

dr inż. Damian Wieczorek^{1*)}

ORCID: 0000-0002-3191-2438

dr inż. Justyna Jaskowska-Lemańska²⁾

ORCID: 0000-0003-3116-0448

mgr inż. Natalia Klajmon¹⁾

Multi-criteria comparative analysis of green roof technologies using the PROMETHEE II method

Wielokryterialna analiza porównawcza technologii zielonych dachów z wykorzystaniem metody PROMETHEE II

DOI: 10.15199/33.2025.12.08

Abstract. The aim of this article is to analyze technological and material solutions for intensive green roofs and select the optimal variant using the PROMETHEE II multi-criteria comparative analysis method. Three intensive green roof variants were proposed, differing in their layering, materials, and functional characteristics. The highest rating was awarded to the variant consistent with decision priorities, in which the dominant criteria were: structural durability, rainwater retention capacity, potential for recreational roof use, and aesthetics. Additionally, the comparative analysis took into account the results of questionnaire surveys regarding the assessment of green roof features which, in the opinion of respondents, may be considered the most important when choosing technological and material solutions, and a study was conducted on the stability of the obtained ranking of green roof variants, which included a sensitivity analysis using Monte Carlo simulation and One-At-a-Time (OAT) analysis method.

Keywords: intensive green roofs; multi-criteria comparative analysis; PROMETHEE II method; Monte Carlo simulations; One-At-a-Time analysis.

Streszczenie. W artykule zaprezentowano analizę rozwiązań technologicznych i materiałowych intensywnych dachów zielonych oraz wybór optymalnego wariantu z wykorzystaniem wielokryterialnej metody analizy porównawczej PROMETHEE II. Zaproponowano trzy warianty intensywnych dachów zielonych, różniące się układem warstw, materiałami i cechami funkcjonalnymi. Najwyższą ocenę uzyskał wariant, w przypadku którego dominującymi kryteriami są: trwałość konstrukcji, retencja wody opadowej, możliwość rekreacyjnego użytkowania dachu oraz estetyka. Dodatkowo, w analizie porównawczej uwzględniono wyniki badań kwestionariuszowych dotyczące oceny cech dachów zielonych, które w opinii respondentów mogą być uznane za najistotniejsze przy wyborze rozwiązań technologicznych i materiałowych. Ponadto przeprowadzono badanie stabilności uzyskanego rankingu wariantów dachów zielonych, w ramach którego dokonano analizy wrażliwości z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo oraz analizy typu One-At-a-Time (OAT).

Słowa kluczowe: intensywne dachy zielone; wielokryterialna analiza porównawcza; metoda PROMETHEE II; symulacje Monte Carlo; analiza typu One-At-a-Time.

The construction sector is currently undergoing a multidimensional transformation driven by technological advances and the need to address environmental challenges. Traditional approaches, focused primarily on reducing costs and project lead times, are giving way to a model based on energy efficiency and responsible resource management. Buildings, as long-life structures, have a significant and lasting impact on the environment – they generate significant consumption of raw materials, energy, and water, as well as significant amounts of waste. Consequently, the concept of sustainable development is gaining importance as a key element of modern construction project management [1, 2].

Sustainable construction involves minimizing negative environmental impact while ensuring high-quality user experience. It encompasses technical, economic, ecological, and social aspects, and its essence is a shift from a quantitative to

Sektor budownictwa przechodzi obecnie wielowymiarową transformację wynikającą z postępu technologicznego oraz konieczności sprostania wyzwaniom środowiskowym. Tradycyjne podejście, koncentrujące się przede wszystkim na redukcji kosztów i czasu realizacji inwestycji, ustępuje miejsca modelowi opartemu na efektywności energetycznej i odpowiedzialnym gospodarowaniu zasobami. Budynek jako obiekt o długim cyklu życia mają znaczny i trwały wpływ na środowisko – generują duże zużycie surowców, energii i wody oraz znaczne ilości odpadów. W związku z tym zwiększa się znaczenie zrównoważonego rozwoju jako kluczowego elementu nowoczesnego zarządzania przedsięwzięciami budowlanymi [1, 2].

Zrównoważone budownictwo zakłada minimalizację negatywnego wpływu na środowisko przy jednoczesnym zapewnieniu bardzo dobrej jakości użytkowania i obejmuje aspekty techniczne, ekonomiczne, ekologiczne i społeczne. Rozwój zrównoważonego budownictwa jest nierozdzielnie związany z innowacjami technologicznymi. Wykorzystanie materiałów o małym śladzie węglowym, systemów zarządzania energią,

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

^{*)} Correspondence address: damian.wieczorek@pk.edu.pl

a qualitative paradigm based on efficiency and responsibility. The development of sustainable construction is inextricably linked to technological innovation. The use of low-carbon materials, energy management systems, renewable energy installations, and intelligent building management systems (BMS) can significantly reduce greenhouse gas emissions and optimize resource consumption [3, 4]. In this context, green roofs, solutions that combine technical and environmental functions, are particularly important.

Green roofs, whether extensive or intensive, improve the water balance of urban areas, increase rainwater retention, reduce the urban heat island effect, and support biodiversity. Furthermore, they improve the thermal insulation of buildings, while reducing energy demand [5]. Green roofs are therefore a crucial element of urban green infrastructure, supporting cities' adaptation to climate change and implementing sustainable development principles in practice. Choosing the right green roof system is a complex design process that depends on a number of technical, functional, and environmental factors. The most important include: the type of planned vegetation, the use of the roof surface, maintenance options, water availability, and building design parameters such as the load-bearing capacity of the flat roof and drainage system [6÷8].

The purpose of this article is to analyze technological and material solutions for intensive green roofs and to select the optimal variant using the PROMETHEE II multi-criteria comparative analysis method, which enables an objective comparison and prioritization of the considered variants. Additionally, the comparative analysis included the results of questionnaire surveys assessing the characteristics of green roofs that, in the respondents' opinion, may be considered most important when selecting technological and material solutions. A stability study of the resulting ranking of green roof variants was also conducted, including a sensitivity analysis using Monte Carlo simulation and One-At-a-Time (OAT) analysis.

Description of the variants selected for analysis

The following three variants of intensive green roofs were considered for analysis:

- **W1** – a system based on the classic, commonly used layered system with a thermal insulation layer made of extruded polystyrene (XPS); the vegetation layer was designed as a complex of medium-tall vegetation, including perennials and shrub species;
- **W2** – a solution characterized by the use of an increased vegetation layer thickness and an increased proportion of tall vegetation, including shrubs and low-stemmed trees; this configuration requires ensuring increased load-bearing capacity of the flat roof structure and increased water retention capacity of the system; the layer system was designed based on the concept of a so-called inverted roof, in which the waterproofing layer is located below the thermal insulation layer made of extruded polystyrene (XPS), characterized by high moisture resistance; the roof structure also incorporates a dif-

instalacji odnawialnych źródeł energii OZE, czy inteligentnych systemów zarządzania budynkiem BMS (ang. Building Management System) pozwala ograniczyć emisję gazów cieplarnianych i optymalizować zużycie zasobów [3, 4]. W tym kontekście szczególne znaczenie zyskują zielone dachy, czyli rozwiązania łączące funkcje techniczne i przyrodnicze.

Zielone dachy, o konstrukcji ekstensywnej lub intensywnej, poprawiają bilans wodny terenów miejskich, zwiększają retencję wód opadowych, redukują efekt miejskiej wyspy ciepła i wspierają bioróżnorodność. Ponadto poprawiają izolacyjność termiczną budynków, ograniczając przy tym zapotrzebowanie na energię [5]. Dachy zielone stanowią zatem istotny element zielonej infrastruktury miejskiej, sprzyjający adaptacji miast do zmian klimatycznych i wdrażaniu zasad zrównoważonego rozwoju w praktyce. Dobór właściwego systemu zielonego dachu jest uzależniony od wielu czynników technicznych, funkcjonalnych i środowiskowych. Do najbardziej istotnych zaliczyć można: rodzaj planowanej roślinności; sposób użytkowania powierzchni dachu; możliwości pielęgnacyjne; dostępność wody, a także parametry konstrukcyjne budynku, takie jak nośność stropodachu czy układ odwodnienia [6÷8].

W artykule przedstawiono analizę rozwiązań technologicznych i materiałowych intensywnych dachów zielonych oraz wybór optymalnego wariantu z wykorzystaniem wielokryterialnej metody analizy porównawczej PROMETHEE II, która umożliwia obiektywne porównanie i hierarchizację rozpatrywanych wariantów. Dodatkowo, w analizie porównawczej uwzględniono wyniki badań kwestionariuszowych dotyczące oceny cech dachów zielonych, które w opinii respondentów mogą być uznane za najbardziej istotne przy wyborze rozwiązań technologicznych i materiałowych. Ponadto przeprowadzono badanie stabilności uzyskanego rankingu wariantów dachów zielonych, w ramach którego dokonano analizy wrażliwości z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo oraz analizy typu One-At-a-Time (OAT).

