

Agnieszka STEC<sup>1</sup> i Daniel SŁYŚ<sup>1</sup>

## ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA WODY DESZCZOWEJ NA TERENIE MIASTECZKA AKADEMICKIEGO W POLSCE

### THE ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USE RAINWATER HARVESTING SYSTEM WITHIN CAMPUS AREA IN POLAND

**Abstrakt:** W pracy przedstawiono wyniki badań, których celem było określenie efektywności finansowej systemu wykorzystania wody deszczowej (RWHS) do spłukiwania toalet. Jako przedmiot badań wybrano budynek mieszkalny (akademik) zlokalizowany w Polsce. Analizę funkcjonowania systemu RWHS przeprowadzono na sformułowanym modelu symulacyjnym. W badaniach przeanalizowano również wpływ wielkości zbiornika retencyjnego na opłacalność zastosowania systemu gospodarczego wykorzystania wody deszczowej w rozpatrywanym domu studenckim. W analizie finansowej określone zostały dwa wskaźniki: wartość bieżąca netto (*NPV*) oraz zdyskontowany okres zwrotu (*DPP*). Przeprowadzona analiza wykazała, że zastosowanie układu RWHS w analizowanym budynku jest opłacalne i może zmniejszyć zapotrzebowanie na wodę do spłukiwania toalet od 11 do 22% w zależności od pojemności zbiornika retencyjnego.

**Słowa kluczowe:** systemy gospodarczego wykorzystania wody deszczowej, oszczędzanie wody pitnej, analiza finansowa

#### Wprowadzenie

Aktualne roczne zapotrzebowanie na wodę słodką na świecie wynosi ok. 4500 km<sup>3</sup>, przy czym przestrzenne zróżnicowanie skali zapotrzebowania nie pokrywa się z rozmieszczeniem i dostępnością zasobów wodnych, co powoduje, że w wielu krajach występuje wodny deficyt. Ponadto, według niektórych scenariuszy wzrostu gospodarczego, roczne zapotrzebowanie na wodę słodką wzrośnie do 6900 km<sup>3</sup> w 2030 roku i może doprowadzić do 40% niedoboru w całkowitym zaopatrzeniu w wodę na świecie [1]. Wodny deficyt najdotkliwiej odczuwają kraje północnej i środkowej Afryki, Ameryki Południowej i Azji Środkowej. Jednak również wiele krajów europejskich, w tym także w Polska, zmaga się z niedostatkiem wody.

Liczne prognozy pokazują, iż w ciągu najbliższych dekad światowe zapasy słodkiej wody będą się kurczyć, podczas gdy zapotrzebowanie na nią drastycznie wzrośnie. Zmiany klimatu, rosnące zapotrzebowanie na żywność (popyt na wodę ze strony rolnictwa to 70% globalnego zapotrzebowania [2]) i energię czy potrzeby sanitarne stale rosnącej populacji to czynniki mające wpływ na wodny kryzys. Poważnym zagrożeniem dla kurczących się zasobów wodnych jest również niewłaściwe korzystanie z wody. Ponadto, urbanizacja, która jest główną siłą napędową powodującą globalne zmiany i degradację środowiska naturalnego, wpływa na szybkie wyczerpywanie się jego zasobów [3, 4]. Dlatego też zarządzanie zasobami środowiska naturalnego, w tym zasobami wodnymi, powinno być realizowane w sposób zrównoważony [5].

<sup>1</sup> Katedra Infrastruktury i Gospodarki Wodnej, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. 17 865 11 51, fax 17 865 11 72, email: stec\_aga@prz.edu.pl

Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole' 16, Zakopane, 5-8.10.2016

Polska jest jednym z najuboższych w wodę krajów europejskich i zajmuje 26 miejsce w Europie pod kątem wielkości zasobów wodnych, które cechują się dużą zmiennością sezonową i nierównomiernością rozmieszczenia terytorialnego. W przeliczeniu na jednego mieszkańca zasoby wodne Polski wynoszą 1660 m<sup>3</sup>/rok [6], podczas gdy średnia europejska szacowana jest na poziomie 4560 m<sup>3</sup>/rok na mieszkańca. Wody w Polsce jest nie tylko coraz mniej, ale jest ona również silnie zanieczyszczona. Aby polepszyć ten stan, należy wprowadzić strategię gospodarki wodnej dotyczącą m.in. rozwoju nowych sposobów korzystania z zasobów wodnych. Jednym z nich jest gospodarze wykorzystanie wód opadowych. Systemy gromadzące i wykorzystujące wody opadowe stosowane są w wielu krajach. W zależności od lokalizacji, warunków klimatycznych, rodzaju budynku w którym zainstalowany jest system wykorzystujący wody opadowe (RWHS), oszczędność w zapotrzebowaniu na wodę wodociągową osiąga różny poziom. Systemy RWHS postrzegane są przez badaczy jako jedna ze strategii umożliwiających dostosowanie się sektora gospodarki wodnej do zmieniającego się klimatu [7-9].

Woda deszczowa z powodzeniem może zastąpić wodę wodociągową zużywaną do spłukiwania toalet, mycia samochodów, prania, irygacji terenów uprawnych czy nawadniania terenów zielonych [10-16]. Najczęściej woda deszczowa wykorzystywana jest do spłukiwania toalet w budynkach mieszkalnych [17-20]. Jednak instalacje tego typu znajdują również zastosowanie w dużych obiektach sportowych [21], w obiektach uniwersyteckich [22], w supermarketach [23] i budynkach biurowych [24].

W literaturze światowej można znaleźć wiele informacji na temat wyznaczania korzyści finansowych, płynących z zastosowania systemów wykorzystania wody deszczowej [25-27]. W Polsce jednak systemy gospodarczego wykorzystania wód opadowych są stosowane rzadko. Wyniki przeprowadzonych analiz nad możliwością zastosowania tych systemów w budynkach mieszkalnych zawarto m.in. w publikacjach [28-30].

W artykule przedstawiono wyniki badań, na podstawie których określono możliwości ograniczania wykorzystania wody z sieci wodociągowej w obiekcie akademickim w warunkach polskich oraz wyznaczono wskaźniki finansowe dla systemu gospodarczego wykorzystania wody deszczowej zastosowanego w tym obiekcie.

### **Studium przypadku**

Badania nad możliwością gospodarczego wykorzystania wód opadowych przeprowadzono na obiekcie położonym na osiedlu akademickim Politechniki Rzeszowskiej zlokalizowanym w Rzeszowie. Rzeszów to 180-tysięczne miasto wojewódzkie, z 656-letnią tradycją, o powierzchni 116 km<sup>2</sup>. Jest to największy ośrodek przemysłowy, handlowo-usługowy, akademicki i kulturalny w południowo-wschodniej części Polski.

