

dr inż. Robert Bucoń¹⁾
ORCID: 0000-0002-9397-639X

Expert method to support sustainable renovation decisions

Ekspercka metoda wspomagania zrównoważonych decyzji renowacyjnych

DOI: 10.15199/33.2025.11.15

Abstract. The purpose of this article is to present a practical application of an expert method for setting renovation priorities for residential building maintenance when setting sustainability goals. The proposed method is based on an innovative approach that provides the techno-economic data necessary to perform a multi-stage optimization to achieve a long-term building renovation strategy. To conduct the study, a mixed-integer linear programming MILP was used that takes into account constraints and boundary conditions that are updated for each year of the time schedule horizon. The developed methodology makes it possible both to identify future renovation activities and to develop a program for their optimal combination, in which the activities are scheduled at the appropriate optimal stage of the time horizon.

Keywords: sustainability, building renovation, expert method, linear programming, schedule.

Streszczenie. W artykule przedstawiono praktyczne zastosowanie eksperckiej metody ustalania decyzji renowacyjnych dotyczących utrzymania budynków mieszkalnych przy wyznaczaniu celów zrównoważonego rozwoju. Proponowana metoda bazuje na nowatorskim podejściu dostarczającym techniczno-ekonomicznych danych niezbędnych do przeprowadzenia wieloetapowej optymalizacji w celu uzyskania długoterminowej strategii renowacji budynków. Do badań zastosowano programowanie liniowe o strukturze mieszanej MILP, uwzględniające ograniczenia i warunki brzegowe, które są aktualizowane w przypadku każdego roku horyzontu czasowego harmonogramu. Opracowana metoda umożliwia zidentyfikowanie przyszłych działań renowacyjnych oraz opracowanie programu optymalnej ich kombinacji, w którym działania te zaplanowane są w odpowiednim optymalnym etapie horyzontu czasowego.

Słowa kluczowe: zrównoważony rozwój; renowacja budynku; ekspercka metoda; programowanie liniowe; harmonogram.

In countries across Europe, increasing attention is being paid to the need for building renovation. It is crucial for ensuring an adequate level of maintenance for multi-family residential buildings [1, 2]. Renovation serves various fundamental maintenance goals, including the preservation of the original functions of buildings, such as structural safety and aesthetics [3, 4], but also aims to reduce the negative environmental impact of buildings and their energy consumption [5, 6], ensure a suitable quality of life for residents [7], and protect the historical heritage value of buildings [8]. The renovation process is a complex and multi-stage task, involving various stages, from the diagnosis of the building to the identification of optimal measures aimed at achieving the set objectives [9]. The implementation of these tasks requires the use of appropriate calculation methods. The methods most commonly used for inference and forecasting are those based on artificial intelligence (AI) [10, 11], case-based reasoning (CBR) [12] and multiple linear regression (MLR) [13]. These methods support maintenance decision-making, but their use requires access to relevant historical data. For this reason, more universal multi-criteria decision support methods (MADM) [14] have found wider application. They provide opportunities to develop one's own methodology for supporting decisions in solving multi-

W krajach całej Europy coraz większą uwagę zwraca się na potrzebę renowacji wielorodzinnych budynków mieszkalnych w celu zapewnienia odpowiedniego poziomu ich utrzymania [1, 2].

W ramach renowacji realizowane są różne cele podstawowego utrzymania obejmujące zachowanie pierwotnych funkcji budynków, tj. bezpieczeństwa i estetyki [3, 4], ale również mające na celu zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko i zużycia energii [5, 6], zapewnienia odpowiedniej jakości życia mieszkańców [7], a także związane z ochroną wartości dziedzictwa historycznego budynków [8]. Przeprowadzenie procesu renowacji jest złożonym i wieloetapowym zadaniem, obejmującym różne etapy, począwszy od diagnozy budynku, a skończywszy na wskazaniu optymalnych działań ukierunkowanych na osiągnięcie założonych celów [9]. Realizacja tych zadań wymaga zastosowania odpowiednich metod obliczeniowych. Do wnioskowania i prognozowania stosowane są najczęściej metody bazujące na sztucznej inteligencji AI [10, 11], przypadkach CBR [12] oraz wielokrotnej regresji liniowej MLR [13]. Metody te wspomagają podejmowanie decyzji utrzymaniowych, ale korzystanie z nich wymaga dostępu do odpowiednich danych historycznych. Z tego też powodu powszechne zastosowanie znalazły bardziej uniwersalne wielokryterialne metody wspomaganie decyzji MADM [14]. Zapewniają one możliwości opracowania własnej metody służącej do wspomaganie decyzji w rozwiązywaniu wielokryterialnych problemów decyzyjnych, m.in. dotyczących usyste-