Opis wariantów wybranych do analizy

Do analizy przyjęto następujące 3 warianty intensywnych dachów zielonych:

- **W1** – klasyczny, powszechnie stosowany system warstwowy z warstwą termoizolacyjną z polistyrenu ekstrudowanego (XPS); warstwę vegetacyjną zaprojektowano jako zespół nasadzeń obejmujących roślinność średniowysoką, w tym byliny oraz gatunki krzewiaste;
- **W2** – rozwiązanie z zastosowaniem zwiększonej miąższości warstwy vegetacyjnej oraz podwyższonym udziałem roślinności wysokiej, obejmującej krzewy i drzewa niskopienne; konfiguracja ta implikuje konieczność zapewnienia zwiększonej nośności konstrukcji stropodachu oraz zwiększonej pojemności retencyjnej układu; układ warstw został zaprojektowany wg koncepcji tzw. dachu odwróconego, w którym warstwa hydroizolacyjna usytuowana jest poniżej warstwy termoizolacyjnej wykonanej z polistyrenu ekstrudowanego (XPS), charakteryzującego się dużą odpornością na działanie wilgoci; w strukturze dachu przewidziano również warstwę dyfuzyjną,

fusion layer, designed for systems with increased water and biological loads, typical of intensive green roofs;

- **W3** – a solution characterized by a relatively low self-weight and reduced total layer thickness, making it suitable for intensive green roofs with limited structural capacity; the concept involves the use of low vegetation, primarily perennials and woody species, while maintaining a complete layered system ensuring effective water retention and thermal insulation; this system is based on a standard layered system, using double-layer thermal insulation made of stone wool, characterized by high thermal resistance and favorable diffusion properties.

The selection of the intensive green roof variants described above for comparative analysis is driven by decision-making guidelines that address ensuring the performance characteristics of the roof in terms of recreational use and maximum rainwater retention while simultaneously attempting to reduce the roof's weight. In the case of extensive roofs, the plant substrate is composed of lightweight mineral fractions that have low rainwater retention capacity. In intensive roofs, appropriate organic substrates are used as the substrate layer in the form of mixtures with increased water capacity, with a relatively wide range of layer thicknesses, from approximately 25 to even over 100 cm [9].

Table 1 summarizes information on the green roof layering in variants W1, W2, and W3, in the order of the layers' appearance in the structure, along with information on the thickness or thickness of each layer in centimeters provided in parentheses.

PROMETHEE II multi-criteria comparative analysis method

The complexity and diversity of technological solutions used in green roof systems pose a significant decision-making challenge for investors related to selecting the appropriate roof type for specific technical, economic, and environmental conditions. In this study, the authors conducted a multi-criteria analysis of three green roof variants using the PROMETHEE II method (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), which enables a comprehensive assessment and comparison of the considered solutions based on selected evaluation criteria. The PROMETHEE II method belongs to a group of popular multi-criteria analysis methods used in Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) decision-making processes. This method allows for a complete ranking of the analyzed alternatives based on pairwise comparisons, which allows for a hierarchical ranking of the considered solutions [11].

In the PROMETHEE II-based evaluation procedure, it is crucial to determine the preference function for each of the adopted criteria and assign them appropriate weights reflecting their relative importance in the decision-making process. Based on this data, global preference indices are calculated, which allow for the ordering of alternatives from most to least preferred. This method also enables the identification of criteria with the greatest impact on the final analysis result, which

dedykowaną systemom o zwiększonym obciążeniu wodnym i biologicznym, typowym w przypadku dachów intensywnych;

- **W3** – rozwiązanie charakteryzujące się niewielkim ciężarem własnym oraz zredukowaną grubością całkowitą warstw, co predysponuje je do zastosowania w dachach intensywnych o ograniczonej nośności konstrukcyjnej; koncepcja zakłada wykorzystanie roślinności niskiej, obejmującej głównie byliny oraz gatunki drzewiaste, przy jednoczesnym zachowaniu pełnego układu warstwowego zapewniającego efektywną retencję wody oraz izolacyjność cieplną; układ ten bazuje na standardowym systemie warstwowym, z zastosowaniem dwuwarstwowej izolacji termicznej z wełny skalnej, cechującej się bardzo dobrą izolacyjnością termiczną oraz korzystnymi właściwościami dyfuzyjnymi.

Wybór opisanych wariantów intensywnych dachów zielonych do analizy porównawczej wynika z wytycznych decyzyjnych, które odnoszą się do zapewnienia właściwości użytkowych umożliwiających rekreacyjne użytkowanie dachu oraz maksymalnego poziomu retencji wody opadowej przy jednoczesnej próbie ograniczenia ciężaru dachu. W przypadku dachów ekstensywnych, substrat roślinny tworzą lekkie frakcje mineralne, mające małą zdolność zatrzymania wody opadowej. W dachach intensywnych, na warstwę substratu stosowane są odpowiednie podłoża organiczne w postaci mieszanek o zwiększonej pojemności wodnej przy relatywnie dużym zakresie miąższości warstwy w przedziale od ok. 25 do nawet ponad 100 cm [9]. W tabeli 1 zestawiono informacje o uwarstwieniu zielonego dachu w wariantach W1, W2 i W3, w kolejności występowania warstw w konstrukcji, wraz z podaniem (w nawiasach) informacji o grubości lub miąższości danej warstwy.

Metoda wielokryterialnej analizy porównawczej PROMETHEE II

Złożoność oraz różnorodność rozwiązań technologicznych, stosowanych w systemach dachów zielonych powodują, że inwestorzy stają przed istotnym wyzwaniem decyzyjnym związanym z doбором odpowiedniego typu dachu do określonych uwarunkowań technicznych, ekonomicznych i środowiskowych. W artykule omówiono przeprowadzoną analizę wielokryterialną trzech wariantów dachów zielonych z wykorzystaniem metody PROMETHEE II (ang. Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), która umożliwia kompleksową ocenę i porównanie rozpatrywanych rozwiązań pod kątem wybranych kryteriów oceny. Metoda PROMETHEE II należy do grupy popularnych metod analizy wielokryterialnej, stosowanych w procesach decyzyjnych typu MCDA (ang. Multi-Criteria Decision Analysis). Umożliwia ona pełne uszeregowanie analizowanych alternatyw na podstawie porównań parami, co pozwala na uzyskanie hierarchicznego rankingu rozpatrywanych rozwiązań [11].

W procedurze oceny wg metody PROMETHEE II kluczowe znaczenie ma określenie funkcji preferencji w przypadku każdego z przyjętych kryteriów oraz przypisanie im odpowiednich wag odzwierciedlających ich względne znaczenie w procesie decyzyjnym. Na podstawie tych danych obliczane są wskaźniki preferencji globalnej, które umożliwiają uporządkowanie

Table 1. Informations on the green roof layering in variants W1, W2 and W3 [10]

Tabela 1. Informacje o uwarstwieniu zielonego dachu w wariantach W1, W2 i W3 [10]

Layering element / Element uwarstwienia	W1	Roof variant / Wariant dachu	
		W2	W3
Plant layer / Warstwa roślinna	medium-tall perennials and woody plants (10.0) / średniowysokie byliny i rośliny drzewiaste (10,0 cm)	large shrubs and small trees (10.0) / krzewy o dużych rozmiarach i małe drzewa (10,0 cm)	low perennials and woody plants (10.0) / niskie byliny i rośliny drzewiaste (10,0 cm)
Vegetation layer / Warstwa wegetacyjna	substrate for intensive greening (40.0) / substrat do zazielenienia intensywnego (40,0 cm)	intensive greening substrate (75.0) / substrat do zazielenienia intensywnego (75,0 cm)	intensive greening substrate (30.0) / substrat do zazielenienia intensywnego (30,0 cm)
Filter layer / Warstwa filtracyjna	geotextile 100 g/m ² (0.1) / geowłóknina 100 g/m ² (0,1 cm)	geotextile 150 g/m ² (0.1) / geowłóknina 150 g/m ² (0,1 cm)	geotextile 300 g/m ² (0.1) / geowłóknina 300 g/m ² (0,1 cm)
Drainage layer / Warstwa drenażowa	expanded clay (8.0) / keramzyt (8,0 cm)	expanded clay (4.0) / keramzyt (4,0 cm)	expanded clay (4.0) / keramzyt (4,0 cm)
Diffusion layer / Warstwa dyfuzyjna	–	PE/PP non-woven fabric (0.075) / włóknina PE/PP (0,075 cm)	–
Protective layer / Warstwa ochronna	absorbent and protective mat 500 g/m ² (0.5) / mata chłonno-ochronna 500 g/m ² (0,5 cm)	–	absorbent and protective mat 900 g/m ² (0.7) / mata chłonno-ochronna 900 g/m ² (0,7 cm)
Waterproofing / Hydroizolacja	PVC membrane (0.2) / membrana PVC (0,2 cm)	–	bituminous covering (0.5) / pokrycie bitumiczne (0,5 cm)
Separation layer / Warstwa separacyjna	glass non-woven fabric 120 g/m ² (0.1) / włóknina szklana 120 g/m ² (0,1 cm)	–	–
Thermal insulation / Izolacja termiczna	XPS extruded polystyrene (20.0) / polistyren ekstrudowany XPS (20,0 cm)	XPS extruded polystyrene for inverted roofs (20.0) / polistyren ekstrudowany XPS do dachów odwróconych (20,0 cm)	stone wool (26.0) / wełna skalna (26,0 cm)
Vapor barrier / Paroizolacja	vapor barrier foil (0.02) / folia paroizolacyjna (0,02 cm)	–	vapor barrier foil (0.02) / folia paroizolacyjna (0,02 cm)
Waterproofing / Hydroizolacja	–	FPO membrane (0.2) / membrana FPO (0,2 cm)	–
Construction layer / Konstrukcja	reinforced concrete slab (35.0) / płyta żelbetowa (35,0 cm)	reinforced concrete slab (35.0) / płyta żelbetowa (35,0 cm)	reinforced concrete slab (35.0) / płyta żelbetowa (35,0 cm)

facilitates the optimization of technological solution selection [12, 13].

