzchnia uszczelniona generuje większą objętość spływu w czasie opadu deszczu, którą należałoby retencjonować w zbiorniku.

Warto też zwrócić uwagę na fakt, że mimo założenia tych samych danych wejściowych, tj. powierzchnia dachu, cel gospodarczy, powierzchnia zazieleniona itp. dobrana przez kalkulator optymalna objętość zbiornika różniła się w zależności od lokalizacji (miejscowości). „Kalkulator wykorzystania wód opadowych in situ” posługuje się danymi z cyfrowej bazy danych natężeń deszczów miarodajnych (baza o opadach powstała w ramach projektu Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDA)) dla wielolecia i bierze pod uwagę ilości opadów charakterystyczne dla danej miejscowości. Dzięki temu optymalna objętość zbiornika dobierana jest indywidualnie dla wskazanej lokalizacji. Opady deszczu w różnych miastach mogą różnić się ze względu na lokalne uwarunkowania, czego dobrym przykładem jest, w zbiorze analizowanych miast, Gdańsk wyróżniający się na tle Bydgoszczy i Wrocławia większą wysokością opadu atmosferycznego w ciągu roku. Gdańsk położony jest w obszarze

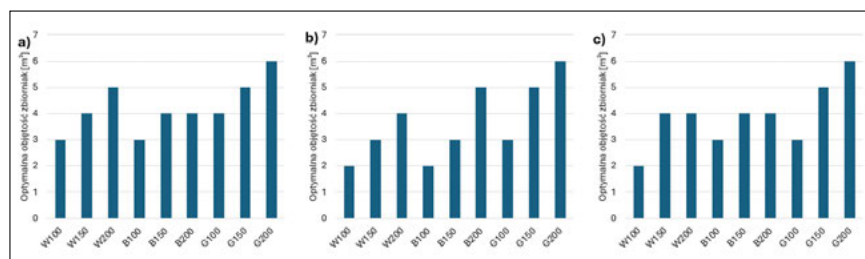
napływu oceanicznych mas powietrza z zachodu i nieznacznego ich napływu ze wschodu, co jest efektem zasadniczo wpływu klimatu morskiego. Bydgoszcz i Wrocław położone w głębi lądu mają bardziej kontynentalny klimat. Ma to bezpośrednio przełożenie na wielkość dobieranego przez kalkulator zbiornika (rys.4).

Analizując powyższe zależności, odnoszące się zarówno do strat i niedoborów wody opadowej, jak również powierzchni dachu w odniesieniu do optymalnej objętości zbiornika retencyjnego stwierdzono, że spływająca z dachu woda opadowa nie jest w stanie w pełni pokryć zapotrzebowania na wodę dla realizacji celów w poszczególnych wariantach W1 – W3. W tej sytuacji niedobór wody powinien być pokryty przez inne źródła zasilania, np. wodą wodociągową. Wynika to z faktu istnienia dysproporcji pomiędzy wielkością zapotrzebowania na wodę a powierzchnią dachu, generującą spływ. Nie mniej ważna jest nierównomierność występowania opadów w ciągu roku, która ma odzwierciedlenie choćby, w wyznaczanych przez kalkulator, stratach wód opadowych, rozumianych jako przelew ze zbiornika. Zdaniem Rashidi Mehrabadi i in. [14] wysoką efektywność zastosowania systemu do magazynowania wód opadowych można osiągnąć tam, gdzie występuje duża ilość opadów równomiernie rozłożonych w ciągu roku. W uwarunkowaniach klimatu umiarkowanego przejściowego, jaki występuje w Polsce należy liczyć się z sytuacją, że nierównomierność występowania opadów będzie coraz częściej obserwowana, co potwierdzają scenariusze zmian klimatu. Niemniej jednak, na podstawie 18 przeanalizowanych przypadków (3 warianty dla trzech miejscowości z 3 różnymi powierzchniami dachów) warto podkreślić, że instalacja zbiornika o optymalnej (dobrej) objętości pozwoliłaby na ograniczenie zużycia wody wodociągowej w ilości od 16 do nawet 35 m³, co daje realne oszczędno-

ści finansowe i korzyści ekonomiczne, w tym środowiskowe.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono obliczenia objętości zbiornika retencyjnego z wykorzystaniem „Kalkulatora wykorzystania wód opadowych in situ”. Pomimo, że kalkulator jest jednym z kolejnych narzędzi cyfrowych, które pojawiły się na rynku i które są pomocne w pracy projektanta, to warto jednak zwrócić uwagę, że jego funkcjonalność jest większa w porównaniu z innymi kalkulatorami do doboru zbiorników retencyjnych. Po pierwsze, pozwala na dobór optymalnej objętości zbiornika retencyjnego. Dodatkowo, po zaproponowaniu przez program optymalnej objętości zbiornika, użytkownik we własnym zakresie, na bazie wygenerowanych wyników i wykresów, może przeanalizować zmienność parametrów określających efektywność techniczną zbiornika (niedobory, straty wód opadowych) w zależności od jego wielkości i na bazie tych analiz może podjąć ostateczną decyzję o doborze wielkości zbiornika, uwzględniając również aspekty finansowe i ekonomiczne, w tym środowiskowe. „Kalkulator wykorzystania wód opadowych in situ” umożliwia geolokalizację inwestycji, tzn. dzięki wskazaniu dowolnej lokalizacji na mapie Google Maps odnajdywany jest najbliższy deszczomierz, a jego szeregi opadowe są przyjmowane za wiążące do dalszych symulacji (w oparciu o cyfrową bazę Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDA), czyli źródło aktualnej wiedzy o opadach na terenie całej Polski. Nie mniej ważny dla użytkownika jest przyjazny interfejs i szybkość dokonywania obliczeń, co sprawia, że wykorzystywanie tego typu narzędzi, w dobie powszechnej cyfryzacji ma szansę stać się codzienną praktyką, a narzędzia te mogą dotrzeć nawet do odbiorców indywidualnych (np. właścicieli domów jednorodzinnych, zarządców spółdzielni mieszkaniowych, zarządzających firmami, wdrażających działania z zakresu adaptacji do zmian klimatu i zrównoważonego zagospodarowania wód opadowych). W tym kontekście należy podkreślić, że przedstawione w artykule przykłady obliczeniowe dotyczą powierzchni spływu charakterystycznej dla wielkości dachów w zabudowie jednorodzinnej, jednakże „Kalkulator wykorzystania wód opadowych in situ” może być użyty do obliczeń optymalnych objętości zbiorników w szerszym zakresie przypadków np. dla innych powierzchni spływu czy celów gospodarczych.