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury;
r.bucon@pollub.pl

-criteria decision-making problems, including the systematisation and organisation of alternatives and the comprehensive assessment of renovation projects. In turn, methods based on MILP linear programming [15] are used to find the best renovation solutions, e.g. to improve the overall efficiency of a building.

Despite the existence of numerous methods supporting renovation-related decision-making, as well as widely recognized building certification systems such as BREEAM, LEED, GBA, and DGNB [16], there remains a noticeable lack of comprehensive methodologies specifically dedicated to renovation planning and the development of long-term building maintenance strategies. The methods and models presented in the literature, developed to support the maintenance of residential buildings [17, 18], are often highly complex and, as a result, challenging to implement in practical applications. Furthermore, the proposed approaches frequently differ significantly from one another and tend to address only selected stages of the renovation process. Therefore, it is difficult to avoid the conclusion that there is a shortage of appropriate, relatively simple methods that could be easily applied in the renovation of residential buildings. Developing a method that is both effective and based on simple solutions is, however, not an easy task due to the multi-stage and complex nature of the renovation process. This process involves the need for an appropriate assessment of the building's condition, consideration of limited financial resources, scheduling of repairs over time, ensuring an acceptable level of comfort during renovation works, and **maintaining the correct sequence of repair activities within the building**. Compared to other methods, its advantage is the ability to achieve various renovation objectives, which results from its unique features, such as its approach to sequential constraints that allows for the interdependence between interventions resulting from the nature and logic of the work to be taken into account. In order to demonstrate its capabilities, it was used to examine various renovation scenarios to achieve the set sustainable construction objectives. Its measurable result is a schedule showing the optimal allocation of renovation repairs in the long term.

Expert decision support method

The proposed method enables modelling of the condition of a building through the implementation of renovation measures that contribute to improving its condition. The method consists of four stages, for which appropriate proprietary solutions have been developed. These include assessing the condition of the building, estimating the cost and time required to carry out the repairs to improve the condition of the building, determining the increase in the building's condition rating resulting from the repairs, establishing the sequence of repairs within and between groups, modelling renovation scenarios presenting optimal renovation solutions for the adopted time horizon. A block diagram of the model is presented in Figure 1.

matyzowania i uporządkowania oraz kompleksowej oceny projektów renowacyjnych. Z kolei metody bazujące na programowaniu liniowym MILP [15] służą do znajdowania najlepszych rozwiązań renowacyjnych, np. w celu poprawy szeroko rozumianej wydajności budynku.

Pomimo że istnieje duża liczba wspomnianych metod wspomagających podejmowanie decyzji renowacyjnych, a także powszechnie znanych systemów certyfikacji budynków, jak BREEAM, LEED, GBA, DGNB [16], to nie ma zbyt wielu kompleksowych metod przeznaczonych do planowania renowacji i wyznaczania długoterminowych strategii utrzymania budynków. Prezentowane w literaturze metody i modele stworzone w celu wspomagania procesu utrzymania budynków mieszkalnych [17, 18] stanowią często bardzo złożone modele, których zastosowanie w praktyce nie jest możliwe. Proponowane rozwiązania bardzo często różnią się od siebie i nie obejmują wszystkich etapów renowacji. Brakuje więc odpowiednich i w miarę prostych metod, które można byłoby w łatwy sposób zastosować w procesie renowacji budynków mieszkalnych. Opracowanie metody skutecznej, a zarazem bazującej na prostych rozwiązaniach, nie jest jednak łatwe ze względu na wieloetapowość i złożoność procesu renowacji. Obejmuje on potrzebę odpowiedniej oceny stanu budynku, uwzględnienia ograniczonych zasobów finansowych, zaplanowania napraw w czasie, zapewnienia akceptowalnego poziomu wygody podczas renowacji budynków oraz uwzględnienia odpowiedniej sekwencji napraw w budynku. Wychodząc naprzeciw tym wymaganiom oraz oczekiwaniom zarządców, zajmujących się utrzymaniem i renowacją budynków mieszkalnych, **przedstawiono kompleksową autorską metodę wspomagającą podejmowanie długoterminowych decyzji renowacyjnych**. W porównaniu z innymi metodami jej zaletą jest możliwość realizacji różnych celów renowacyjnych, takich jak podejście do ograniczeń sekwencyjnych pozwalające uwzględnić współzależność między interwencjami wynikającymi z charakteru i logiki prac. W celu zaprezentowania możliwości tej metody zastosowano ją do badania różnych scenariuszy renowacji prowadzących do osiągnięcia założonych celów zrównoważonego budownictwa. Jej wymiernym rezultatem jest harmonogram przedstawiający optymalną alokację napraw renowacyjnych w długoterminowej perspektywie.