The PROMETHEE II method assumes that for each criterion $f_1, f_2, \dots, f_k$, the following are assigned:

- a preference function $P_j(a, b)$, which determines the degree to which alternative a is preferred over alternative b with respect to criterion j ;

- a weight w_j , which reflects the relative importance of a given criterion in the decision-making process.

The evaluation process proceeds in the following stages [13]:

- 1) defining the set of alternatives $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$;
- 2) determining the set of criteria and assign them weights w_j ;
- 3) applying the preference function to each pair of alternatives (a_i, a_k) ;
- 4) calculating of the global preference index for each alternative from set A according to formula (1):

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \quad (1)$$

where: $\varphi^+(a)$ – output flow (preferences of a given option over others) calculated according to formula (2); $\varphi^-(a)$ – input flow (preferences of others over a given option) calculated according to formula (3); $\pi(a, b)$ – value of the preference aggregation function calculated according to formula (4); $\varphi(a) \in [-1, 1]$ – the final result interpreted according to the rule that the higher its value, the better the alternative.

alternatyw od najbardziej do najmniej preferowanej. Metoda ta pozwala ponadto na identyfikację kryteriów o największym wpływie na końcowy wynik analizy, co sprzyja optymalizacji wyboru rozwiązań technologicznych [12, 13].

Metoda PROMETHEE II zakłada, że w przypadku każdego z kryteriów $f_1, f_2, \dots, f_k$ przypisane zostają:

- funkcja preferencji $P_j(a, b)$ określająca stopień, w jakim alternatywa a jest preferowana względem alternatywy b w odniesieniu do kryterium j ;

- waga w_j odzwierciedlająca względne znaczenie danego kryterium w procesie decyzyjnym.

Proces oceny przebiega w następujących etapach [13]:

- 1) zdefiniowanie zbioru alternatyw $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$;
- 2) ustalenie zestawu kryteriów oraz przypisanie im wag w_j ;
- 3) zastosowanie funkcji preferencji do każdej pary alternatyw (a_i, a_k) ;
- 4) obliczenie wskaźnika preferencji globalnej w przypadku każdej alternatywy ze zbioru A zgodnie z formułą (1):

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \quad (1)$$

gdzie: $\varphi^+(a)$ – przepływ wyjściowy (przewaga danej opcji nad innymi), obliczony wg wzoru (2); $\varphi^-(a)$ – przepływ wejściowy (preferencje innych nad daną opcją) obliczony zgodnie ze wzorem (3); $\pi(a, b)$ – wartość funkcji agregacji preferencji obliczona wg formuły (4); $\varphi(a) \in [-1, 1]$ – wynik końcowy interpretowany zgodnie z regułą, że im większa wartość, tym lepsza jest alternatywa.

$$\varphi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A, b \neq a} \pi(a, b) \quad (2)$$

$$\varphi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A, b \neq a} \pi(a, b) \quad (3)$$

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k w_j \cdot P_j(a, b) \quad (4)$$

Results of a multi-criteria analysis incorporating the results of questionnaire studies assessing the characteristics of green roofs. In order to conduct a multi-criteria comparative analysis of green roof technologies using the PROMETHEE II method, it was necessary to first identify the key decision-making criteria influencing the selection of the appropriate technological solution. Based on the results of the questionnaire survey, which involved 98 respondents, eight of the most important evaluation criteria were identified, which, in the respondents' opinion, most significantly determine design decisions. Each criterion was rated on a five-point scale (1–5), and the obtained results were weighted according to the participants' professional competence level.

The first part of the research questionnaire involved identifying respondents, including obtaining information about their age, education, place of residence, and professional and/or educational affiliations (or lack thereof) with construction, architecture, environmental engineering, spatial planning, or other related technical fields. In terms of age, the largest group consisted of respondents between 18 and 25 years of age – 54 people, representing approximately 55.1% of all respondents. The group of respondents aged 26–35 included 20 people (approx. 20.4%), while 14 participants (approx. 14.3%) were in the 36–45 age group. The smallest group consisted of respondents between 46 and 65 years of age – 10 people (approx. 10.2%). The study did not record the participation of people over 65.

Respondents represented a diverse level of education:

- graduates of bachelor's or engineering studies – 36 respondents (approximately 36.7% share);
- persons with a master's degree or a master's degree in engineering – 33 respondents (approx. 33.7%);
- secondary education – 23 respondents (approx. 23.5%);
- holding a doctoral degree or higher – 6 respondents (approx. 6.1%).

The above data suggest that most study participants had at least basic academic training, which may influence their perception of green roof technology. Furthermore, the nearly 50% share of respondents in the age groups between 26 and 65 indicates that they acquired their knowledge from professionally active individuals with greater practical experience.

In the context of the respondents' place of residence, the largest share of respondents in the study was from rural areas – 48 people (approximately 49.0%). The second largest group were residents of large city centers – 27 (approx. 27.5%). Thirteen respondents (approx. 13.3%) indicated their place of residence in the suburbs, while the smallest share of respond-

$$\varphi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A, b \neq a} \pi(a, b) \quad (2)$$

$$\varphi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A, b \neq a} \pi(a, b) \quad (3)$$

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k w_j \cdot P_j(a, b) \quad (4)$$

Wyniki analizy wielokryterialnej uwzględniającej rezultaty badań kwestionariuszowych dotyczących oceny cech dachów zielonych. W celu przeprowadzenia wielokryterialnej analizy porównawczej technologii zielonych dachów z wykorzystaniem metody PROMETHEE II, konieczne było uprzednie określenie kluczowych kryteriów decyzyjnych mających wpływ na wybór odpowiedniego rozwiązania technologicznego. Na podstawie wyników przeprowadzonego badania kwestionariuszowego, w którym udział wzięło 98 respondentów, wyłoniono osiem najbardziej istotnych kryteriów oceny, które, w opinii respondentów, w największym stopniu determinują decyzje projektowe. Każde z kryteriów zostało ocenione w pięciostopniowej skali (1–5), a uzyskane wyniki poddano procedurze określenia wag zgodnie z poziomem kompetencji zawodowych uczestników badania.

Część pierwsza kwestionariusza badawczego obejmowała identyfikację respondentów w kontekście m.in. pozyskania informacji o wieku respondentów, ich wykształceniu, miejscu zamieszkania, czy powiązaniu zawodowym i/lub edukacyjnym (bądź braku powiązania) z budownictwem, architekturą, inżynierią środowiska, gospodarką przestrzenną lub inną, pokrewną dziedziną techniczną. Pod względem wieku, najliczniejszą grupę stanowili respondenci pomiędzy 18 a 25 rokiem życia – 54 osoby, co stanowi ok. 55,1% wszystkich badanych. Grupa respondentów w wieku 26–35 lat liczyła 20 osób (ok. 20,4%), natomiast w przedziale 36–45 lat, swój wiek zadeklarowało 14 uczestników (ok. 14,3%). Najmniej liczną grupę stanowili respondenci w wieku pomiędzy 46 a 65 rokiem życia – 10 osób (ok. 10,2%). W badaniu nie odnotowano udziału osób w wieku powyżej 65 lat.

Respondenci prezentowali zróżnicowany poziom wykształcenia:

- absolwenci studiów licencjackich lub inżynierskich – 36 osób (udział ok. 36,7%);
- osoby posiadające dyplom magistra lub magistra inżyniera – 33 osoby (ok. 33,7%);
- wykształcenie średnie – 23 respondentów (ok. 23,5%);
- posiadanie stopnia naukowego doktora lub wyższego – 6 respondentów (ok. 6,1%).

Dane te sugerują, że większość uczestników badania ma przynajmniej podstawowe przygotowanie akademickie, które może wpływać na sposób postrzegania rozwiązań technologicznych zielonych dachów. Ponadto blisko 50% udział respondentów w grupach wiekowych pomiędzy 26 a 65 rokiem życia wskazuje na pozyskanie w badaniu wiedzy od osób aktywnych zawodowo, które mają duże doświadczenie praktyczne.

W kontekście miejsca zamieszkania respondentów, największy udział w badaniu mieli mieszkańcy terenów wiejskich – 48 osób (udział ok. 49,0%). Drugą najliczniejszą grupę stanowili mieszkańcy centrów dużych miast – 27 osób (ok. 27,5%).

ents was recorded for small towns – 10 respondents (approx. 10.2%). The variation in the respondents' place of residence suggests that residents of rural areas or the suburbs, due to having their own property with a garden, may have a lower demand for solutions such as green roofs, unlike urban residents, where access to green spaces is often limited and the roof's function as a usable or biologically active space may be much more important.

To utilize the respondents' level of technical knowledge and experience in the second part of the survey to assess the characteristics of green roofs that, in their opinion, may be considered most important when selecting technological and material solutions, participants were asked to provide a positive or negative response to a question regarding their professional and/or educational affiliation with construction, architecture, environmental engineering, spatial planning, or other related technical fields. The following response profile was obtained:

- 32 respondents (approximately 32.65%) indicated a connection to construction;
- 4 respondents declared a connection to architecture, 10 to environmental engineering or spatial planning, and 18 to another related technical field, representing a total of 32 individuals (approx. 32.65%) in the group representing related technical fields;
- 34 respondents (approx. 34.7%) responded negatively, indicating they had no connection to any of the technical fields mentioned above.