Rys. 4
Optymalna objętość zbiornika dobrana dla danej lokalizacji (W,B,G) i powierzchni spływu (100, 150, 200 m²) oraz dla poszczególnego wariantu: a) W1, b) W2, c) W3
Fig. 4 Optimum storage volume selected for a given location (W,B,G) and runoff area (100, 150, 200 m²) and for each variant: a) W1, b) W2, c) W3

Podziękowanie

Prezentowane wyniki badań zostały uzyskane w ramach realizacji projektu POIR. 01.01.01-00-0119/21 *WaterFolder Connect – zintegrowana platforma projektowania i modelowania systemów odwodnienia*, finansowanego przez NCBiR w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020; Oś priorytetowa: Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa; Działanie: Projekty B+R przedsiębiorstw; Poddziałanie: Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa.

LITERATURA

- [1] Bac M., Rojek M., Meteorologia i klimatologia w inżynierii środowiska. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław, 2012
- [2] Basinger, M., Montalto, F. A., & Lall, U. (2010). A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *Journal of Hydrology*, 392(3-4), 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.039>
- [3] Burszta-Adamiak E., Spychalski P. (2021), Water savings and reduction of costs through the use of a dual water supply system in a sports facility, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 66, 102620, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102620>
- [4] Corvaro S. 2019. Water efficiency and economic assessment of domestic Rainwater harvesting systems in buildings with one – to three-floor elevations. *Water Supply*, Vol.19 (8): 2422-2434. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.124>
- [5] DIN 1989-1 Regenwassernutzungsanlagen Teil 1: Planung, Ausführung, Betrieb und Wartung, 2002. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- [6] DIN 1989-100 Regenwassernutzungsanlagen – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 16941-1, 2022. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- [7] García-Ávila, F., Guanoquiza-Suárez, M., Guzmán-Galarza, J., Cabello-Torres, R., & Valdiviezo-Gonzales, L. (2023). Rainwater harvesting and storage systems for domestic supply: An overview of research for water scarcity management in rural areas. *Results in Engineering*, 18, 101153. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101153>
- [8] Grzelak A., Fiałkiewicz-Kozieł B. (2017). Perspektywy i potencjalne zagrożenia ponownego wykorzystania szarej wody. *Inżynieria i ochrona środowiska* 20(1), 27-41. DOI: 10.17512/ios.2017.1.3
- [9] Królikowska J., Królikowski A., Wody opadowe. Odprowadzanie, zagospodarowanie, podczyszczanie i wykorzystywanie, wydanie I, Józefostów, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Wyd. II 2019
- [10] Licznar P. i Zaleski J. [Red.], *Metodyka opracowania polskiego atlasu nateżeń deszczów (PANDa)*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Państwowy Instytut Badawczy, 2020
- [11] Marnujemy nawet 800 litrów wody tygodniowo. Łatwo to naprawić! <https://rankomat.pl/woda/marnujemy-nawet-800-litrow-wody-tygodniowo.html>
- [12] Part 630 Hydrology National Engineering Handbook. Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. 210-VI-NEH, July 2004
- [13] Poradnik wykorzystania wody deszczowej. Broszura produktowa Wilo Polska. <https://cms.media.wilo.com/cdnoc/wilo432745/4721922/wilo432745.pdf>
- [14] Rashidi Mehrabadi M.H., Haghghi Fashi F., Saghafian B. 2013. Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 73: 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.015>
- [15] Sakson-Sysiak G. Zyzik P. Efektywność systemów wykorzystania wody deszczowej w budynkach handlowo-usługowych. INSTAL nr 1/2024, DOI 10.36119/15.2024.1.3
- [16] Sample, D.J., Liu, J. (2014). Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture. *Journal of Cleaner Production*, 75, 174-194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.075>
- [17] Stec, A., Słyś, D. (2017). Analiza możliwości wykorzystania wody deszczowej na terenie miasteczka akademickiego w Polsce. *Proceedings of ECOpole*, 11(1), 287-302. DOI: 10.2429/proc.2017.11(1)031
- [18] Słyś, D. *Zrównoważone systemy odwodnienia miast*. Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2018
- [19] Suchorab P., Iwanek M., Efektywność wybranej instalacji dualnej wykorzystującej wody deszczowe w warunkach rzeczywistych opadów, *Instal* 12/2021 s. 41-45, DOI 10.36119/15.2021.12.6
- [20] Xu, H., Zhong, T., Chen, Y., & Zhang, J. (2023). How to simulate future scenarios of urban stormwater management? A novel framework coupling climate change, urbanization, and green stormwater infrastructure development. *Science of The Total Environment*, 874, 162399. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162399>