Ekspercka metoda wspomagania decyzji

Proponowana metoda umożliwia przeprowadzenie modelowania stanu budynku przez zastosowanie działań renowacyjnych przyczyniających się do poprawy jego stanu. Metoda składa się z czterech etapów, w przypadku których opracowano odpowiednie autorskie rozwiązania. Dotyczą one m.in. przeprowadzenia oceny stanu budynku, oszacowania kosztu i czasu wykonania napraw umożliwiających poprawę stanu budynku, określenia poprawy ocen stanu budynku po wykonaniu napraw, ustalenia sekwencji kolejności wykonania napraw w grupach oraz pomiędzy nimi, modelowania scenariuszy renowacyjnych, przedstawiających optymalne rozwiązania remontowe w przyjętym czasie. Schemat blokowy modelu przedstawiono na rysunku 1.

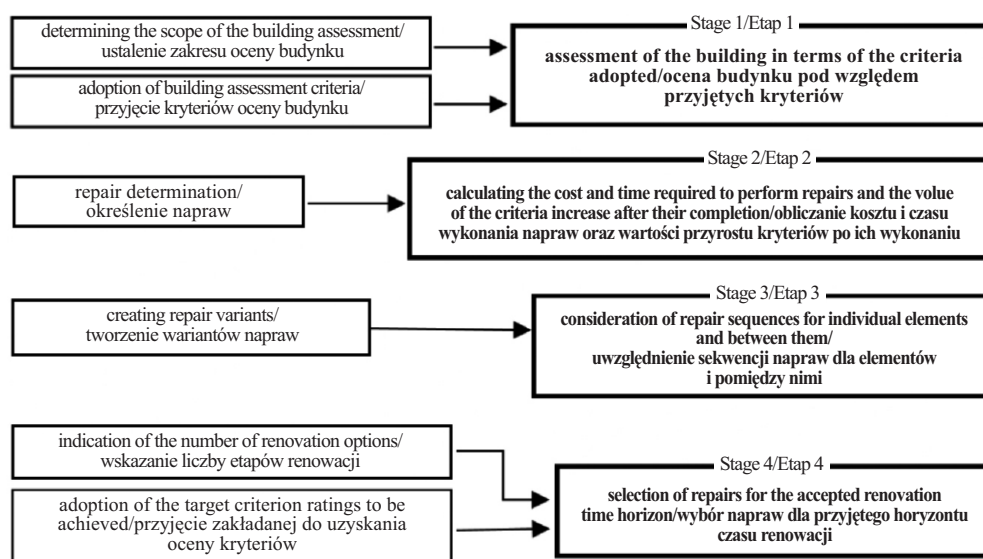


Fig. 1. A block diagram showing the steps of the renovation decision support method

Rys. 1. Schemat blokowy przedstawiający etapy metody wspomagania decyzji renowacyjnych

Selection of building condition criteria and method of their assessment. For the assessment of a residential building, four j -th criteria were adopted, corresponding to economic, functional-utilitarian, technical, and visual aspects. The scope of the building evaluation is determined individually, depending on the intended renovation objective. It may include several or even a dozen or more i -th elements (components, locations, or systems). Each element is assessed using a traditional approach, typically involving a concise description of its condition. Based on these assessments, an overall evaluation is then performed for each of the four criteria (O_j). This evaluation is expressed using linguistic ratings, each associated with a specific numerical value, as follows: very good (BD) – 5 points, good (D) – 4 points, average (P) – 3 points, poor (Z) – 2 points, and very poor (BZ) – 1 point.