This distribution indicates, on the one hand, a significant share of people with at least basic technical knowledge about green roofs, while the simultaneous presence of a large group of respondents with no technical background may enrich the analysis with the perspectives of users from outside the construction sector.

To reflect the varying levels of technical knowledge, the following weighting system was used in the second part of the study, devoted to assessing the importance of green roof features:

- **a weight of 3** was assigned to people professionally involved in construction;
- **a weight of 2** was assigned to respondents representing related technical fields (architecture, environmental engineering, spatial planning, and other similar fields);
- **a weight of 1** was applied to the responses provided by the remaining survey participants who were not associated with any technical field.

This approach allowed the authors to consider the diversity of perspectives and levels of expertise when constructing a set of decision-making preferences.

Table 2 presents complete information on the respondents' ratings of importance for two selected criteria: construction and maintenance costs and impact on air quality. The results were presented taking into account the distribution of responses according to the respondents' professional and/or educational connection (or lack thereof) with construction, architecture, environmental engineering, spatial management or another related technical field.

Jako miejsce swojego zamieszkania, przedmieście wskazało 13 badanych (ok. 13,3%), a najmniej respondentów pochodziło z małych miast – 10 osób (ok. 10,2%). Różnicowanie miejsca zamieszkania przez uczestników badania pozwala wnioskować o tym, że mieszkańcy terenów wiejskich lub przedmieść, z racji dysponowania nieruchomością z własnym ogrodem, mogą mieć mniejsze zapotrzebowanie na wprowadzanie rozwiązań takich jak zielone dachy w przeciwieństwie do mieszkańców miast, gdzie dostęp do zieleni jest często ograniczony, a funkcja dachu jako przestrzeni użytkowej lub biologicznie czynnej, może być znacznie bardziej istotna.

W części drugiej badań kwestionariuszowych, osoby biorące udział w badaniu zostały poproszone o udzielenie odpowiedzi pozytywnej lub negatywnej na pytanie dotyczące powiązania zawodowego i/lub edukacyjnego z budownictwem, architekturą, inżynierią środowiska, gospodarką przestrzenną lub inną, pokrewną dziedziną techniczną. Uzyskano następujący profil odpowiedzi:

- 32 osoby (udział ok. 32,65%) wskazały na powiązanie z budownictwem;
- 4 badanych zadeklarowało powiązanie z architekturą, 10 z inżynierią środowiska lub gospodarką przestrzenną, a 18 z inną, pokrewną dziedziną techniczną, co stanowi łącznie 32 osoby (ok. 32,65%) w grupie reprezentującej pokrewnie dziedziny techniczne;
- 34 osoby (ok. 34,7%) udzieliły odpowiedzi negatywnej i wskazały, że nie są powiązane z żadną z wymienionych dziedzin technicznych.

Rozkład ten wskazuje z jednej strony na istotny udział osób posiadających przynajmniej podstawową wiedzę techniczną o dachach zielonych, a jednocześnie obecność dużej grupy respondentów niemających powiązania z żadną dziedziną techniczną, może wzbogacić analizę o punkt widzenia użytkowników, którzy pochodzą spoza sektora budowlanego.

W celu odzwierciedlenia zróżnicowanego poziomu wiedzy technicznej, w drugiej części badania, poświęconej ocenie stopnia ważności cech dachów zielonych, zastosowano następujący system wag:

- **wagę 3** przypisano osobom zawodowo związanym z budownictwem;
- **wagę 2** przyporządkowano respondentom reprezentującym dziedziny techniczne pokrewne (architekturę, inżynierię środowiska lub gospodarkę przestrzenną oraz inne, podobne);
- **wagę 1** zastosowano w przypadku odpowiedzi udzielonych przez pozostałych uczestników badania, którzy nie są związani z żadną z dziedzin technicznych.

Takie podejście pozwoliło autorom uwzględnić różnorodność perspektyw i poziomu specjalistycznej wiedzy przy konstrukcji zbioru preferencji decyzyjnych.

W tabeli 2 przedstawiono komplet informacji o ocenie stopnia ważności, wskazanej przez respondentów dotyczącej dwóch wybranych kryteriów, tj. kosztu budowy i utrzymania oraz wpływu na jakość powietrza. Wyniki zaprezentowano z uwzględnieniem rozkładu odpowiedzi w zależności od powiązania zawodowego i/lub edukacyjnego respondentów (bądź jego braku) z budownictwem, architekturą, inżynierią środowiska, gospodarką przestrzenną lub inną, pokrewną dziedziną techniczną.

Table 2. Informations on the assessment of the degree of importance of selected criteria by respondents

Tabela 2. Informacje o ocenie stopnia ważności wybranych kryteriów przez respondentów

Respondent's relationship domain / Dziedzina powiązania respondenta	Rating 5 / Ocena 5	Rating 4 / Ocena 4	Rating 3 / Ocena 3	Rating 2 / Ocena 2	Rating 1 / Ocena 1
Evaluated criterion: Construction and maintenance costs (weighted average rating = 4.388) / Oceniane kryterium: koszt budowy i utrzymania (średnia ważona ocen = 4,388)					
Construction (rating weight = 3) / Budownictwo (waga oceny = 3)	17	9	6	–	–
Technical related (rating weight = 2) / Techniczna pokrewna (waga = 2)	19	9	4	–	–
No connection to a technical field (rating weight = 1) / Brak powiązania z dziedziną techniczną (waga = 1)	18	10	6	–	–
Total number of ratings (98) / Liczba ocen razem (98)	54	28	16	0	0
Evaluated criterion: Impact on air quality (weighted average rating = 3.093) / Oceniane kryterium: wpływ na jakość powietrza (średnia ważona ocen = 3,093)					
Construction (rating weight = 3) / Budownictwo (waga oceny = 3)	6	5	8	7	6
Technical related (rating weight = 2) / Techniczna pokrewna (waga = 2)	9	7	7	6	3
No connection to a technical field (rating weight = 1) / Brak powiązania z dziedziną techniczną (waga = 1)	10	4	4	6	10
Total number of ratings (98) / Liczba ocen razem (98)	25	16	19	19	19

Based on the collected data, weighted average ratings and normalized weights were calculated for each criterion. Further analysis resulted in the exclusion of the “impact on air quality” criterion, as respondents’ assessments of the importance of improving air quality through green roofs were fairly evenly distributed between high, neutral, and low ratings (Table 2), resulting in the lowest weighted average score for this criterion (of all assessed criteria), which was 3.093. Instead, the “wet roof weight” criterion was added. This criterion was assessed by five experts involved in the design and construction of green roofs due to its significant structural significance, particularly for the design and construction of low-weight green roofs, which impacts their suitability for use on flat roofs with limited load-bearing capacity, e.g., in existing buildings that have been in use for many years. The weighted average values of the criteria and the corresponding normalized weights adopted for further analysis are presented in Table 3.

The highest-rated factors included structure durability (K2) and wet roof weight (K8 – criterion assessed by experts). Other significant criteria included construction and maintenance costs (K1), aesthetics (K3), and technical properties, including thermal insulation (K4), acoustic insulation (K5), and rainwater retention (K6). The assessment

Na podstawie zgromadzonych danych obliczono średnie oceny ważne oraz znormalizowane wagi w przypadku poszczególnych kryteriów. W dalszej analizie zdecydowano o braku uwzględnienia kryterium pn. wpływ na jakość powietrza, ponieważ ocena respondentów dotycząca istotności poprawy jakości powietrza przez dachy zielone rozłożyła się dość równomiernie pomiędzy oceny wysokie, neutralne i niskie (tabela 2), co przełożyło się na najmniejszą wartość średniej ważonej oceny w przypadku tego kryterium (spośród wszystkich ocenianych kryteriów), wynoszącą 3,093. W zamian dodano kryterium pn. ciężar dachu, które zostało ocenione przez pięciu ekspertów związanych z projektowaniem i wykonawstwem dachów zielonych, ze względu na istotne znaczenie konstrukcyjne, szczególnie w przypadku projektowania i realizacji dachów zielonych o małym

ciężarze warstw. Wpływa on bowiem na możliwość ich zastosowania na stropodach o ograniczonej nośności, np. w budynkach już istniejących i użytkowanych od wielu lat. Wartości średnie ważne kryteriów oraz odpowiadające im wartości znormalizowane wag, przyjęte do dalszej analizy, przedstawiono w tabeli 3.

Wśród najwyższej ocenionych czynników znalazły się trwałość konstrukcji (K2) oraz ciężar dachu (K8 – kryterium ocenione ekspercko). Do pozostałych istotnych kryteriów zaliczono: koszt budowy i utrzymania (K1); estetykę (K3) oraz właściwości

Table 3. Green roof evaluation criteria and their standardized weights

Tabela 3. Kryteria oceny dachów zielonych i ich wagi znormalizowane

No/ Nr	Criterion / Kryterium	Weighted average / Średnia ważona	Normalized weight / Waga znormalizowana
K1	Construction and maintenance costs / Koszt budowy i utrzymania	4.388	0.134
K2	Structure durability / Trwałość konstrukcji	4.745	0.145
K3	Aesthetics / Estetyka	3.898	0.119
K4	Thermal insulation / Izolacyjność termiczna	4.194	0.128
K5	Acoustic insulation / Izolacyjność akustyczna	3.867	0.118
K6	Rainwater retention / Retencja wody opadowej	3.592	0.110
K7	Recreational use of the roof / Możliwość rekreacyjnego użytkowania dachu	3.806	0.117
K8*	Impact on air quality / Wpływ na jakość powietrza	3.093	criterion excluded from further analysis / kryterium wyłączone z dalszej analizy
K8	Wet roof weight / Ciężar dachu	4.200	0.129

also considered the potential for recreational use of the roof surface (K7), which is particularly important for residential and public buildings.