Miasteczko akademickie Politechniki Rzeszowskiej położone jest w centrum miasta. Na powierzchni 40 000 m<sup>2</sup> znajduje się kompleks siedmiu domów studenckich, zapewniając, zakwaterowanie dla około 2500 studentów. Badania określające efektywność zastosowania systemu wykorzystania wody deszczowej przeprowadzono dla Domu Studenckiego „Ikar”, którego lokalizację na terenie osiedla akademickiego pokazano na

rysunku 1. Jest to budynek całkowicie podpiwniczony o wysokości 11 kondygnacji, przeznaczony dla 600 studentów.

Dla rozpatrywanego domu studenckiego przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania wód opadowych do spłukiwania toalet oraz analizę finansową tej inwestycji. Założono, że wody opadowe zbierane będą z powierzchni dachu budynku „Ikar” oraz z dachu sąsiadującej z nim stołówki akademickiej. Następnie wody te odprowadzane będą systemem rur do podziemnego zbiornika, który zlokalizowano w sąsiedztwie analizowanego akademika.



Rys. 1. Lokalizacja analizowanego domu studenckiego na terenie osiedla akademickiego  
 Fig. 1. Location of the analyzed dormitory within the campus area

## Metodologia

W celu analizy sposobu funkcjonowania systemu gospodarczego wykorzystania wód opadowych w wybranym obiekcie akademickim opracowano model symulacyjny, którego algorytm przedstawiono na rysunku 2.

Funkcjonowanie instalacji w sformułowanym modelu symulacyjnym opisane jest szeregiem warunków, które określają przebieg procesów dopływu wód opadowych, ich akumulacji i odpływu tych wód do instalacji sanitarnej oraz nadmiaru wód opadowych do kanalizacji. Warunki te dla każdego z procesów przedstawiono poniżej.

- Napełnianie i akumulacja wód opadowych w zbiorniku retencyjnym:

$$V_{rki} + V_{di+1} > V_z, \text{ to } V_{i+1} = V_z, i = 1, 2, \dots, n$$

$$V_{rki} + V_{di+1} \leq V_z, \text{ to } V_{i+1} = V_{rki} + V_{di+1}, i = 1, 2, \dots, n$$

- Pobór wody opadowej ze zbiornika retencyjnego przez instalację sanitarną:

$$V_{rpi} - V_s < 0, \text{ to } V_{rki} = 0 \text{ oraz } V_{ui} = V_{rpi}, i = 1, 2, \dots, n$$

$$V_{rpi} - V_s \geq 0, \text{ to } V_{rki} = V_{rpi} - V_s \text{ oraz } V_{ui} = V_s, i = 1, 2, \dots, n$$

- Pobór wody z sieci wodociągowej przez instalację sanitarną:

$$V_{rpi} > V_s, \text{ to } V_{wi} = 0, i = 1, 2, \dots, n$$

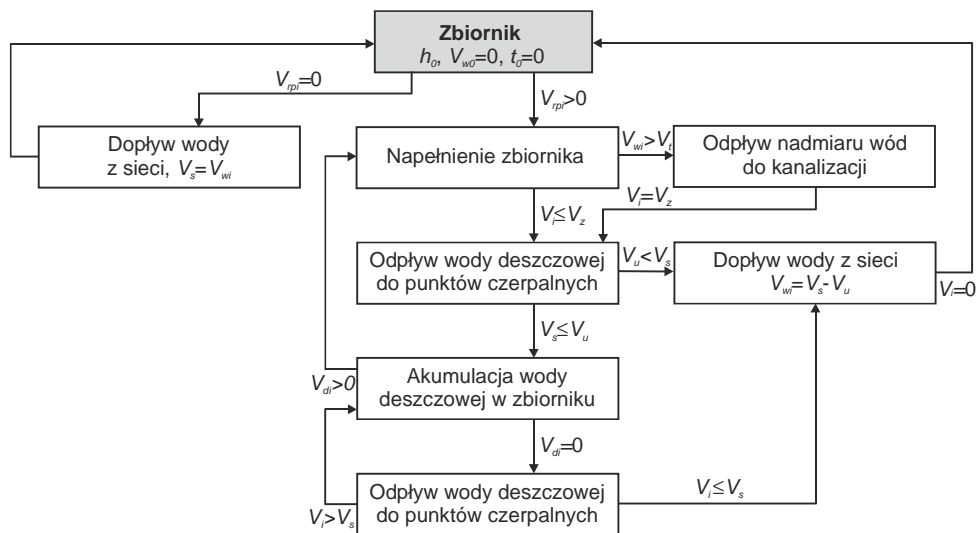
$$V_{rpi} \leq V_s, \text{ to } V_{wi} = V_s - V_{rpi}, i = 1, 2, \dots, n$$

- Odpływ wód opadowych ze zbiornika retencyjnego do kanalizacji:

$$V_{rpi} + V_{di} \leq V_z, \text{ to } V_{ki} = 0, i = 1, 2, \dots, n$$

$$V_{rpi} + V_{di} > V_z, \text{ to } V_{ki} = V_{rpi} + V_{di} - V_z, i = 1, 2, \dots, n$$

gdzie:  $V_i$  - objętość wody opadowej retencjonowanej w zbiorniku na koniec dnia  $i$ -tego [ $\text{m}^3$ ];  $V_{di}$  - objętość wody opadowej dopływającej w  $i$ -tym dniu [ $\text{m}^3$ ];  $V_{rki}$  - objętość retencjonowanej wody opadowej w zbiorniku po poborze przez instalację w  $i$ -tym dniu [ $\text{m}^3$ ];  $V_{rpi}$  - objętość retencjonowanej wody opadowej w zbiorniku przed poborem przez instalację w  $i$ -tym dniu [ $\text{m}^3$ ];  $V_{wi}$  - objętość wody wodociągowej doprowadzanej do instalacji sanitarnej w  $i$ -tym dniu,  $\text{m}^3$ ;  $V_s$  - dobowe zapotrzebowanie na wodę do splukiwania toalet [ $\text{m}^3$ ];  $V_z$  - objętość zbiornika retencyjnego [ $\text{m}^3$ ];  $V_{ui}$  - objętość wody deszczowej odprowadzanej ze zbiornika do instalacji sanitarnej w  $i$ -tym dniu [ $\text{m}^3$ ].