Repair proposals and calculation of cost, time and value increase of criterion assessments. The basis for indicating repairs for a building is the assessment of the condition of selected i -th elements of the building (point 2.1). For each of them, k -th repairs are proposed, the implementation of which is to enable the achievement of the assumed final assessment of criteria (Z_j). Both less and more complex repairs enable an increase in one or more criteria. The costs and completion times ($c_k, t_{k,u}$) are also estimated for them. The calculation of the increase in the value of the criteria assessments for the proposed repairs is carried out according to equation (1).

$$p_{k,j} = \frac{O_{k,j}}{\sum_k O_{k,j}} \cdot (Z_j - O_j), \forall k = 1, 2, \dots, l, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

where:

Z_j – assumed rating of the j -th criterion at the final stage of renovation;
 $O_{k,j}$ – assessment of the impact of the k -th repair on the improvement of the j -th criterion using a point scale and linguistic terms, i.e. the impact of the repair on the increase in the value of the criterion - very large A (5 points), large B (4 points), medium C (3 points), small D (2 points), very small E (1 point), not assessed F (0 points).

Dobór kryteriów stanu budynku i metoda ich oceny. Do oceny budynku mieszkalnego przyjęto cztery j -te kryteria, które odnoszą się do aspektu ekonomicznego, funkcjonalno-użytkowego, technicznego oraz wizualnego. Zakres oceny budynku ustalany jest indywidualnie – w zależności do przyjętego celu remontu. Może obejmować kilka lub kilkanaście i -tych elementów, miejsc lub systemów. Ich ocena przeprowadzana jest w tradycyjny sposób (zwięzły opis stanu elementu) i na tej podstawie powstaje ocena całościowa każdego z czterech kryteriów (O_j). Do jej wyrażenia stosowane są oceny lingwistyczne z przypisanymi im wartościami liczbowymi, tj. bardzo dobra BD (5 pkt), dobra D (4 pkt), przeciętna P (3 pkt), zła Z (2 pkt), bardzo zła BZ (1 pkt).

Propozycje napraw i obliczanie kosztu, czasu i przyrostu wartości ocen kryteriów. Podstawą wskazania napraw budynku jest ocena stanu wybranych i -tych jego elementów. W przypadku każdego z nich proponowane są k -te naprawy, których realizacja ma umożliwić uzyskanie zakładanej oceny końcowej kryteriów (Z_j). Naprawy mniej lub bardziej skomplikowane umożliwiają poprawę zarówno jednego, jak i wielu kryteriów. W ich przypadku oszacowywane są również koszty oraz czas wykonania ($c_k, t_{k,u}$). Obliczenie przyrostu wartości ocen kryteriów proponowanych napraw przeprowadzane jest wg równania (1).

$$p_{k,j} = \frac{O_{k,j}}{\sum_k O_{k,j}} \cdot (Z_j - O_j), \forall k = 1, 2, \dots, l, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

gdzie:

Z_j – zakładana ocena j -tego kryterium na końcowym etapie renowacji;
 $O_{k,j}$ – ocena wpływu k -tej naprawy na poprawę j -tego kryterium przy użyciu skali punktowej i określeń lingwistycznych, tj. wpływ naprawy na przyrost wartości kryterium – bardzo duży A (5pkt), duży B (4pkt), średni C (3 pkt), mały D (2 pkt), bardzo mały E (1 pkt), nieoceniany F (0 pkt).

Repair options and sequences. The proposed set of k -th repairs is assigned to the i -th elements of the building, e.g. staircases, roof, basement walls, above-ground walls, etc. Then, arranged in a specific order of execution, they form the a -th sequence of the r -th repair variant ($v_{a,r}$). The resulting increase in the values of the criteria ($p_{r,j,h}$) and the time ($t_{r,u,h}$) and cost of execution ($c_{r,h}$) are calculated using equations (2, 3, 4). These values are not constant and may change as a result of reductions in their composition at earlier stages of renovation.

$$p_{r,j,h} = \sum_{k=d}^r p_{k,j} \quad \forall j = 1, 2, \dots, n, \forall h = 1, 2, \dots, z \quad (2)$$

$$t_{r,u,h} = \sum_{k=d}^r t_{k,u} \quad \forall h = 1, 2, \dots, z, \forall u = 1, 2 \quad (3)$$

$$c_{r,h} = \sum_{k=d}^r c_{k,h} \quad \forall h = 1, 2, \dots, z \quad (4)$$

where:

d – number of the first k -th repair of the r -th variant;

$t_{k,u}$ – repair completion time – index: $u = (x + y)$;

x, y – numbers of time limits for external and internal building repairs, respectively.