To enable comparison of individual green roof variants using the PROMETHEE II method, the input data was transformed into a normalized form, with a linear preference function selected for each comparative criterion, with data normalized to the range [0, 1] based on the minimum and maximum values observed in the dataset. The results are presented in Table 4, with parentheses indicating the nature of a given criterion (whether the criterion aims to maximize or minimize it) and the values of the assessed criteria relative to the adopted measures (columns W1, W2, and W3). Additionally, each of the criteria listed in the table is explained in terms of its definition and the adopted assessment scale.

In the next stage of the analysis, partial preferences were calculated for each pair of analyzed green roof variants

techniczne, obejmujące izolacyjność termiczną (K4), izolacyjność akustyczną (K5) i retencję wody opadowej (K6). W ocenie uwzględniono również możliwość rekreacyjnego użytkowania powierzchni dachu (K7), co ma szczególne znaczenie w przypadku obiektów mieszkalnych i użyteczności publicznej.

W celu porównania poszczególnych wariantów dachów zielonych z wykorzystaniem metody PROMETHEE II, dane wejściowe przekształcono do postaci znormalizowanej ze względu na wybór w przypadku każdego kryterium porównawczego, liniowej funkcji preferencji z normalizacją danych względem zakresu [0, 1], na podstawie wartości minimalnej i maksymalnej obserwowanej w zbiorze danych. Wyniki przedstawiono w tabeli 4, wskazując w nawiasach informacje o charakterze danego kryterium (czy kryterium dąży do jego maksymalizacji czy minimalizacji) oraz o wartościach ocenianych kryteriów względem przyjętych miar (kolumny W1, W2 i W3). Dodatkowo, każde z kryteriów wymienionych w tabeli zostało objaśnione w zakresie definicji oraz przyjętej skali oceny.

Table 4. Standardized values for the analyzed green roof variants
Tabela 4. Wartości znormalizowane analizowanych wariantów dachów zielonych

No / Nr	Criterion and its nature / Kryterium i jego charakter	Measure / Miara	Roof Variant / Wariant dachu		
			W1	W2	W3
K1	Construction and maintenance costs (criterion to be minimized) / Koszt budowy i utrzymania (kryterium do minimalizacji)	PLN / zł	0.71 (663,367.85)	0.00 (752,239.37)	1.00 (627,550.03)
Economic criterion assessed in terms of the total value of investment outlays (CAPEX) and operating costs (OPEX) in the first year of use of the roof / Kryterium ekonomiczne oceniane pod względem wartości sumarycznej nakładów inwestycyjnych (CAPEX) oraz kosztów eksploatacyjnych (OPEX) w pierwszym roku użytkowania dachu					
K2	Structure durability (criterion to be maximized) / Trwałość konstrukcji (kryterium do maksymalizacji)	1-5 points / 1-5 pkt	0.50 (4)	0.50 (4)	0.00 (3)
Technical criterion expressing the estimated value of the durability period of the roof layer system (scale of 1-5 points, where: 1 = period from 1 to 10 years, 5 = period from 41 to 50 years) / Kryterium techniczne wyrażające szacowaną wartość okresu trwałości układu warstw dachu (skala 1-5 pkt, gdzie: 1 = okres od 1 do 10 lat, 5 = okres od 41 do 50 lat)					
K3	Aesthetics (criterion to be maximized) / Estetyka (kryterium do maksymalizacji)	1-5 points / 1-5 pkt	0.50 (4)	1.00 (5)	0.00 (3)
Utility criterion assessed in terms of vegetation diversity, visual appeal, and consistency with the architecture (scale of 1-5 points, where: 1 = poor, 5 = high) / Kryterium użytkowe oceniane pod względem różnorodności roślinności, odbioru wizualnego oraz spójności z architekturą (skala 1-5 pkt, gdzie: 1 = słaba, 5 = wysoka)					
K4	Thermal insulation (criterion to be minimized) / Izolacyjność termiczna (kryterium do minimalizacji)	W/m ² ·K	0.78 (0.142)	0.00 (0.149)	1.00 (0.140)
Technical criterion assessed in terms of the heat transfer coefficient through the partition. / Kryterium techniczne oceniane pod względem wartości współczynnika przenikania ciepła przez przegrodę					
K5	Acoustic insulation (criterion to be maximized) / Izolacyjność akustyczna (kryterium do maksymalizacji)	1-5 points / 1-5 pkt	0.00 (3)	0.50 (4)	1.00 (5)
Technical criterion assessed in terms of limiting the impact of noise from external factors (scale 1-5 points, where: 1 = low, 5 = high) / Kryterium techniczne oceniane pod względem ograniczenia wpływu oddziaływania hałasu pochodzącego od czynników zewnętrznych (skala 1-5 pkt, gdzie: 1 = słabe, 5 = wysokie)					
K6	Rainwater retention (criterion to be maximized) / Retencja wody opadowej (kryterium do maksymalizacji)	l/m ²	0.23 (273)	1.00 (493)	0.00 (208)
Utility criterion assessed in terms of the ability to retain rainwater, particularly in the context of its impact on rainwater management in urban areas / Kryterium użytkowe oceniane pod względem zdolności do zatrzymania wody opadowej, szczególnie w kontekście wpływu na gospodarkę wodami opadowymi w terenach miejskich					
K7	Recreational use of the roof (criterion to be maximized) / Możliwość rekreacyjnego użytkowania dachu (kryterium do maksymalizacji)	1-5 points / 1-5 pkt	0.50 (4)	1.00 (5)	0.00 (3)
Utility criterion assessed in terms of the usable and design potential of the roof surface (scale 1-5 points, where: 1 = very low, 5 = very high) / Kryterium użytkowe oceniane pod względem potencjału użytkowego i aranżacyjnego powierzchni dachu (skala 1-5 pkt, gdzie: 1 = bardzo mały, 5 = bardzo duży)					
K8	Wet roof weight (criterion to be minimized) / Ciężar dachu w stanie mokrym (kryterium do minimalizacji)	kg/m ²	0.78 (734)	0.00 (1 304)	1.00 (577)
Technical criterion assessed in terms of structural significance (the low weight of the roof layers affects the possibility of its use on flat roofs with limited load-bearing capacity) / Kryterium techniczne oceniane pod względem znaczenia konstrukcyjnego (mały ciężar warstw dachu wpływa na możliwość jego zastosowania na stropodach o ograniczonej nośności)					

based on the eight adopted evaluation criteria using the PROMETHEE II method. The preference function $P_j(a, b)$ determines the degree to which variant a is preferred over variant b with respect to a given criterion j . Based on the obtained partial preference values and the normalized weights assigned to individual criteria, the preference aggregation function $\pi(a, b)$ was calculated. This function reflects the global advantage of variant a over variant b in a multi-criteria approach, providing the basis for further comparison of all analyzed solutions.

To determine the final ranking of variants, the PROMETHEE II method calculated three types of preference flows:

- outgoing flow (φ^+), indicating the average level of preference for a given variant over the others;
- incoming flow (φ^-), indicating the average level of preference for other variants relative to the analyzed one;
- net flow (φ), representing the difference between outgoing and incoming flows.

The net flow value measures the overall advantage of a variant. The higher its value, the better the evaluated option. The flows calculated in this way allow for the systematization and final ranking of the options according to their preferentiality within the adopted evaluation criteria. The results of the analysis are presented in Table 5.

Table 5. Preference flows
Tabela 5. Przepływy preferencji

Variant / Wariant	φ^+	φ^-	φ	Ranking position / Miejsce
W1	0,2555	0,3566	-0,1011	III
W2	0,3805	0,3083	0,0722	I
W3	0,3816	0,3527	0,0289	II

Sensitivity Analysis

To assess the stability of the resulting ranking of green roof variants, the authors conducted a sensitivity analysis using the following two methods:

- 1) Monte Carlo simulation with random selection of criterion weights;
- 2) OAT (One-At-a-Time) analysis, also known as single-factor sensitivity analysis, which examines the impact of changes in the values of individual criteria on the results of the comparative analysis and the ranking of variants.

Using these methods, the authors assessed the robustness of the PROMETHEE II method results to the uncertainty associated with determining decision preferences.

For the Monte Carlo sensitivity analysis, the impact of weight uncertainty on the variant ranking was assessed based on 5,000 samplings of the weight vector from the Dirichlet distribution (1, ..., 1). Each randomized set of weights summed to 1 and represented an acceptable, information-neutral scenario of decision preferences. For each sample, the aggregated preference matrix $P_j(a, b)$, outgoing (φ^+) and incoming (φ^-) flows, and net flow (φ) were calculated.