Rys. 2. Algorytm obliczeniowy modelu symulacyjnego systemu gospodarczego wykorzystania wód opadowych

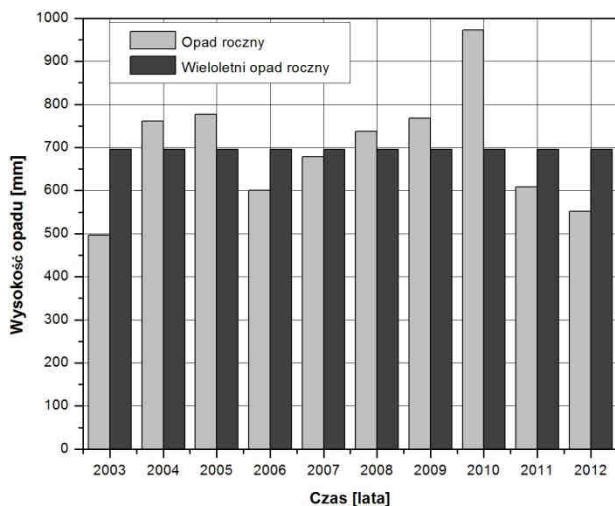
Fig. 2. Computing algorithm of simulation model of the economic use of rainwater utilization system

Badania, które wykonano na opracowanym modelu symulacyjnym instalacji wykorzystania wód opadowych w budynku akademickim, zostały przeprowadzone z zastosowaniem rzeczywistych danych opadowych. Dane o dobowych wysokościach opadów pochodzą ze stacji meteorologicznej Rzeszów-Jasionka. Do badań symulacyjnych posłużono się danymi z lat 2003-2012, dla których roczne sumy opadów przedstawiono na rysunku 3. W analizowanym okresie średnia roczna suma opadów wynosiła 695 mm i nie odbiega znacząco od wartości średniej z wielolecia. Można zatem przyjąć, że wykorzystane dane opadowe w modelu symulacyjnym pozwolą na uzyskanie miarodajnych wyników obliczeń.

Analizę funkcjonowania systemu gospodarczego wykorzystania wód opadowych dla akademika „Ikar” przeprowadzono na modelu symulacyjnym, wykorzystując poniższe dane wejściowe:

- powierzchnia dachu stołówki  $F_S = 1714 \text{ m}^2$ ;
- powierzchnia dachu  $F_D = 731,9 \text{ m}^2$ ;
- całkowita powierzchnia odwadniania  $F = 2445,9 \text{ m}^2$ ;
- liczba mieszkańców (studentów)  $M = 600$  osób;
- średnie jednostkowe zapotrzebowanie na wodę do spłukiwania toalet  $q_s = 0,035 \text{ m}^3/\text{Md}$ ;
- dobowe zapotrzebowanie na wodę do spłukiwania toalet  $V_s = 21 \text{ m}^3/\text{d}$ ;
- średnia roczna wysokość opadu  $V_{dr} = 0,695 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ;
- współczynnik spływu powierzchni odwadnianej  $\psi = 0,9$ ;
- liczba dni akumulacji wody w zbiorniku w czasie suszy  $t = 7$  dni.

Na podstawie zaleceń projektowych producentów zbiorników na wodę deszczową określono objętość zbiornika, która wynosiła  $90 \text{ m}^3$ . Objętość ta została przyjęta w analizie jako wartość referencyjna.



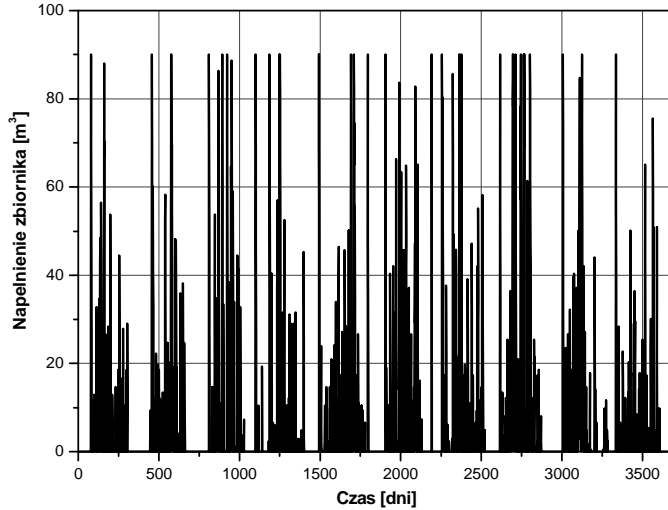
Rys. 3. Wysokość opadu rocznego w latach 2003-2012

Fig. 3. Annual precipitation between the year 2003 and 2012

## Wyniki i dyskusja

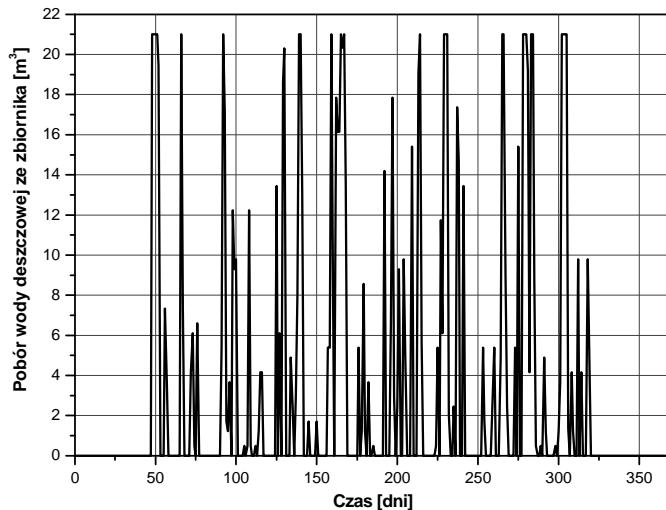
Na podstawie opracowanego modelu symulacyjnego i posiadanych danych o wysokości dobowych opadów przeanalizowano sposób funkcjonowania instalacji gospodarczego wykorzystania wód opadowych w wybranym obiekcie akademickim. Na rysunku 4 przedstawiono wykres obrazujący kształtowanie się napełnień w okresie 10 lat w zbiorniku magazynującym wody deszczowe, natomiast na rysunku 5 pokazano przebieg

procesu poboru wody opadowej z tego zbiornika retencyjnego w poszczególnych dniach dla wybranego roku.



Rys. 4. Napełnienie zbiornika magazynującego wody opadowe (objętość zbiornika:  $90 \text{ m}^3$ ) w akademiku „Ikar” w latach 2003-2012

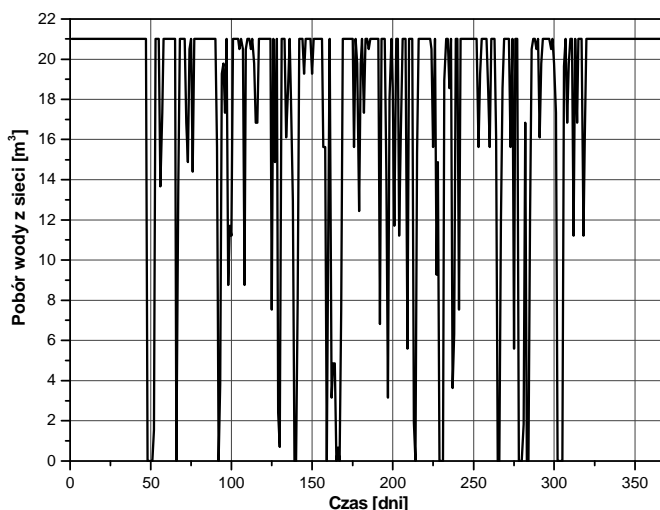
Fig. 4. Filling trends in the storage tank of rainwater (tank capacity:  $90 \text{ m}^3$ ) for the “Ikar” dormitory within a period between 2003 and 2012