The number of r -th variants of each a -th sequence is equal to the number of k -th repairs assigned to the i -th element. The first variant of the sequence contains the first repair, while each subsequent variant adds another repair in a fixed order. Thus, the number of variants of a sequence is equal to the number of all repairs assigned to it. The idea of creating variants is illustrated in Figure 2.

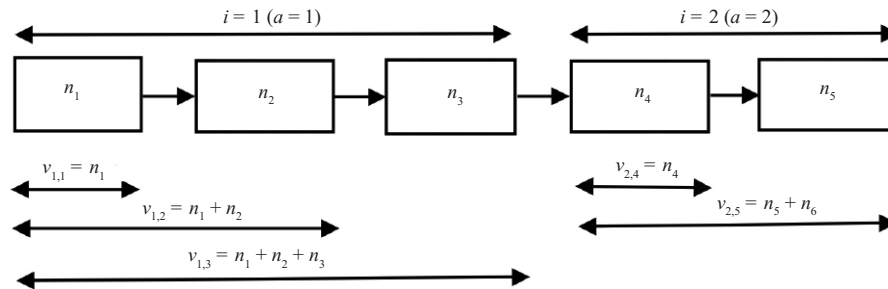


Fig. 2. An example of sequence variants for two building elements

Rys. 2. Przykład wariantów sekwencji w przypadku dwóch elementów budynku

The possibility of selecting and performing repairs within a sequence is determined by the technological relationships between repairs. For example, for technological reasons, it is not possible to select only the third repair from the first sequence unless its predecessors have been selected together with it or have been selected in the previous stage of the renovation. Partial sequences are selected in an optimisation procedure, during which the r -th variant of the sequence is selected at each subsequent h -th stage of the overhaul, with only one variant related to a given sequence being selected at a given moment. The constraint matrix also contains constraints resulting from the e -th conflicts that may occur between the r -th variants of individual repair sequences. The mathematical representation of the matrix containing the constraints resulting from the sequences in question is given by equations 5, 6, 7:

$$S = [s_{b,r,h}]_{p \times z}, \forall b(a+e) = 1, 2, \dots, p, \forall r = 1, 2, 3, \dots, l, \forall h = 1, 2, \dots, z \quad (5)$$

$$\sum_{r=1}^l s_{b,r,h} \leq 1, \forall b = 1, 2, \dots, p, \forall h = 1, 2, \dots, z \quad (6)$$

Warianty i sekwencje wykonania napraw. Proponowany zbiór k -tych napraw przydzielony jest do i -tych elementów budynku, np. klatki schodowej, dachu, ścian itd. Następnie naprawy uporządkowane wg określonej kolejności wykonania tworzą a -tą sekwencję r -tego wariantu ($v_{a,r}$). Zwiększenie wartości ocen w przypadku kryteriów ($p_{r,j,h}$) oraz czas ($t_{r,u,h}$) i koszt wykonania ($c_{r,h}$) obliczane są za pomocą równań (2, 3, 4). Wartości te nie są stałe i mogą ulegać zmianie wskutek redukcji ich składu na wcześniejszych etapach renowacji.

$$p_{r,j,h} = \sum_{k=d}^r p_{k,j} \quad \forall j = 1, 2, \dots, n, \forall h = 1, 2, \dots, z \quad (2)$$

$$t_{r,u,h} = \sum_{k=d}^r t_{k,u} \quad \forall h = 1, 2, \dots, z, \forall u = 1, 2 \quad (3)$$

$$c_{r,h} = \sum_{k=d}^r c_{k,h} \quad \forall h = 1, 2, \dots, z \quad (4)$$

gdzie:

d – numer pierwszej w kolejności k -tej naprawy r -tego wariantu;

$t_{k,u}$ – czas wykonania naprawy – index: $u = (x + y)$;

x, y – odpowiednio numery ograniczeń czasu wykonania napraw zewnętrznych i wewnętrznych budynku.

