

Daniel SŁYŚ¹ i Agnieszka STEC¹

ANALIZA LCC WARIANTÓW ZAGOSPODAROWANIA WÓD DESZCZOWYCH W BUDYNKU WIELORODZINNYM

A LCC ANALYSIS OF RAINWATER MANAGEMENT IN MULTI-FAMILY BUILDING

Abstrakt: Przedstawiono wyniki analizy LCC dla kilku wariantów zagospodarowania wód opadowych dla projektowanego wielorodzinnego budynku mieszkalnego. Zgodnie z metodologią określania Life Cycle Cost wykonano obliczenia w pełnym cyklu istnienia przedsięwzięcia, uwzględniając zarówno nakłady inwestycyjne, jak i koszty użytkowania oraz konserwacji. Analiza LCC została przeprowadzona dla wariantu, w którym założono, że wody opadowe z dachu zostaną odprowadzone w całości do systemu kanalizacyjnego. Natomiast w drugim wariantcie tradycyjny dach budynku został zastąpiony dachem zielonym. Tego typu obiekty dzięki swoim właściwościom retencyjnym mogą opóźnić spływ wód opadowych i zredukować całkowity odpływ z powierzchni dachu, przez co zaliczane są do zrównoważonych systemów odwadniających (Sustainable Urban Drainage Systems). W trzecim przypadku zastosowano system gospodarczego wykorzystania wody deszczowej w budynku. Założono, że zmagazynowane w zbiorniku wody opadowe zostaną wykorzystane w instalacji sanitarnej do spłukiwania toalet, co pozwoli obniżyć koszty zakupu wody wodociągowej i wpłynie korzystnie na wyniki finansowe funkcjonowania obiektu mieszkalnego.

Słowa kluczowe: woda deszczowa, analiza LCC, rozwój zrównoważony

Wprowadzenie

Wody deszczowe stanowią część zasobów, które w naturalnym obiegu wody w przyrodzie zapewniają odnawialność wód powierzchniowych i podziemnych. W związku z tym wody te powinny być chronione przed degradacją i odpowiednio zagospodarowywane, zwłaszcza na terenach zurbanizowanych, gdzie w wyniku ciągłego wzrostu stopnia uszczelnienia powierzchni zdecydowana ilość wód deszczowych odprowadzana jest beзуżytecznie systemami kanalizacyjnymi do odbiorników.

Powszechnie dotychczas stosowane tradycyjne sposoby zagospodarowania wód opadowych polegające na jak najszybszym ich przejściu i odprowadzeniu do odbiornika nie uwzględniają negatywnego oddziaływania zrzutu ścieków z przelewów burzowych oraz bezpośredniego odprowadzenia nieoczyszczonych ścieków deszczowych. Metody te mogą powodować wiele niekorzystnych skutków w środowisku naturalnym, takich jak: obniżenie poziomu wód gruntowych, przesuszenie gleb, nasilenie zjawisk powodziowych w ciekach, zanieczyszczenie i zmiany morfologiczne rzek oraz zaburzenia w ekosystemach wodnych. Ponadto w czasie intensywnych opadów, w wyniku dopływu do sieci kanalizacyjnej nadmiernych ilości wód deszczowych, mogą występować przeciążenia hydrauliczne, których skutkiem są często podtopienia terenów i budynków oraz utrudnienia w komunikacji miejskiej.

Ograniczenie i zapobieganie tym negatywnym zmianom w środowisku wymaga zmiany sposobu myślenia i właściwego podejścia do zarządzania wodami opadowymi poprzez ukierunkowanie działań na rzecz zrównoważonej gospodarki tymi wodami.