Based on the analysis of 5,000 trials, the probability of obtaining individual variant positions was calculated, which for variants are:

- W1 – approximately 3.4% that the variant will be the best, approx. 47.9% that it will be second, and approx. 48.7% that it will be third;

W kolejnym etapie analizy, z wykorzystaniem metody PROMETHEE II, przeprowadzono obliczenia preferencji cząstkowych, dotyczące każdej pary analizowanych wariantów dachów zielonych, względem przyjętych ośmiu kryteriów oceny. Funkcja preferencji $P_j(a, b)$ określa stopień, w jakim wariant a jest preferowany względem wariantu b ze względu na dane kryterium j . Na podstawie uzyskanych wartości preferencji cząstkowych oraz znormalizowanych wag, przypisanych poszczególnym kryteriom, obliczono wartości funkcji agregacji preferencji $\pi(a, b)$. Funkcja ta odzwierciedla globalną przewagę wariantu a nad wariantem b w ujęciu wielokryterialnym, stanowiąc podstawę do dalszego porównania wszystkich analizowanych rozwiązań.

W celu określenia końcowego rankingu wariantów w metodzie PROMETHEE II obliczono trzy rodzaje przepływu preferencji:

- przepływ wychodzący (φ^+), oznaczający średni poziom preferencji danego wariantu nad pozostałymi;
- przepływ przychodzący (φ^-), wskazujący średni poziom preferencji innych wariantów względem analizowanego;
- przepływ netto (φ), będący różnicą między przepływem wychodzącym a przychodzącym.

Wartość przepływu netto stanowi miernik ogólnej przewagi wariantu, przy czym im większa jest jego wartość, tym lepszy jest oceniany wariant. Obliczone w ten sposób przepływy umożliwiają usystematyzowanie i ostateczne uporządkowanie wariantów wg ich preferencyjności w ramach przyjętych kryteriów oceny. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 5.

Analiza wrażliwości

W celu oceny stabilności uzyskanego rankingu wariantów dachów zielonych przeprowadzono analizę wrażliwości z wykorzystaniem dwóch metod:

- 1) symulacji Monte Carlo z losowaniem wag kryteriów;
- 2) analizy typu OAT (ang. One-At-a-Time), zwanej również analizą czułości jednoczynnikowej, która polega na badaniu wpływu zmiany wartości pojedynczych kryteriów na wynik analizy porównawczej oraz ranking wariantów.

Za pomocą tych metod dokonano oceny odporności wyników metody PROMETHEE II na niepewność związaną z określaniem preferencji decyzyjnych. W przypadku analizy wrażliwości metodą Monte Carlo, ocenę wpływu niepewności wag na ranking wariantów wykonano na podstawie 5000 losowań wektora wag z rozkładu Dirichlet (1, ..., 1). Każdy wylosowany zestaw wag sumował się do 1 i reprezentował dopuszczalny, neutralny informacyjnie scenariusz preferencji decyzyjnych. W przypadku każdej próby obliczano macierz preferencji agregowanych $P_j(a, b)$, przepływy wychodzące (φ^+) i przychodzące (φ^-) oraz przepływ netto (φ).

Na podstawie analizy 5000 prób obliczono wartości prawdopodobieństwa uzyskania poszczególnych pozycji wariantów, które wynoszą w przypadku wariantu:

- W2 – approx. 84.5% that the variant will be the best, approx. 11.0% that it will be second, and approx. 4.5% that it will be third;

- W3 – approx. 12.1% that the variant will be the best, approx. 41.1% that it will be second, and approx. 46.8% that it will be third.

Figure 1 presents a graphical interpretation of the probability values of obtaining individual ranking positions for variants W1, W2, and W3, as well as the statistics of the net flow distributions (ϕ), which indicate the following observations:

- W1 – values are mostly negative;
- W2 – values are mostly positive with a negligible share of negative values;
- W3 – values are mostly negative, but also reach positive values.

Additionally, the authors estimated the Spearman coefficient between the baseline ranking and the rankings derived from Monte Carlo experiments. The Spearman coefficient averaged approximately 0.40, indicating moderate stability of the global ranking structure. The One-At-a-Time (OAT) analysis was based on the assumption that each weight was independently modified within a range of 75% to 125% ($\pm 25\%$) of the baseline value of a given criterion in 11 approaches for each criterion. After each weight was modified, renormalization was performed, and then the net flow values (ϕ) were calculated. Table 6 summarizes the number of cases in which each variant was the best (ranked first).

The results of the OAT analysis indicate the following conclusions:

- Variant W1 does not achieve first place in any of the simulated scenarios;

- W1 – ok. 3,4%, że wariant będzie najlepszy, ok. 47,9%, że będzie drugi oraz ok. 48,7%, że będzie trzeci;

- W2 – ok. 84,5%, że wariant będzie najlepszy, ok. 11,0%, że będzie drugi oraz ok. 4,5%, że będzie trzeci;

- W3 – ok. 12,1%, że wariant będzie najlepszy, ok. 41,1%, że będzie drugi oraz ok. 46,8%, że będzie trzeci.

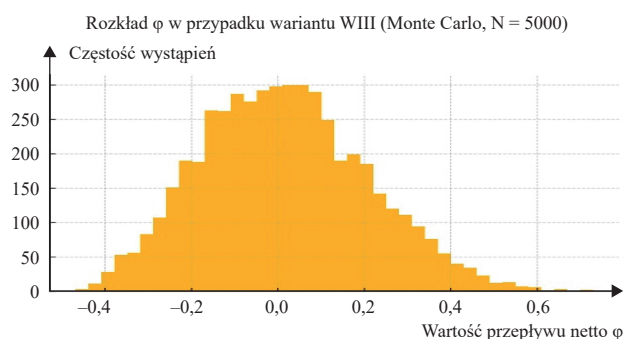
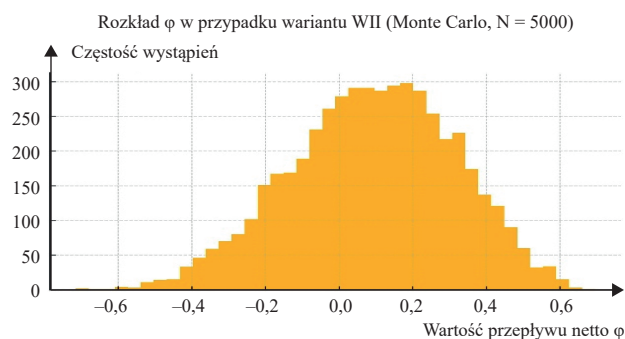
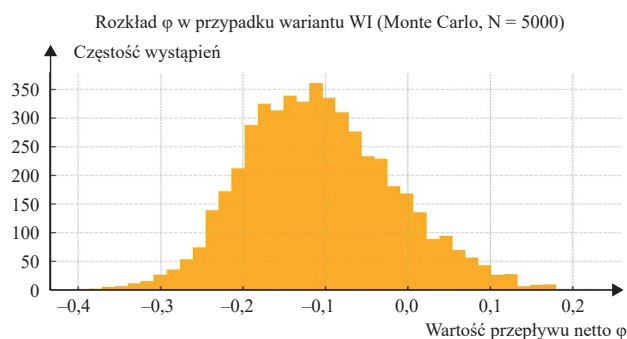
Rysunek przedstawia interpretację wartości prawdopodobieństwa uzyskania poszczególnych pozycji rankingu przez warianty W1, W2 i W3 oraz statystykę rozkładów przepływów netto (ϕ), które wskazują, że w przypadku wariantu:

- W1 – wartości są w większości ujemne;
- W2 – wartości przyjmują najczęściej wartości dodatnie przy znikomym udziale wartości ujemnych;
- W3 – wartości skupiają się w większości wokół wartości ujemnych, ale osiągają również wartości dodatnie.

Dodatkowo oszacowano wartość współczynnika Spearmana między rankingiem bazowym a rankingami wynikającymi z prób Monte Carlo. Jego wartość wyniosła średnio ok. 0,40, co oznacza umiarkowaną stabilność globalnej struktury rankingu. Analiza typu One-At-a-Time (OAT) bazowała z kolei na założeniu, zgodnie z którym dokonano niezależnej modyfikacji każdej z wag w zakresie wynoszącym od 75% do 125% ($\pm 25\%$) wartości bazowej danego kryterium w 11 podejściach na każde z kryteriów. Po zmianie każdej wagi dokonywano renormalizacji, a następnie obliczano wartości przepływów netto (ϕ). W tabeli 6 zestawiono informacje o liczbie przypadków, w których dany wariant był najlepszy (pierwsza pozycja w rankingu).