Liczba r -tych wariantów każdej a -tej sekwencji jest równa liczbie k -tych napraw przypisanych do i -tego elementu. Pierwszy wariant sekwencji zawiera pierwszą naprawę, podczas gdy każdy kolejny wariant dodaje kolejną naprawę w ustalonej kolejności. Liczba wariantów sekwencji jest zatem równa liczbie wszystkich napraw do niej przypisanych. Ideę tworzenia wariantów przedstawiono na rysunku 2.

Możliwość wyboru i wykonania napraw w ramach sekwencji jest określona przez relacje technologiczne występujące między naprawami, np. ze względów technologicznych nie można wybrać wyłącznie trzeciej naprawy z pierwszej sekwencji, chyba że poprzednie zostały wybrane wraz z nią lub w poprzednim etapie remontu. Częściowe sekwencje są przedmiotem selekcji w procedurze optymalizacyjnej, podczas której w każdym kolejnym h -tym etapie remontu wybierany jest r -ty wariant sekwencji, przy czym w danym momencie można wybrać tylko jeden wariant związany z daną sekwencją. Macierz ograniczeń zawiera również ograniczenia wynikające z e -tych konfliktów, które mogą występować pomiędzy r -tymi wariantami poszczególnych sekwencji napraw. Matematyczny zapis macierzy, która zawiera ograniczenia wynikające z omawianych sekwencji, zapisano równaniami 5, 6, 7:

$$S = [s_{b,r,h}]_{p \times z}, \forall b(a+e) = 1, 2, \dots, p, \forall r = 1, 2, 3, \dots, l, \forall h = 1, 2, \dots, z \quad (5)$$

$$\sum_{r=1}^l s_{b,r,h} \leq 1, \forall b = 1, 2, \dots, p, \forall h = 1, 2, \dots, z \quad (6)$$

$$s_{b,r,h} = \begin{cases} 1 & \text{– there is an } r\text{-th variant at the } h\text{-th stage of renovation} \\ 0 & \text{– there is no } r\text{-th variant at the } h\text{-th stage of renovation} \end{cases} \quad (7)$$

Referring to the example in Figure 2, the sequence $a = 1$ (element $i = 1$) consists of repair variants $r = 1, 2, 3$ with repairs ordered in k -th order for them. The notation of the first constraint $b = 1$ of matrix S in this case is as follows: the first three cells take the value '1' and the last two take the value '0' because variants 4 to 5 do not exist for this sequence. The second sequence has two variants, which include repairs numbered 4 and 5, respectively. This means that the last two cells in the second row of constraints have the value '1', and the first three cells have the value '0' because variants 1 to 3 do not exist. The variants of the sequence include performing one, two or three repairs in total. Therefore, it is not possible to select two or more variants of a given sequence at the same time, as the sum of the selected variants would be greater than 1 and condition (6) would not be met. In turn, the constraints of e -th conflicts between r -th variants of a -th sequences prevent the simultaneous execution of repair variants of different sequences. An example illustrating the meaning of such a constraint is the inability to select at the same time (renovation stage) the repair variant $r = 3$ of sequence $a = 1$, which involves facade works using scaffolding, and the repair variant $r = 5$ of sequence $a = 2$, which involves insulation works on basement walls in an excavation next to the building. The matrix notation of the discussed restrictions is presented in Table 1.

Optimisation for the selection of repair options. A mathematical optimisation approach has been developed to select the best scope of building renovation works. The objective function minimising the cost of renovation works is defined by equation (8), for which the

cost is calculated based on equation (9). Its purpose is to identify variants that result in the highest increase in the value of the criteria assessment, period after period, at the lowest cost of obtaining them. A binary variable (10, 11) is used to enable the selection of repair variants. The impact on the selection of repair options in the building included in the constraint matrix is described by equations (5, 6, 7) and the time constraint for repairs at a given stage of renovation (12, 13). The increase in the value of the criteria assessments achieved at each stage of renovation is the result of the selected renovation options (14). It is assumed that the decision maker seeks the cheapest combination of actions that make the resulting assessment of each criterion ($P_{j,h}$) at the h -th stage of renovation at least as high as the assumed value of the assessment $Z_{j,h}$ included in equation (15). The sum of the increases in criterion scores resulting from the implementation of variants in all renovation periods is expressed by equation (16). The mathematical notation for all optimisation actions is presented below:

$$s_{b,r,h} = \begin{cases} 1 & \text{– istnieje } r\text{-ty wariant na } h\text{-tym etapie renowacji} \\ 0 & \text{– brak } r\text{-tego wariantu na } h\text{-tym etapie renowacji} \end{cases} \quad (7)$$