¹ Katedra Infrastruktury i Ekorozwoju, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, email: daniels@prz.edu.pl, stec_aga@prz.edu.pl

Ramowa Dyrektywa Wodna Unii Europejskiej, która została przetransponowana do polskiego prawa, nakazuje gospodarowanie wodami opadowymi zgodnie z filozofią rozwoju zrównoważonego [1]. Według tej filozofii, wody deszczowe powinny być zatrzymane w części lub w całości w miejscu, gdzie opad wystąpił poprzez wykorzystanie naturalnych procesów retencji powierzchniowej i podziemnej oraz infiltracji wód do gruntu. Ponadto Ustawa Prawo wodne mówi o racjonalnym i całościowym traktowaniu zasobów wodnych z uwzględnieniem ich ilości i jakości oraz o gospodarowaniu wodą w taki sposób, aby nie dopuszczać do pogorszenia stanu ekosystemów wodnych, co bez zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi nie jest możliwe do osiągnięcia [2].

W publikacji analizie poddano trzy warianty zagospodarowania wód deszczowych dla budynku mieszkalnego wielorodzinnego zlokalizowanego w Rzeszowie (Polska). Z punktu widzenia użytkownika budynku, przy podejmowaniu decyzji o wyborze sposobu zagospodarowania wód deszczowych, jednym z najważniejszych czynników są koszty. Ponieważ obiektem badań jest nowo powstający budynek, jako narzędzie analizy wykorzystano metodologię LCC (*Life Cycle Cost*).

Metodologia LCC

Metodologia określenia kosztów istnienia obiektu, jako tzw. kosztów całego życia lub przez całe życie (LCC), jest techniką, która umożliwia dokonanie analizy porównawczej kosztów dla wyznaczonego przedziału czasu, uwzględniając wszystkie istotne czynniki ekonomiczne, odnoszące się do początkowych nakładów kapitałowych, jak i przyszłych kosztów eksploatacyjnych. Metoda ta jest bardzo przydatna między innymi przy ocenie przedsięwzięć inwestycyjnych, gdyż dzięki porównaniu przyszłych kosztów różnych rozwiązań alternatywnych pozwala na wybór najbardziej ekonomicznego projektu.

Dla każdego z przyjętych wariantów zagospodarowania wód opadowych oraz dla przyjętego czasu trwania inwestycji LCC wyznaczono z zależności [3]:

$$LCC = K_I + \left[\sum_{t=1}^T (1+r)^{-t} \right] \cdot K_E$$

gdzie: K_I - nakłady inwestycyjne [zł], K_E - koszty eksploatacyjne [zł], T - czas trwania analizy LCC, $T = 30$ lat, r - stała stopa dyskontowa, $r = 0,05$, t - kolejny rok użytkowania obiektu [-].

Analizę LCC systemu zagospodarowania wód deszczowych przeprowadzono dla budynku wielorodzinnego o następujących parametrach:

- liczba pięter: 4,
- liczba klatek: 2,
- liczba mieszkańców: 70,
- powierzchnia dachu, $F = 455 \text{ m}^2$,
- średniodobowe zapotrzebowanie na wodę do spłukiwania toalet w budynku: $2,45 \text{ m}^3/\text{d}$.

W obliczeniach wykorzystano dane archiwalne o wysokości opadów w ciągu okresu 10 lat dla miasta Rzeszowa. Średni opad roczny w tym okresie wyniósł 612 mm.

Warianty zagospodarowania wód deszczowych

Wariant I - Odprowadzenie wód opadowych z dachu budynku do sieci kanalizacyjnej

W wariantcie I założono, że wody opadowe z dachu zostaną w całości odprowadzone do istniejącej sieci kanalizacyjnej. W obliczeniach ilości spływających wód deszczowych przyjęto średni współczynnik spływu z połaci dachu $\psi = 0,8$.

Ze względu na to, że analiza kosztów inwestycji wykonywana jest pod kątem użytkownika obiektu, który nie ponosi nakładów finansowych na budowę sieci, w analizie LCC w tym przypadku uwzględniono tylko koszty eksploatacyjne, na które składają się opłaty za odprowadzenie wód opadowych do kanalizacji.