Wyniki analizy OAT wskazują, że wariant:

- W1 nie osiąga pierwszego miejsca w żadnym z zasymulowanych scenariuszy;



Monte Carlo simulation results – histograms of net flow distribution values (ϕ) and a summary of the probability values of taking a given position in the ranking by variants W1, W2 and W3

Wyniki symulacji Monte Carlo – histogramy wartości rozkładów przepływów netto (ϕ) oraz zestawienie wartości prawdopodobieństwa zajęcia danej pozycji w rankingu przez warianty W1, W2 i W3

Table 6. OAT analysis results – number of cases in which a given variant was the best*Tabela 6. Wyniki analizy OAT – liczba przypadków, w których dany wariant był najlepszy*

No / Nr	Criterion / Nazwa kryterium	W1	W2	W3
K1	Construction and maintenance costs / Koszt budowy i utrzymania	0 (0.0%)	9 (81.8%)	2 (18.2%)
K2	Structure durability / Trwałość konstrukcji	0 (0.0%)	10 (90.9%)	1 (9.1%)
K3	Aesthetics / Estetyka	0 (0.0%)	11 (100.0%)	0 (0.0%)
K4	Thermal insulation / Izolacyjność termiczna	0 (0.0%)	10 (90.9%)	1 (9.1%)
K5	Acoustic insulation / Izolacyjność akustyczna	0 (0.0%)	11 (100.0%)	0 (0.0%)
K6	Rainwater retention / Retencja wody opadowej	0 (0.0%)	11 (100.0%)	0 (0.0%)
K7	Recreational use of the roof / Możliwość rekreacyjnego użytkowania dachu	0 (0.0%)	11 (100.0%)	0 (0.0%)
K8	Wet roof weight / Ciężar dachu w stanie mokrym	0 (0.0%)	11 (100.0%)	0 (0.0%)
Total number of times a given variant was the best / Łączna liczba przypadków, w których dany wariant był najlepszy		0 (0.0%)	84 (95.5%)	4 (4.5%)

■ Variant W2 remains the best in 84 (approximately 95.5%) cases of the simulated scenarios for each comparative criterion;

■ Variant W3 takes first place in a few cases – primarily for criteria K1 (construction and maintenance cost), K2 (structure durability), and K4 (thermal insulation).

Based on the results obtained in the OAT analysis, it can also be concluded that the final ranking is very robust to individual changes in the criterion weight.

■ W2 pozostaje najlepszy w 84 przypadkach scenariuszy symulowanych dla każdego kryterium porównawczego (ok. 95,5%);

■ W3 zajmuje pierwsze miejsce w nielicznych przypadkach – przede wszystkim w kryteriach K1 (koszt budowy i utrzymania), K2 (trwałość konstrukcji) oraz K4 (izolacyjność termiczna).

Na podstawie wyników analizy OAT stwierdzono, że ranking końcowy jest bardzo odporny na jednostkowe zmiany wag kryteriów.

Discussion of results

Questionnaire studies and multi-criteria analysis using the PROMETHEE II method provided consistent data on the perception and effectiveness of green roof technology. Respondents rated it as a solution with significant technical, aesthetic, and functional potential. Criterion K2 – structural durability – received the highest importance rating (weighted average of respondents' ratings = 4.745). Criterion K4 – thermal insulation – also received a high rating (4.194), indicating the importance of practical and long-term benefits, such as energy savings and extending the building's useful life. K1 – construction and maintenance costs (4.388) also remained a key decision-making factor in the respondents' assessment. Criteria K3 – aesthetics (3.898) and K7 – recreational use of roofs (3.806) also received high importance ratings among respondents, confirming their perception as elements that improve the quality of life, especially in urban areas. Ratings for criteria K6 – rainwater retention (3.592) and K8 – impact on air quality (3.093) were more varied, which may be due to limited ability to observe environmental effects and differences in the respondents' level of environmental knowledge. Despite this, some respondents perceive significant pro-ecological potential in green roofs, demonstrating a growing awareness of the importance of green infrastructure in adapting to climate change.

Multi-criteria analysis performed using the PROMETHEE II method confirmed the convergence of

Dyskusja wyników

Badania kwestionariuszowe oraz analiza wielokryterialna z wykorzystaniem metody PROMETHEE II dostarczyły spójnych danych na temat postrzegania i efektywności technologii dachów zielonych. Respondenci ocenili je jako rozwiązanie o dużym potencjale technicznym, estetycznym i użytkowym. Najwyżej oceniono stopień ważności kryterium K2 – trwałość konstrukcji (średnia ważona ocen respondentów = 4,745), a następnie kryterium K4 – izolacyjność termiczna (4,194), co wskazuje na znaczenie praktycznych i długofalowych korzyści, takich jak oszczędność energii czy wydłużenie okresu użytkowania budynku. Kluczowym czynnikiem decyzyjnym, w ocenie respondentów, pozostaje również K1 – koszt budowy i utrzymania (4,388). Wysokie oceny stopnia ważności wśród respondentów uzyskały ponadto kryteria K3 – estetyka (3,898) oraz K7 – możliwość rekreacyjnego użytkowania dachów (3,806), co potwierdza ich postrzeganie jako elementów poprawiających jakość życia, głównie w obszarach miejskich. Oceny dotyczące kryterium K6 – retencja wody opadowej (3,592) oraz K8 – wpływ na jakość powietrza (3,093) były bardziej zróżnicowane, co może wynikać z ograniczonej możliwości obserwacji efektów środowiskowych oraz różnic w poziomie wiedzy proekologicznej respondentów. Mimo tego, część z nich dostrzega w zielonych dachach istotny potencjał proekologiczny, co świadczy o zwiększającej się świadomości znaczenia zielonej infrastruktury w adaptacji do zmian klimatu.

subjective ratings with quantitative results. The highest net preference index was achieved by variant W2 ($\varphi = 0.0722$), which was also characterized by the highest outgoing flow ($\varphi^+ = 0.3805$) and relatively low incoming flow ($\varphi^- = 0.3038$). This means that in most pairwise comparisons, this variant was preferred over the other options, and its balance of advantages indicates the highest level of compliance with the adopted criteria. Second place went to variant W3 ($\varphi = 0.0289$), which, despite its high outgoing flow ($\varphi^+ = 0.3816$), was also characterized by a significant incoming flow ($\varphi^- = 0.3527$), indicating more balanced but less clear-cut ratings. Variant W1 ($\varphi = -0.1011$) received the lowest rating, which resulted from both a low level of outgoing preferences ($\varphi^+ = 0.2555$) and a high incoming flow ($\varphi^- = 0.3566$), indicating its relatively lower attractiveness in pairwise comparisons.

The results of the questionnaire surveys presented in Table 3 and the multi-criteria analysis (Table 5) lead to the conclusion that the features rated **highest by respondents, i.e., durability, thermal efficiency, and usable functionality of green roofs, had a direct impact on the final hierarchy of variants in the analysis using the PROMETHEE II method.** This indicates consistency between the subjective opinions of users and the objective results of the decision problem analysis, which also confirms the validity of the adopted evaluation criteria.

The sensitivity analysis performed using the Monte Carlo simulation method clearly indicates the stability of the W2 variant. Even with significant variation in decision preferences, **W2 remains the best option in approximately 84.5% of the simulated scenarios.** W3 (the best option in approx. 12.1% of the simulated scenarios) is a potential alternative to W2, but its dominance appears only within a limited range of criterion weighting variations.

A One-At-a-Time (OAT) study confirmed that the final ranking of variants is highly resistant to individual changes in criterion weights. **Variant W2 remains the most favorable green roof solution in approximately 95.5% of all decision preference scenarios.** The study shows that criteria K1 – construction and maintenance costs, K2 – structural durability, and K4 – thermal insulation – have the greatest impact on the variability of results. In two scenarios involving changes in the weight range for criterion K1 (approx. 18.2% of 11 locally simulated cases within this criterion) and in one scenario involving changes in the weight ranges for criteria K2 and K4 (approx. 9.1% of cases each), variant W3 proved to be a potential alternative to variant W2. Variant W1, on the other hand, remained the least favorable. In none of the simulated cases did this variant take first place in the ranking.

Summary

The aim of this article was to analyze technological and material solutions for intensive green roofs and select the optimal variant using the PROMETHEE II multi-criteria analysis method.

Analiza wielokryterialna wykonana metodą PROMETHEE II potwierdziła zbieżność ocen subiektywnych z wynikami ilościowymi. Najwyższą wartość wskaźnika preferencji netto uzyskał wariant W2 ($\varphi = 0.0722$), który jednocześnie charakteryzował się najwyższym przepływem wychodzącym ($\varphi^+ = 0.3805$) i relatywnie niskim przepływem przychodzącym ($\varphi^- = 0.3038$). Oznacza to, że w większości porównań parami, wariant ten był preferowany, a jego bilans przewagi wskazuje na najwyższy poziom zgodności z przyjętymi kryteriami. Na drugiej pozycji uplasował się wariant W3 ($\varphi = 0.0289$), który mimo wysokiego przepływu wychodzącego ($\varphi^+ = 0.3816$) charakteryzował się również znacznym przepływem przychodzącym ($\varphi^- = 0.3527$), co świadczy o bardziej zrównoważonych, lecz mniej jednoznacznych ocenach. Wariant W1 ($\varphi = -0.1011$) uzyskał najniższą ocenę, co wynikało zarówno z niskiego poziomu preferencji wychodzących ($\varphi^+ = 0.2555$), jak i wysokiego przepływu przychodzącego ($\varphi^- = 0.3566$), co wskazuje na relatywnie niższą atrakcyjność tego wariantu w porównaniach parami.

Zestawienie wyników badań kwestionariuszowych zaprezentowanych w tabeli 3 i analizy wielokryterialnej (tabela 5) prowadzi do wniosku, że **najwyżej oceniane przez respondentów cechy, tj. trwałość, efektywność termiczna oraz funkcjonalność użytkowa dachów zielonych, miały bezpośredni wpływ na końcową hierarchię wariantów w analizie z wykorzystaniem metody PROMETHEE II.** Wskazuje to na spójność subiektywnych opinii użytkowników z obiektywnymi wynikami analizy problemu decyzyjnego, co również potwierdza trafność przyjętych kryteriów oceny.