Rys. 5. Zużycie wody deszczowej ze zbiornika do splukiwania toalet (objętość zbiornika  $90 \text{ m}^3$ ) w akademika „Ikar” w 2007 roku

Fig. 5. Use of rainwater from the storage tank for toilet flushing (tank capacity:  $90 \text{ m}^3$ ) in the “Ikar” dormitory in 2007

Pobór wody w ilości  $21 \text{ m}^3/\text{dobę}$  oznacza, iż całkowite dobowe zapotrzebowanie na wodę do spłukiwania toalet w akademiku „Ikar” pokrywane jest przez wodę deszczową zmagazynowaną w zbiorniku. Mniejszy pobór wody z tego zbiornika oznacza, że ilość wody deszczowej jest niewystarczająca i konieczne jest doprowadzenie wody z sieci wodociągowej. Proces ten dla instalacji sanitarnej w budynku „Ikar” dla wybranego roku z analizowanego okresu 10 lat przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Zużycie wody z sieci wodociągowej do spłukiwania toalet (objętość zbiornika  $90 \text{ m}^3$ ) w akademiku „Ikar” w 2007 roku

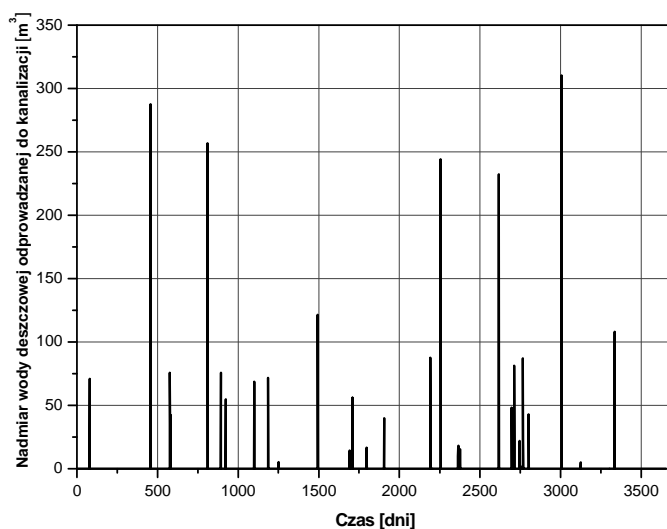
Fig. 6. Use of tap water for toilet flushing (tank capacity:  $90 \text{ m}^3$ ) for the “Ikar” dormitory in the year 2007

Pomimo znacznej objętości zbiornika retencyjnego, która umożliwia efektywne gromadzenie w nim wody deszczowej spływającej z dachu, zaobserwowano w analizowanym okresie przypadki zrzutu nadmiaru wód opadowych do systemu kanalizacyjnego. Sytuacja ta miała miejsce głównie w okresach letnich, w których występują opady o znacznej wysokości, i w okresach wczesnowiosennych, kiedy to występuje zjawisko topnienia zgromadzonego na dachu śniegu. Przebieg procesu odprowadzania nadmiaru wód deszczowych poza instalację przedstawiono na rysunku 7.

W badaniach przeanalizowano również wpływ objętości zbiornika retencyjnego na efektywność funkcjonowania systemu gospodarczego wykorzystania wód opadowych w akademiku „Ikar”. Przyjęto do badań zbiornik o objętości  $30$  i  $60 \text{ m}^3$ .

Analizując 10-letni przedział czasowy stwierdzono, iż spływająca z dachu woda deszczowa nie jest w stanie zastąpić całkowicie wody wodociągowej wymaganej do pokrycia dobowego zapotrzebowania na wodę do spłukiwania toalet. Wysoki udział wody z sieci wodociągowej w zapotrzebowaniu na wodę przez spłuczki ustępowe spowodowany jest zbyt małą powierzchnią dachu oraz nierównomiernością występowania opadów w ciągu roku. Na podstawie uzyskanych wyników badań obliczono dla każdego z analizowanych wariantów objętości zbiornika retencyjnego procentowy udział wody

deszczowej w całkowitym zapotrzebowania wody do spłukiwania toalet w akademiku „Ikar”. Stwierdzono, iż największą skuteczność w wykorzystaniu wody deszczowej ma zbiornik o pojemności  $90 \text{ m}^3$ . Na rysunku 8 przedstawiono wyniki tych badań dla okresu 10 lat i przy przyjętych trzech wariantach objętości zbiornika retencyjnego.



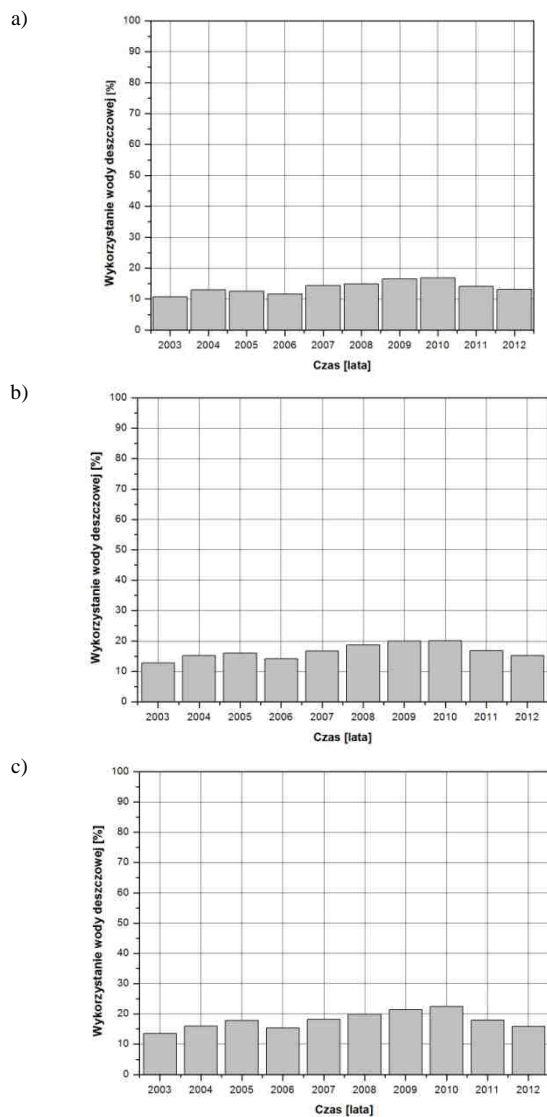
Rys. 7. Wartość zrzutu nadmiaru wód deszczowych do kanalizacji (objętość zbiornika  $90 \text{ m}^3$ ) w akademiku „Ikar” w latach 2003-2012

Fig. 7. Volume of an excess of rainwater discharged to a sewage system (tank capacity:  $90 \text{ m}^3$ ) for the “Ikar” dormitory) and a period between the year 2003 and 2012

W zależności od objętości zbiornika retencyjnego średnia oszczędność wody niższej jakości wynosiła od 11 do 22%. Tak niska efektywność systemu w przypadku budynku wielokondygnacyjnego, jakim jest Ikar, wynika ze zbyt małej powierzchni dachu, z której zbierane są wody opadowe, i ze znacznego zapotrzebowania na wodę wynikającego z dużej liczby mieszkańców.