Wysokość opłaty została ustalona zgodnie z wytycznymi zawartymi w Rozporządzeniu Ministra Budownictwa w sprawie określania taryf, wzoru wniosku o zatwierdzenie taryf oraz warunków rozliczeń za zbiorowe zaopatrzenie w wodę i zbiorowe odprowadzenie ścieków [4]. Według tego rozporządzenia, opłata za odprowadzenie wód opadowych ustalana jest jako iloczyn wielkości powierzchni, z której odprowadzone są wody, oraz stawki dla danej grupy odbiorców za 1 m² powierzchni zanieczyszczonej, o trwałej nawierzchni lub w przypadku zainstalowania urządzenia pomiarowego jest to iloczyn ilości zarejestrowanego odpływu oraz stawki dla danej grupy odbiorców za 1 m³ zarejestrowanych wód opadowych. Dla analizowanego budynku przyjęto stawkę za 1 m² powierzchni dachu równą 1,1 zł/m²/rok.

Wariant II - Retencja wód opadowych na dachu zielonym

W wariantcie II tradycyjny dach budynku został zastąpiony dachem zielonym ekstensywnym o grubości warstwy substratu 10 cm i roślinnością typu rozchodniki.

Tego typu obiekty dzięki swoim właściwościom retencyjnym mogą opóźniać spływ wód opadowych i redukować całkowity odpływ z powierzchni dachu, przez co zaliczane są do zrównoważonych systemów odwadniających (*Sustainable Urban Drainage Systems*). Jak pokazują liczne badania, w zależności od typu i budowy dachu zielonego, mogą one redukować odpływ w granicach 60÷100% [5-7]. W przywołanych badaniach brane są pod uwagę nie tylko grubość oraz układ warstw dachu i ich wpływ na retencjonowanie wody, ale również nachylenie dachu. Niemieccy badacze [8, 9] doszli do wniosku, że spadek nie ma wpływu na ilość zmagazynowanej wody. Jednak zaprzeczają temu wyniki badań uzyskane przez innych naukowców, którzy poddali analizie dachy o różnym nachyleniu [6, 10, 11].

W analizowanym wariantcie przyjęto 2% spadek dachu i układ warstw jak na rysunku 1.

W analizie LCC przyjęto koszty wykonania dachu zielonego (tab. 1) o układzie warstw jak na rysunku 1. W nakładach inwestycyjnych nie uwzględniono kosztów związanych z wykonaniem konstrukcji o zwiększonej wytrzymałości. Wynika to z faktu, że analizowany dach charakteryzuje się niewielkim ciężarem i dla budynku o powierzchni 455 m² nie jest wymagane wzmocnienie jego konstrukcji.

Dachy ekstensywne po okresie aklimatyzacji są stosunkowo łatwe w utrzymaniu. Przy zastosowaniu roślinności sucholubnej, jak rozchodniki, rojniki czy niektóre mchy, nie potrzebują wiele wody. W związku z tym koszty eksploatacyjne na podstawie

analiz wykonanych i eksploatowanych dachów ekstensywnych przyjęto na poziomie 1 zł/m²/rok.

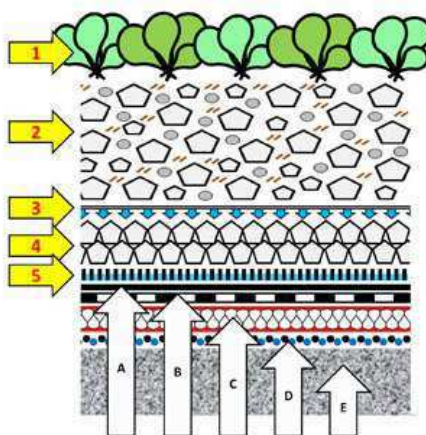
Koszt wykonania 1 m² dachu zielonego ekstensywnego