Analiza wrażliwości, wykonana metodą symulacji Monte Carlo, jednoznacznie wskazuje na stabilność wyboru wariantu W2. Nawet przy znacznym zróżnicowaniu preferencji decyzyjnych, **wariant W2 pozostaje najlepszy w przypadku ok. 84,5% symulowanych scenariuszy.** Wariant W3 (najlepszy w ok. 12,1% symulowanych scenariuszy) stanowi potencjalną alternatywę dla wariantu W2, ale jego dominacja pojawia się jedynie w ograniczonym zakresie zmienności wag kryteriów.

Badanie wykonane metodą One-At-a-Time (OAT) potwierdziło, że ranking końcowy wariantów jest bardzo odporny na jednostkowe zmiany wag kryteriów. **Wariant W2 pozostaje najbardziej korzystnym rozwiązaniem dachu zielonego w ok. 95,5% wszystkich przypadków scenariuszy preferencji decyzyjnych.** Z przeprowadzonego badania wynika, że największy wpływ na zmienność wyników wykazują kryteria: K1 – koszt budowy i utrzymania; K2 – trwałość konstrukcji i K4 – izolacyjność termiczna. W dwóch scenariuszach zmiana zakresu wag w przypadku kryterium K1 (ok. 18,2% lokalnie symulowanych 11 przypadków w ramach tego kryterium) oraz w jednym ze scenariuszy zmiany zakresu wag kryteriów K2 i K4 (po ok. 9,1% przypadków), wariant W3 okazał się potencjalną alternatywą dla wariantu W2. **Wariant W1 pozostał natomiast najmniej korzystny.** W żadnym z symulowanych przypadków wariant ten nie zajął pierwszego miejsca w rankingu.

The authors decided to use the PROMETHEE II method because of its ability to model preference functions based on the nature of a given comparative criterion or the preferences of an expert who can participate in the evaluation of decision-making options. Furthermore, in the authors' opinion, the PROMETHEE II method stands out from other multi-criteria comparative analysis methods (such as AHP, ELECTRE, VIKOR, COPRAS, or TOPSIS) for its intuitive interpretation of results, its seamless handling of qualitative criteria (even when there are a large number of such criteria), and the high robustness of the PROMETHEE II results to data changes or the uncertainty associated with determining decision preferences, which was confirmed by the authors in a sensitivity study using Monte Carlo simulation with randomized criterion weights and in an OAT (One-At-a-Time) analysis, which involves gradual modification of the weights of individual criteria.

Three intensive green roof variants were selected for multi-criteria analysis, differing in their layer layout, materials used, and functional scope. To determine preferences and the hierarchy of decision-making criteria, a questionnaire survey was conducted, which identified the most significant factors influencing the choice of technology and the design of green roofs: K2 – structural durability (weighted average of respondents' ratings = 4.745), K1 – construction and maintenance costs (4.388), and K4 – thermal insulation (4.194). Respondents believed that technical and economic aspects remain key elements in implementing green roof solutions in investment practice.

Variant W2 achieved the highest net preference index in the multi-criteria analysis conducted using the PROMETHEE II method, which aligns with the decision-making priorities. For this variant, the dominant criteria are K2 – structural durability, K6 – rainwater retention, K7 – potential for recreational roof use, and K3 – aesthetics. The net flow value was $\phi = 0.0722$, with the highest outgoing flow rate of $\phi^+ = 0.3805$ and a relatively low incoming flow rate of $\phi^- = 0.3038$. This means that in most pairwise comparisons, this variant was preferred over the other options (variants W3 and W1), and its balance of advantages indicates the highest level of compliance with the adopted criteria. The result of the multi-criteria analysis regarding the selection of variant W2 was confirmed in a sensitivity analysis, which the authors conducted using Monte Carlo simulation method and One-At-a-Time (OAT) analysis.

Podsumowanie

Analizę rozwiązań technologicznych i materiałowych intensywnych dachów zielonych oraz wybór wariantu optymalnego przeprowadzono z wykorzystaniem metody analizy wielokryterialnej PROMETHEE II ze względu na możliwość modelowania funkcji preferencji w odniesieniu do charakteru danego kryterium porównawczego oraz preferencji eksperta, który może brać udział w ocenie wariantów decyzyjnych. W naszej opinii metoda PROMETHEE II wyróżnia się na tle innych metod wielokryterialnej analizy porównawczej (jak np. AHP, ELECTRE, VIKOR, COPRAS, czy TOPSIS) intuicyjnością w interpretacji wyników, bezproblemową obsługą kryteriów jakościowych (nawet w przypadku dużej liczby występowania kryteriów tego rodzaju), a także dużą odpornością wyników metody PROMETHEE II na zmianę danych lub niepewność związaną z określeniem preferencji decyzyjnych. Zostało to potwierdzone w badaniu wrażliwości z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo z losowaniem wag kryteriów oraz w analizie OAT (One-At-a-Time), polegającej na stopniowej modyfikacji wag pojedynczych kryteriów.

Do analizy wielokryterialnej wybrano trzy warianty intensywnych dachów zielonych, różniące się układem warstw, zastosowanymi materiałami oraz zakresem funkcji użytkowych. W celu określenia preferencji i hierarchii kryteriów decyzyjnych przeprowadzono badania kwestionariuszowe, które pozwoliły zidentyfikować najbardziej istotne czynniki wpływające na wybór technologii i sposób projektowania dachów zielonych, tj. K2 – trwałość konstrukcji (średnia ważona ocen respondentów = 4,745); K1 – koszty budowy i utrzymania (4,388) oraz K4 – izolacyjność termiczna (4,194). W opinii respondentów aspekty techniczne i ekonomiczne pozostają nadal kluczowymi elementami przy wdrażaniu rozwiązań dachów zielonych w praktyce inwestycyjnej.

Największą wartość wskaźnika preferencji netto w analizie wielokryterialnej, wykonanej metodą PROMETHEE II, uzyskał wariant W2, który jest zgodny z priorytetami decyzyjnymi. W przypadku tego wariantu, dominującymi kryteriami są: K2 – trwałość konstrukcji; K6 – retencja wody opadowej; K7 – możliwość rekreacyjnego użytkowania dachu oraz K3 – estetyka. Wartość przepływu netto wyniosła $\phi = 0,0722$ przy jednoczesnym, najwyższym poziomie przepływu wychodzącego $\phi^+ = 0,3805$ i relatywnie niskim poziomie przepływu przychodzącego $\phi^- = 0,3038$. Oznacza to, że w większości porównań parami, wariant ten był preferowany bardziej niż pozostałe warianty (W3 i W1), a jego bilans przewagi wskazuje na najwyższy poziom zgodności z przyjętymi kryteriami. Wynik analizy wielokryterialnej dotyczący wyboru wariantu W2 został potwierdzony w analizie wrażliwości, którą przeprowadziliśmy z wykorzystaniem metod symulacji Monte Carlo oraz analizy typu One-At-a-Time (OAT).

Received: 10.07.2025

Revised: 19.08.2025

Published: 23.12.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 10.07.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 19.08.2025 r.

Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Lima L, Trindade, E, Alencar L, Alencar M, & Silva, L. Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. *J of Clean Prod.* 2021;289:125730. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730>
- [2] Wang, K, Guo, F, Zhang, C, & Schaefer, D. From Industry 4.0 to Construction 4.0: barriers to the digital transformation of engineering and construction sectors. *Eng, Constr and Arch Man.* 2024;31(1):136-158. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2022-0383>
- [3] Ferreira A, Pinheiro MD, de Brito J, & Mateus R. A critical analysis of LEED, BREEAM and DGNB as sustainability assessment methods for retail buildings. *J of Build Eng.* 2023;66:105825. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105825>
- [4] Gao G, Li J, & Wen Y. Deep Comfort: Energy-efficient thermal comfort control in buildings via reinforcement learning. *IEEE Int of Th J.* 2020;7(9):8472-8484. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2992117>
- [5] Saadatian O, Sopian K, Salleh E, Lim CH, Riffat S, Saadatian E, Toudeshki A, & Sulaiman MY. A review of energy aspects of green roofs. *Renew and Sust En Rev.* 2013;23:155-168. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>
- [6] Cascone S. Green roof design: State of the art on technology and materials. *Sust.* 2019;11(11):3020. <https://doi.org/10.3390/su11113020>
- [7] Bartesaghi Koc C, Osmond P, & Peters A. Towards a comprehensive green infrastructure typology: a systematic review of approaches, methods and typologies. *Urb Ecos.* 2017;20(1):15-35. <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0578-5>
- [8] Jamei E, Chau HW, Seyedmahmoudian M, Mekhilef S, & Hafez FS. Green roof and energy-role of climate and design elements in hot and temperate climates. *Hel.* 2023;9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15917>
- [9] Kader S, Chadalavada S, Jaufer L, Spalevic V, & Dudic B. Green roof substrates – A literature review. *Front in Built Env.* 2022;8:1019362. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1019362>
- [10] <https://www.leca.pl/dla-projektanta/kalkulatory/kalkulator-dachy-zielone>.
- [11] Trzaskalik T. Wielokryterialne wspomaganie decyzji: metody i zastosowania. Ed. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne; 2014.
- [12] Verma P. Promethee: a tool for multi-criteria decision analysis. In: *Multi-Criteria decision analysis in management*. IGI Global Scientific Publishing; 2020. pp. 282-309.
- [13] Brans JP, & De Smet Y. PROMETHEE methods. In: *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. New York, NY: Springer New York; 2007. pp. 187-219.