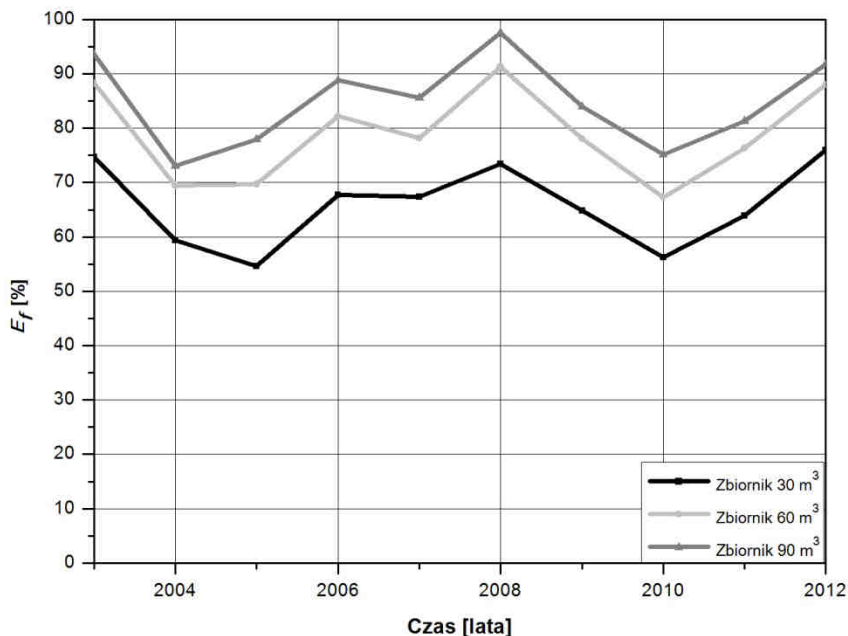
Możliwość zakumulowania wody opadowej spływającej z dachu dla omawianych wariantów zbiorników retencyjnych jest wysoka i rośnie wraz ze wzrostem objętości zbiornika. Zbiornik o pojemności  $90 \text{ m}^3$  jest w stanie zmagazynować średnio 85% wód deszczowych spływających z dachu, natomiast najmniejszy spośród zbiorników 66%. Mniejszy udział w akumulowaniu wody deszczowej spływającej z dachu do zbiornika był spowodowany nierównomiernością występowania opadów w ciągu roku lub większą liczbą deszczów nawalnych, w czasie których nadmiar wód odprowadzany był ze zbiornika do systemu kanalizacyjnego. Efektywność magazynowania wód opadowych spływających z dachu do zbiornika dla różnych wariantów objętości zbiornika przedstawiono na rysunku 9.





Rys. 8. Procentowy udział wody opadowej w całkowitym zapotrzebowaniu na wodę dla akademika „Ikar” i analizowanych wariantów objętości zbiornika w latach 2003-2012 przy pojemności zbiornika: a) 30 m<sup>3</sup>, b) 60 m<sup>3</sup>, c) 90 m<sup>3</sup>

Fig. 8. Percentage share of rainwater in the total water requirement for toilet flushing for the “Ikar” dormitory tank variant capacities between 2003 and 2012. Tank capacity: a) 30 m<sup>3</sup>, b) 60 m<sup>3</sup>, c) 90 m<sup>3</sup>



Rys. 9. Efektywność  $E_f$  akumulowania wód opadowych odprowadzanych z dachu do zbiornika w zależności od objętości zbiornika

Fig. 9. Contribution of rainwater accumulated in the tank in relation to the total volume of rainwater brought into the tank from the roof

### Efekt ekonomiczny systemu gospodarczego wykorzystania wód opadowych w analizowanym akademiku

Na efekt ekonomiczny zastosowania systemu gospodarczego wykorzystania wód opadowych wpływa przede wszystkim możliwość oszczędzania wody wodociągowej oraz nakłady inwestycyjne i koszty eksploatacyjne ponoszone w okresie funkcjonowania tego systemu.

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych dla różnych wariantów objętości zbiornika retencyjnego „Tank A” pozwoliły ocenić efektywność finansową inwestycji, dotyczącej możliwości wykorzystania wód opadowych do spłukiwania toalet w badanym obiekcie akademickim, oraz pozwoliło określić najkorzystniejszy wariant inwestycyjny. W tym celu dla analizowanych wariantów wyznaczono dwa wskaźniki finansowe: wartość bieżącą netto (Net Present Value -  $NPV$ ) oraz zdyskontowany okres zwrotu (Discounted Payback Period -  $DPP$ ).

Metoda Net Present Value jest sumą wszystkich korzyści netto generowanych przez inwestycję w całym okresie funkcjonowania danego obiektu, które przed zsumowaniem są dyskutowane [31]. Jeżeli wartość bieżąca netto jest większa od zera, co oznacza, że wpływy z realizacji przedsięwzięcia przewyższają swą wartością nakłady inwestycyjne, to dana inwestycja jest opłacalna. Natomiast, jeśli wartość  $NPV$  jest mniejsza od zera, to dane przedsięwzięcie inwestycyjne jest nieopłacalne. Wartość zaktualizowaną netto dla każdego

z przyjętych do badań wariantów  $k$  instalacji wykorzystania wód opadowych do spłukiwania toalet wyznaczono z zależności:

$$NPV_k = \sum_{t=0}^n \frac{CF_{kt}}{(1+r)^t} \quad (1)$$

gdzie:  $CF_{kt}$  - przepływ pieniężny wyznaczony dla danego roku  $t$  [€];  $n$  - liczba lat eksploatacji systemu,  $n = 30$  lat;  $r$  - stopa dyskontowa,  $r = 5\%$ .