Tabela 1

The cost of the implementation of extensive green roof

Table 1

Warstwa	Cena jednostkowa [zł/m ²]
Roślinność ekstensywna	18,45
Substrat dachowy 10 cm	22,63
Geowłóknina filtracyjna	11,50
Drenaż z kruszyw nasiąkliwych 5 cm	5,23
Geowłóknina chłonna-ochronna PP	8,61
Materiały razem	66,42
Koszt robocizny	50
SUMA	116,42



Rys. 1. Przekrój przez warstwy analizowanego dachu: 1 - roślinność ekstensywna, 2 - substrat dachowy, 3 - geowłóknina filtracyjna, 4 - drenaż żwirowy, 5 - geowłóknina chłonna-ochronna, A - warstwa ślizgowa, B - hydroizolacja, C - termoizolacja, D - paraizolacja, E - konstrukcja nośna [12]

Fig. 1. Cross-section through the layers of the analyzed roof: 1 - extensive vegetation, 2 - growing medium, 3 - filter fabric, 4 - drainage layer, 5 - protection fabric, A - membrane, B - waterproofing membrane, C - thermal insulation, D - vapor barrier, E - supporting structure [12]

Ponadto uwzględniono koszty odprowadzania nadmiaru wód deszczowych, których dach po osiągnięciu maksymalnego poziomu nawodnienia nie był w stanie zmagazynować. Ilość tych wód została obliczona w modelu symulacyjnym na podstawie danych opadowych z okresu 10 lat. Średnia objętość odprowadzanych wód deszczowych do sieci kanalizacyjnej wynosiła 16,31 m³/rok. Koszt odprowadzenia 1 m³ wód opadowych określono na poziomie 3,0 zł/m³.

Wariant III - Wykorzystanie wody opadowej do spłukiwania toalet w budynku

Systemy gromadzące i wykorzystujące wody opadowe do podlewania ogrodów, mycia samochodów, prania czy spłukiwania toalet są od lat stosowane w wielu krajach na świecie [13-16]. W zależności od kraju, warunków klimatycznych, rodzaju budynku, w którym zainstalowany jest system wykorzystujący wody opadowe, oszczędność w zapotrzebowaniu na wodę wodociągową może sięgać nawet 60%.

Woda deszczowa do spłukiwania toalet może być wykorzystywana w budynkach mieszkalnych [17-19], w dużych obiektach sportowych [20], w obiektach uniwersyteckich [21] czy w supermarketach [22].

W Polsce systemy wykorzystujące wody opadowe do spłukiwania toalet są stosowane rzadko. Wyniki przeprowadzonych analiz nad możliwością zastosowania tych systemów w budynkach mieszkalnych przedstawiono m.in. w publikacjach [3, 23].

W analizowanym wariantcie wody opadowe z dachu zostaną odprowadzone do zbiornika zlokalizowanego w piwnicach. Na podstawie zapotrzebowania na wodę do spłukiwania toalet wyznaczono jego pojemność, $V_{zb} = 22,5 \text{ m}^3$. Woda ze zbiornika do misek ustępowych dostarczana będzie poprzez układ pompowy. W przypadku gdy ilość zmagazynowanych w zbiorniku wód deszczowych będzie niewystarczająca, to do zbiornika doprowadzona będzie woda z sieci wodociągowej.

Wyniki analizy

W każdym z wariantów w nakładach inwestycyjnych uwzględniono koszt wewnętrznej instalacji doprowadzającej wodę z sieci wodociągowej do spłukiwania toalet, który wynosił 22 500 zł. Ponadto w wariantcie II oprócz ww. kosztów w nakładach inwestycyjnych uwzględniono koszty wykonania zielonego dachu ekstensywnego (52 970 zł), a w wariantcie III koszt instalacji gospodarczej wykorzystującej wody opadowe. Określone w kosztorysie koszty inwestycyjne tego wariantu wynoszą 74 750 zł.