Wartość przepływów pieniężnych  $CF_{kt}$  dla poszczególnych lat określono jako sumę nakładów inwestycyjnych  $INV_{kt}$  ponoszonych w danym roku i oszczędności  $O_{kt}$  wynikających z zastosowania systemu gospodarczego wykorzystania wód opadowych:

$$CF_{kt} = -INV_{kt} + O_{kt} \quad (2)$$

W obliczeniach uwzględniono oszczędności wynikające z mniejszego poboru wody z sieci wodociągowej oraz z ograniczenia ilości wód opadowych odprowadzanych z dachu do systemu kanalizacyjnego. Oszczędności w kolejnych latach funkcjonowania systemu zostały określone z zależności:

$$O_{kt} = (W_{0t} - W_{kt}) \cdot C_{Wt} + (R_{0t} - R_{kt}) \cdot C_{Rt} \quad (3)$$

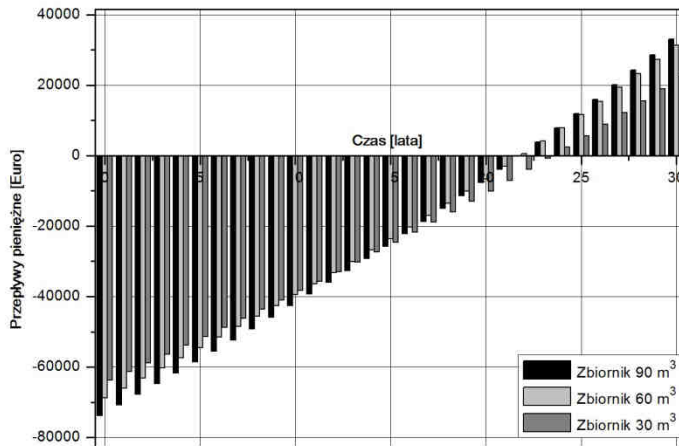
gdzie:  $O_{kt}$  - oszczędności wynikające z zastosowania systemu gospodarczego wykorzystania wód opadowych w poszczególnych latach [€];  $W_{0t}$  - wykorzystanie wody do spłukiwania toalet w wariantcie 0 bez zastosowania systemu wykorzystania wód opadowych [ $m^3$ ];  $W_{kt}$  - wykorzystanie wody do spłukiwania toalet w wariantcie  $k$  z zastosowaniem systemu wykorzystania wód opadowych [ $m^3$ ];  $C_{Wt}$  - cena zakupu wody z sieci wodociągowej w kolejnych latach [€/m<sup>3</sup>];  $R_{0t}$  - ilość wód opadowych odprowadzanych z dachu do kanalizacji w wariantcie 0 bez zastosowania systemu wykorzystania wód opadowych [ $m^3$ ];  $R_{kt}$  - ilość wód opadowych odprowadzanych z dachu do kanalizacji w wariantcie  $k$  z zastosowaniem systemu wykorzystania wód opadowych [ $m^3$ ];  $C_{Rt}$  - cena za odprowadzanie wód opadowych do kanalizacji w kolejnych latach [€/m<sup>3</sup>].

Do obliczeń oszczędności  $O_{kt}$  przyjęto następujące wartości cen:  $C_{Wt} = 1$  €/m<sup>3</sup>,  $C_{Rt} = 0,7$  €/m<sup>3</sup>. Na podstawie analizy wzrostu cen zakupu wody wodociągowej, jaki wystąpił w ostatnich kilkunastu latach w Rzeszowie, założono coroczny wzrost tej wartości o 8%. Przyjęto również, że cena za odprowadzanie wód deszczowych do kanalizacji będzie wzrastać o 4% rocznie.

Na podstawie wyników badań na modelu symulacyjnym oraz powyższych danych obliczono przepływy pieniężne w okresie 30 lat funkcjonowania instalacji i dla każdego z przyjętych wariantów objętości zbiornika retencyjnego. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rysunku 10.

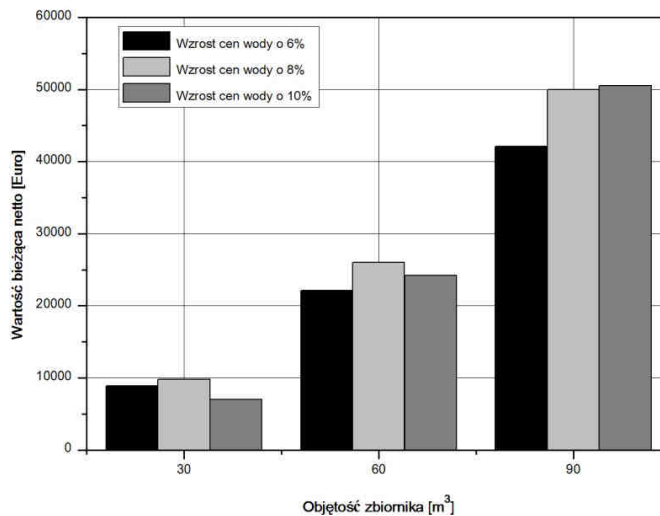
Otrzymane wartości rocznych przepływów pieniężnych pozwoliły wyznaczyć wartość bieżącą netto przedsięwzięcia inwestycyjnego dla analizowanych wariantów. Jednak w celu sprawdzenia wpływu kosztów zakupu wody z sieci wodociągowej na tę wartość rozważanych koncepcji zaopatrzenia w wodę deszczową instalacji sanitarnej przeanalizowano także dwa scenariusze, w których założono coroczny wzrost cen wody o 6 i 10%. W nakładach inwestycyjnych poniesionych w roku zerowym uwzględniono nakłady wynikające z kosztów zakupu zbiornika, materiałów instalacyjnych, niezbędnej

armatury wbudowanej w instalację oraz kosztów wykonania całej instalacji. Wartość tych nakładów w zależności od wariantu objętości zbiornika retencyjnego wynosiła 63 734, 68 784 i 73 833 € odpowiednio dla zbiornika o objętości 30, 60 i 90 m<sup>3</sup>.



Rys. 10. Wartość przepływów pieniężnych dla analizowanej instalacji gospodarczego wykorzystania wód opadowych w akademiku „Ikar” w okresie 30 lat

Fig. 10. Cash flow values for the analyzed economic use of rainwater utilization system in the “Ikar” dormitory over a period of 30 years



Rys. 11. Wartość bieżąca netto instalacji gospodarczego wykorzystania wód opadowych w akademiku „Ikar” w zależności od objętości zbiornika i przyjętego wzrostu cen zakupu wody z sieci wodociągowej w okresie 30 lat

Fig. 11. Net Present Values for the economic use of a rainwater utilization system in the “Ikar” dormitory relative to the tank capacity and assumed increase in tap water purchase prices over a period of 30 years

Ponadto w corocznych wydatkach ponoszonych na funkcjonowanie systemu wykorzystania wód deszczowych w analizowanym budynku uwzględniono koszty wynikające z transportu pompowego wody ze zbiornika do instalacji sanitarnej. Na rysunku 11 pokazano zależność wartości bieżącej netto od prognozowanego wzrostu cen zakupu wody.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można zauważyć, iż dla przyjętych scenariuszy wzrostu cen zakupu wody wartość bieżąca netto dla każdego z analizowanych wariantów jest większa od zera. Oznacza to, iż dla wykorzystanych danych meteorologicznych z 10 lat niezależnie od objętości zbiornika retencyjnego każdy z wariantów inwestycyjnych jest opłacalny finansowo. Większy wzrost cen zakupu wody powodował wzrost wartości bieżącej netto, który był bardziej zauważalny wraz ze zwiększaniem się objętości zbiornika. Przyjęty 10% wzrost cen jest większy niż obliczony na podstawie danych archiwalnych, ale biorąc pod uwagę aktualne prognozy wzrostu cen zakupu wody z sieci wodociągowej oraz kurczące się zasoby wodne Polski, scenariusz ten jest bardzo prawdopodobny.