Z kolei w kosztach eksploatacyjnych każdego z wariantów wzięto pod uwagę koszty zakupu wody wodociągowej i odprowadzenia ścieków sanitarnych do kanalizacji. Przy obliczeniach wykorzystano następujące dane:

- cena zakupu 1 m^3 wody wodociągowej, $c_w = 3,72 \text{ zł}$;
- cena odprowadzenia 1 m^3 ścieków, $c_s = 3,11 \text{ zł}$;
- roczna ilość wody wodociągowej doprowadzanej do toalet: $894,25 \text{ m}^3$.

Zestawienie kosztów analizowanych wariantów inwestycyjnych

Tabela 2

Summary of the cost the analyzed investment options

Table 2

Wariant zagospodarowania wód opadowych	Koszty inwestycyjne [zł]	Koszty eksploatacyjne [zł]	Koszty LCC [zł]
Wariant I	22 500	100 890	123 390
Wariant II	75 470	94 660	170 130
Wariant III	97 300	89 850	187 150

Natomiast w analizie kosztów użytkowania wariantu III uwzględniono koszt zakupu energii elektrycznej zużytej do pompowania wody do odbiorców ze zbiornika magazynującego wody deszczowe ($c_e = 0,55$ zł/1 kWh).

Otrzymane wyniki analizy kosztów LCC przedstawiono w tabeli 2.

Wnioski

Przeprowadzona analiza LCC różnych wariantów zagospodarowania wód deszczowych dla budynku wielorodzinnego pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- najmniejsze koszty LCC uzyskano dla wariantu, w którym wody opadowe z dachu odprowadzane bezpośrednio do sieci kanalizacyjnej. Wynika to z faktu, że w wariantach II i III nie są ponoszone dodatkowe nakłady inwestycyjne, tak jak ma to miejsce w wariantach I i III. Jednak koszty eksploatacyjne w tym przypadku były największe;
- zastosowanie wariantów II i III dla przedmiotowego budynku nie jest obecnie opłacalne, zatem za ich wdrożeniem muszą przemawiać kryteria niefinansowe, np. kryteria ochrony środowiska. Koszty eksploatacyjne są tylko nieznacznie niższe w stosunku do wariantu I, co nie rekompensuje poniesionych nakładów inwestycyjnych;
- wdrożenie systemu gospodarczego wykorzystania wody deszczowej w analizowanym budynku jest najkosztowniejsze, a oszczędności wynikające z zastąpienia wody wodociągowej wodą deszczową są niskie i nie wpływają na podniesienie rentowności tej inwestycji;
- biorąc pod uwagę kryterium środowiskowe, zagospodarowanie wód opadowych w wariantach II i III ogranicza ilość wód odprowadzanych do kanalizacji, co korzystnie wpływa na odbiornik, którym najczęściej są wody powierzchniowe. Ponadto dachy zielone pochłaniają ditlenek węgla, wydzielają tlen, zatrzymują kurz i inne zanieczyszczenia;
- wariant II może wpłynąć również na poprawę ekonomiki użytkowania budynku. Dachy zielone dzięki swoim właściwościom termoizolacyjnym korzystnie oddziałują na mikroklimat w budynku. W lecie zapobiegają przegrzaniu, a zimą ograniczają straty ciepła, przez co wpływają na obniżenie kosztów ponoszonych na ogrzewanie budynku lub jego chłodzenie. Ponadto przeprowadzone za granicą badania pokazują, że dachy zielone są dwukrotnie trwalsze w stosunku do tradycyjnych pokryć dachowych.