Kolejnym wskaźnikiem finansowym, który został poddany analizie, jest zdyskontowany okres zwrotu  $DPP$ , który obliczono z zależności (4). Wskaźnik ten określa liczbę lat, po upływie których zdyskontowane wpływy z realizacji przedsięwzięcia zrównoważą nakłady inwestycyjne [31]:

$$DPP_k = Y_k + \frac{|NPV_{kY}|}{CF_{k(Y+1)}} \quad (4)$$

gdzie:  $DPP_k$  - zdyskontowany okres zwrotu, wyznaczony dla wariantu  $k$  [lata];  $Y_k$  - liczba pełnych lat przed całkowitym zwrotem nakładów, wyznaczona dla wariantu  $k$  [lata];  $CF_{k(Y+1)}$  - zdyskontowany przepływ pieniężny w roku  $(Y+1)$ , wyznaczony dla wariantu  $k$  [€];  $NPV_{kY}$  - nieodzyskane nakłady określone na początku roku  $(Y+1)$ , wyznaczone dla wariantu  $k$  [€].

Zdyskontowany okres zwrotu obliczono dla trzech analizowanych wariantów inwestycyjnych instalacji wykorzystania wód opadowych w akademiku „Ikar”. Wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1  
Zdyskontowany okres zwrotu dla analizowanych wariantów systemu wykorzystania wód opadowych

Table 1  
Discounted Payback Period for analyzed variants of the rainwater utilization system

Objętość zbiornika [m <sup>3</sup> ]	Zdyskontowany okres zwrotu [lata]
30	23 lata 3 miesiące
60	21 lat 10 miesięcy
90	blisko 22

Na podstawie uzyskanych wyników badań można zauważyć, że dla żadnego z analizowanych wariantów objętości zbiornika retencyjnego okres zwrotu nakładów nie przekraczał przyjętego do analizy okresu funkcjonowania instalacji w budynku. W najbardziej korzystnym z analizowanych wariantów, to jest dla zbiornika o objętości 60 m<sup>3</sup>, okres zwrotu nakładów wynosi 21 lat i 10 miesięcy. Oznacza to, iż zbiornik ten jest

optymalnym rozwiązaniem dla instalacji wykorzystania wód opadowych w analizowanym akademiku. Z kolei wariant ze zbiornikiem o objętości 90 m<sup>3</sup> umożliwia uzyskanie większych oszczędności wynikających z ograniczenia wykorzystania wody z sieci wodociągowej i ze zmniejszenia ilości wód odprowadzanych do kanalizacji, ale tym samym wymaga poniesienia większych nakładów inwestycyjnych. Przekłada się to na dłuższy okres zwrotu niż w przypadku zbiornika o objętości 60 m<sup>3</sup>. Jednak biorąc pod uwagę fakt, iż wartość *DPP* dla tych dwóch wariantów jest zbliżona, oraz to, że w dalszej perspektywie czasowej będą możliwe do osiągnięcia większe oszczędności, należałoby się zastanowić, czy koncepcja instalacji ze zbiornikiem o objętości 90 m<sup>3</sup> nie będzie najkorzystniejszym rozwiązaniem. Przemawiać mogą za tym również inne kryteria niż finansowe, na przykład kryterium ochrony zasobów środowiska naturalnego. W czasach, w których w większości krajów na świecie, w tym również w Polsce, występuje wodny deficyt, może to mieć szczególne znaczenie dla ochrony coraz bardziej kurczących się zasobów wody słodkiej. Ponadto ograniczenie spływu wód deszczowych do kanalizacji, m.in. poprzez ich gospodarcze wykorzystanie, wpływa korzystnie na funkcjonowanie systemów odwodnieniowych oraz na ochronę odbiorników ścieków, którymi najczęściej są powierzchniowe wody płynące.

### Podsumowanie i wnioski

Gromadzenie i wykorzystanie wody deszczowej przynosi wiele korzyści dla zrównoważonego rozwoju miast i jawi się jako kluczowy punkt strategii stosowanych w celu ograniczenia niedoborów wody w warunkach miejskich.

Przeprowadzone badania nad możliwością zastosowania systemu gospodarczego wykorzystania wody deszczowej w domu studenckim pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- w zależności od objętości zbiornika retencyjnego możliwe jest ograniczenie zużycia wody wodociągowej w badanym obiekcie w granicach od 11 do 22%,
- tak niska efektywność systemu wynika ze zbyt małej powierzchni dachu, z której zbierane są wody opadowe, i ze znacznego zapotrzebowania na wodę wynikającego z dużej liczby mieszkańców. Mimo to, uzyskane efekty finansowe pozwalają stwierdzić, że w dłuższej perspektywie czasowej wykorzystanie wody deszczowej do spłukiwania toalet w analizowanym obiekcie będzie przedsięwzięciem opłacalnym,
- w żadnym z analizowanych wariantów objętości zbiornika retencyjnego okres zwrotu nakładów nie przekraczał przyjętego do analizy okresu funkcjonowania instalacji w budynku. W najbardziej korzystnym z analizowanych wariantów, to jest dla zbiornika o objętości 60 m<sup>3</sup>, okres zwrotu nakładów wynosi blisko 22 lata.

### Literatura

- [1] 2030 Water Resources Group. Charting Our Water Future. Economic frameworks to inform decision-making; 2009. [http://www.mckinsey.com/Client\\_Service/Sustainability/Latest\\_thinking/Charting\\_our\\_water\\_future](http://www.mckinsey.com/Client_Service/Sustainability/Latest_thinking/Charting_our_water_future).
- [2] United Nations. UN-Water Annual Report; 2012. <http://www.unwater.org/publications/un-water-annual-report-2012/>.
- [3] Huang L, Yeh C, Chang F. The transition to an urbanizing world and the demand for natural resources. *Curr Opin Environ Sustain.* 2010;2:136-143. DOI: 10.1016/j.cosust.2010.06.004.

- [4] Yao M, Wang C, Zhang C, Chen K, Song P. The influencing factors of resources and environments in the process of urbanization of China. *Prog Geogr.* 2008;27(3):94-100. DOI: 10.11820/dlkxjz.2008.03.014.
- [5] EEA. Towards efficient use of water resources in Europe. EEA Report No1/2012, 68 pp. Copenhagen: European Environment Agency; 2012. DOI: 10.2800/95096.
- [6] Hotłoś H. Quantity and availability of freshwater resources: the world - Europe - Poland. *Environ Prot Eng.* 2008;34:67-77. [https://www.google.pl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjE7YGOwOXTAhXMHpoKHZIcB18QFggqMAE&url=http%3A%2F%2Fpwr.wroc.pl%2F2008%2FHotlos\\_2-2008.pdf&usq=AFQjCNGSQDhJVXtWp7ZOgFzdTwi-Kjz3tA](https://www.google.pl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjE7YGOwOXTAhXMHpoKHZIcB18QFggqMAE&url=http%3A%2F%2Fpwr.wroc.pl%2F2008%2FHotlos_2-2008.pdf&usq=AFQjCNGSQDhJVXtWp7ZOgFzdTwi-Kjz3tA).
- [7] Pandey DN, Gupta AK, Anderson DM. Rainwater harvesting as an adaptation to climate change. *Current Sci.* 2003;85(1):46-59. <http://sa.indiaenvironmentportal.org.in/files/Rainwater%20harvesting%20as%20an%20adaptation.pdf>.
- [8] Sales JC, Konig KW, Lo A. Rainwater harvesting providing adaptation opportunities to climate change. In: Barron J, editor. *Rainwater Harvesting: A Lifeline for Human Well-being. A Report Prepared for UNEP by Stockholm Environment Institute York. Stockholm Resilience Centre, Sweden, 2009.* ISBN: 978-92-807-3019-7.
- [9] Mwenge Kahinda J, Taigbenu AE, Boroto RJ. Domestic rainwater harvesting as an adaptation measure to climate change in South Africa. *Phys Chem Earth.* 2010;35:742-751. DOI: 10.1016/j.pce.2010.07.004.
- [10] Imteaz MA, Shanableh A, Rahman A, Ahsan A. Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia. *Resour Conserv Recycl.* 2011;55:1022-1029. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.05.013.
- [11] Villarreal EL, Dixon A. Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Build Environ.* 2005;40:1174-84. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.10.018.
- [12] Furumai H. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Phys Chem Earth.* 2008;33:340-346. DOI: 10.1016/j.pce.2008.02.029.
- [13] Jones M, Hunt W. Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States. *Resour Conserv Recycl.* 2010;54:623-629. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.11.002.
- [14] Coombes P. *Rainwater Tanks Revisited: New Opportunities for Urban Water Cycle Management.* The University of Newcastle, Australia; 2003. <https://urbanwatercyclesolutions.com/rainwater-tanks-revisited-new-opportunities-for-integrated-water-cycle-management/>.
- [15] Ghisi E, Tavares D, Rocha V. Rainwater harvesting in petrol stations in Brasilia: Potential for notable water savings and investment feasibility analysis. *Resour Conserv Recycl.* 2009;54:79-85. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.06.010.
- [16] Mourad K, Berndtsson R. Potential water saving from rainwater harvesting in Syria. *Vatten (J Water Manage Res).* 2011;67:113-117. <http://lup.lub.lu.se/record/2214878>.
- [17] Ghisi E, Oliveira S. Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil. *Build Environ.* 2007;42:1731-1742. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.02.001.
- [18] Fewkes A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalized approach. *Urban Water.* 1999;1. DOI: 10.1016/S1462-0758(00)00026-1.
- [19] Ghisi E, Ferreira D. Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. *Build Environ.* 2007;42:2512-2522. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.07.019.
- [20] Ghisi E. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. *Build Environ.* 2006;41:1544-1550. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.03.018.
- [21] Zaizen M, Urakawa T, Matsumoto Y, Takai H. The collection of rainwater from dome stadiums in Japan. *Urban Water.* 1999;1:355-359. DOI: 10.1016/S1462-0758(00)00028-5.
- [22] Appan A. A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses. *Urban Water.* 1999;1:317-321. DOI: 10.1016/S1462-0758(00)00025-X.
- [23] Chilton J, Maidment G, Marriott D, Francis A, Tobias G. Case study of rainwater recovery system in a commercial building with a large roof. *Urban Water.* 1999;1:345-354. DOI: 10.1016/S1462-0758(00)00032-7.
- [24] Proença LC, Ghisi E. Assessment of potable water savings in office buildings considering embodied energy. *Water Resour Manage.* 2013;27:581-599. DOI: 10.1007/s11269-012-0203-1.
- [25] Rahman A, Keane J, Imteaz MA. Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits. *Resour Conserv Recycl.* 2012;61:16-21. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.12.002.
- [26] Ghimire SR, Watkins DW, Li K. Life cycle cost assessment of a rain water harvesting system for toilet flushing. *Water Sci Technol. Water Supply.* 2012;12(3):309-320. DOI: 10.2166/ws.2011.135.

- [27] Farrenya R, Gabarrella X, Rieradevall J. Cost-efficiency of rainwater harvesting strategies in dense Mediterranean neighborhoods. *Resour Conserv Recycl.* 2011;55:686-694. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.01.008.
- [28] Słyś D, Stec A, Zelenáková M. A LCC analysis of rainwater management variants. *Ecol Chem Eng S.* 2012;19(30):359-372. DOI: 10.2478/v10216-011-0026-7.
- [29] Słyś D. Potential of rainwater utilization in residential housing in Poland. *Water Environ J.* 2009;23:318-325. DOI: 10.1111/j.1747-6593.2008.00159.x.
- [30] Stec A, Kordana S. Analysis of profitability of rainwater harvesting, gray water recycling and drain water heat recovery systems. *Resour Conserv Recycl.* 2015;105:84-94. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.10.006.
- [31] Brigham EF, Ehrhardt MC. *Financial Management: Theory and Practice.* Mason: South-Western Cengage Learning; 2008.

## **THE ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USE RAINWATER HARVESTING SYSTEM WITHIN CAMPUS AREA IN POLAND**

Department of Infrastructure and Water Management, The Faculty of Civil, Environmental Engineering and Architecture, Rzeszow University of Technology

**Abstract:** In this paper, the financial effectiveness of the use of the rainwater harvesting system (RWHS) for toilet flushing is presented. The analysis was conducted using a simulation model and as a subject of study a dwelling-house (a dormitory) located in Poland was chosen. The study also analyzed the influence of a retention tank size on efficiency of the economic use of rainwater utilization system for the dormitory. In the financial analysis two financial ratios were determined: the Net Present Value (*NPV*) and the Discounted Payback Period (*DPP*). The conducted analysis demonstrated that the use of the RWHS system in the analyzed building is cost-effective and that it may reduce water requirement for toilet flushing by 11 to 22%, depending on the capacity of the retention tank.

**Keywords:** rainwater harvesting system, rainwater management, drinking water savings, financial analysis