Literatura

- [1] Ramowa Dyrektywa Wodna Unii Europejskiej, 2000/60/WE.
- [2] Ustawa Prawo wodne. DzU 2001, 115, 1229 (wraz z późniejszymi zmianami).
- [3] Słyś D, Bewszko T. LCC analysis of rainwater utilization system in multi-family residential buildings. Arch Environ Protect. 2010;36:107-118.
- [4] Rozporządzenie Ministra Budownictwa w sprawie określania taryf, wzoru wniosku o zatwierdzenie taryf oraz warunków rozliczeń za zbiorowe zaopatrzenie w wodę i zbiorowe odprowadzenie ścieków. DzU 2006, 127, 886.
- [5] Moran A, Hunt B, Jennings G. A North Carolina field study to evaluate green roof runoff quantity, runoff quality and plant growth. Proc 2nd North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities, Portland, June 2-4, 2004. Toronto: The Cardinal Group; 2004;446-460.

- [6] VanWoert ND, Rowe DB, Andresen JA, Rugh CL, Fernandez RT, Xiao L. Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope and media depth. *J Environ Qual.* 2005;34(3):1036-1044.
- [7] DeNardo JC, Jarrett AR, Manbeck HB, Beattie DJ, Berghage RD. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Trans ASABE.* 2005;48(4):1491-1496.
- [8] Liesecke HJ. Extensive begrünung bei 5 dachneigung. *Stadt und Grün.* 1999;48(5):337-346.
- [9] Schade C. Wasserrückhaltung und Abflußbeiwerte bei dünn-schichtigen extensivbegrünungen. *Stadt und Grün.* 2000;49(2):95-100.
- [10] Villarreal EL, Bengtsson L. Response of a Sedum green roof to individual rain events. *Ecol Eng.* 2005;25(1):1-7.
- [11] Getter K, Rowe B, Andresen J. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecol Eng.* 2007;31:225-231.
- [12] www.dachzielone.pl
- [13] Furumai H. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Phys Chem Earth.* 2008;33:340-346.
- [14] Jones M, Hunt W. Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States *Resour Conserv Recy.* 2010;54:623-629.
- [15] Coombes P. Rainwater Tanks Revisited: New opportunities for urban water cycle management. Australia: The University of Newcastle; 2003.
- [16] Ghisi E, Tavares D, Rocha V. Rainwater harvesting In petrol stations In Brasilia: Potential for notable water savings and investment feasibility analysis. *Resour Conserv Recy.* 2009;54:79-85.
- [17] Fewkes A. The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. *Build Environ.* 1999;34:765-772.
- [18] Ghisi E. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. *Build Environ.* 2006;41:1544-1550.
- [19] 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.
- [20] Zaizen M, Urakawa T, Matsumoto Y, Takai H. The collection of rainwater from dome stadiums in Japan. *Urban Water.* 1999;1:355-359.
- [21] Appan A. A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses. *Urban Water.* 1999;1:317-321.
- [22] Chilton J, Maidment G, Marriott D, Francis A, Tobias G. Case study of a rainwater recovery system in a commercial building with a large roof. *Urban Water.* 1999;1:345-354.
- [23] 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

A LCC ANALYSIS OF RAINWATER MANAGEMENT IN MULTI-FAMILY BUILDING

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Department of Infrastructure and Sustainable Development
Rzeszow University of Technology

Abstract: The paper presents results of the *Life Cycle Cost* (LCC) analysis carried out for several variants of rainfall water management in a newly designed multi-family dwelling house. According to the LCC methodology, calculations were performed for the whole undertaking life cycle with both investment outlays and operation/maintenance costs taken into account. The LCC analysis was carried out, in particular, for a variant assuming that the rainwater collected from the roof will be entirely discharged to the sewage system. On the other hand, the second variant provided for replacement of traditional building roof with a green one. Facilities of that type, thanks to their retention properties, may delay runoff of rainwater and reduce the overall quantity of water discharged from roof surface and therefore can be classified as *Sustainable Urban Drainage Systems*. In the third case considered, rainwater is to be utilised in the building. It was assumed that precipitation water will be stored in a tank and used in the sanitary water supply system for flushing toilets, thus reducing the overall tap water purchase costs.

Keywords: rainwater, LCC analysis, sustainable development