Odnosząc się do przykładu z rysunku 2, sekwencja $a = 1$ (element $i = 1$) składa się z wariantów napraw $r = 1, 2, 3$ z uporządkowanymi w kolejności k -tymi naprawami. Zapis pierwszego ograniczenia $b = 1$ macierzy S w tym przypadku przedstawia się następująco: trzy pierwsze komórki przyjmują wartość „1”, a dwie ostatnie wartość „0”, ponieważ w przypadku tej sekwencji nie istnieją warianty 4 i 5. Druga sekwencja ma 2 warianty, w skład których wchodzi odpowiednio naprawy o numerach 4 i 5. Oznacza to, że dwie ostatnie komórki mają w drugim wierszu ograniczeń wartość „1”, a trzy pierwsze komórki wartość „0”, ponieważ warianty 1 do 3 nie istnieją. Warianty sekwencji obejmują wykonanie jednej naprawy oraz dwóch lub trzech łącznie. Z tego powodu wybór dwóch lub więcej wariantów danej sekwencji w tym samym czasie nie jest możliwy, gdyż suma wybranych wariantów byłaby większa niż 1 i warunek (6) nie zostałby spełniony. Z kolei ograniczenia e -tych konfliktów występujących pomiędzy r -tymi wariantami a -tych sekwencji uniemożliwiają jednoczesne wykonywanie wariantów napraw różnych sekwencji. Przykładem oddającym sens takiego ograniczenia jest uniemożliwienie wyboru w tym samym czasie (etapie renowacji) wariantu naprawy $r = 3$ sekwencji $a = 1$, zakładającego wykonanie robót elewacyjnych, podczas których korzysta się z rusztowań oraz wariantu naprawy $r = 5$ sekwencji $a = 2$, dotyczącego wykonania robót izolacyjnych ścian piwnic w wykopie przy budynku. Zapis macierzy omawianych ograniczeń przedstawiono w tabeli 1.

Table 1. A section of the constraints matrix (S) responsible for the selection of repair variants

Tabela 1. Fragment macierzy ograniczeń (S) odpowiadający za wybór wariantów napraw

Constraints (b)/ Ograniczenia (b)		Repair variant (r)/Wariant naprawy (r)					Requirement/ Warunek
		1	2	3	4	5	
(a)	1	1	1	1	0	0	≤ 1
	2	0	0	0	1	1	≤ 1
(e)	3	0	0	1	0	1	≤ 1

ku koszt obliczany jest na podstawie równania (9) i ma ona na celu identyfikację wariantów, które skutkują największym przyrostem wartości oceny kryteriów, okres po okresie, przy najmniejszym koszcie ich uzyskania. W celu umożliwienia wyboru wariantów naprawy używana jest zmienna binarna (10, 11). Wpływ na wybór wariantów naprawy w budynku, ujęty w macierzy ograniczeń, opisano równaniami (5, 6, 7) oraz ograniczeniem czasu wykonania napraw na danym etapie renowacji (12, 13). Przyrost wartości ocen kryteriów osiągnięty w poszczególnych etapach renowacji jest efektem wybranych wariantów renowacji (14). Zakłada się, że decydecję poszukuje najtańszej kombinacji działań, które sprawiają, że wynikowa ocena każdego z kryteriów ($P_{j,h}$) na h -tym etapie renowacji jest co najmniej tak wysoka, jak zakładana wartość oceny $Z_{j,h}$ ujęta w równaniu (15). Suma przyrostów ocen kryteriów wynikająca z wdrożenia wariantów we wszystkich okresach renowacji została wyrażona równaniem (16). Zapisy matematyczne wszystkich działań optymalizacyjnych są następujące:

$$\begin{aligned}
 \min z : z &= C_h, \forall h=1, 2, \dots, z & (8) \\
 C_h &= \sum_{r=1}^l \sum_{b=1}^p c_{r,h} \cdot s_{b,r,h} \cdot t_{u,r,h} \cdot x_{r,h}, \forall h=1, 2, \dots, z & (9) \\
 x_{r,h} &\in \{0, 1\}, r=1, 2, \dots, l, h=1, 2, \dots, z & (10) \\
 x_{r,h} &= \begin{cases} 1 - \text{it the variant } r \text{ is selected} \\ 0 - \text{in other case} \end{cases} & (11) \\
 T &= [t_{u,r,h}]_{(2) \times l \times z}, \forall u(x+y)=2, \forall r=1, 2, \dots, l, \forall h=1, 2, \dots, z & (12) \\
 \sum_{r=1}^l t_{u,r,h} &\leq T_{u,h}, \forall u=x+y, \forall h=1, 2, \dots, z & (13) \\
 P_{j,h} &= \sum_{r=1}^l p_{r,j,h}, \forall j=1, 2, \dots, n, \forall h=1, 2, \dots, z & (14) \\
 P_{j,h} &\geq Z_{j,h} - (O_j + \sum_h P_{j,h-1}), \forall j=1, 2, \dots, n, \forall h=1, 2, \dots, z & (15) \\
 P_j &= \sum_{h=1}^z P_{j,h}, \forall j=1, 2, \dots, n & (16)
 \end{aligned}$$

Example of application

The operation of the model is presented on the example of a multi-family residential building, which served as a case study for selecting optimal renovation measures. In the first stage of the method, criteria were selected according to which the building is assessed, and then the scope of the assessment to which the building is subjected was determined. The criteria used to assess the building relate to economic, technical, functional and visual aspects, while the scope of the building assessment covers seven selected elements of the building. The assessment of the building elements, expressed in descriptive form, allowed for a comprehensive assessment of the building in terms of the adopted criteria – the results are shown in Table 2.

Considering the assessment of building elements presented in Table 2, 11 renovation repairs were proposed to improve the condition of the building in terms of predefined criteria. The repairs have been assigned to the five previously assessed building elements. They are listed in Table 3, together with their impact on the increase in the criteria scores and the score (Z_j) that can be obtained after their comprehensive implementation. The cost of repairs (c_k) and the completion date ($t_{k,u}$) have also been calculated.

Przykład zastosowania metody eksperckiej

Wybór optymalnych działań renowacyjnych przedstawiono na przykładzie wielorodzinnego budynku mieszkalnego. W pierwszym etapie metody dokonano doboru kryteriów, wg których oceniany jest budynek, a następnie określono zakres oceny, jakiemu jest poddawany. Kryteria oceny odnoszą się do aspektów ekonomicznego, technicznego, funkcjonalno-użytkowego i wizualnego, a zakres oceny obejmuje siedem wybranych elementów budynku. Przeprowadzona ocena elementów budynku, wyrażona w postaci opisowej, pozwoliła na dokonanie kompleksowej oceny budynku pod względem przyjętych kryteriów (tabela 2).

Biorąc pod uwagę ocenę elementów budynku przedstawioną w tabeli 2, zaproponowano 11 napraw renowacyjnych, które mają poprawić stan budynku pod względem wcześniej zdefiniowanych kryteriów. Naprawy zostały przydzielone do wcześniej ocenianych pięciu elementów budynku. Są one wymienione w tabeli 3 wraz z określeniem ich wpływu na przyrost wartości ocen kryteriów oraz ocenę napraw (Z_j), którą można uzyskać po ich kompleksowym wykonaniu. Dokonano również obliczenia kosztu (c_k) i terminu wykonania napraw ($t_{k,u}$).

Table 2. Evaluation of building elements according to the adopted criteria

Tabela 2. Ocena elementów budynku wg przyjętych kryteriów

Elements (i)/ Elementy (i)	energy efficiency/ energooszczędność	Assessment criteria (j)/Kryteria oceny (j)		
		safety/bezpieczeństwo	utility comfort/komfort użytkowy	aesthetics/estetyka
Aboveground walls/ Ściany nadziemne	lack of thermal insulation/ brak izolacji termicznej	wall cracks/pęknięcia ścian	poor acoustics and low thermal comfort/ słaba akustyka i niski komfort termiczny	stain, cavities, damage/ zabrudzenia, ubytki, uszkodzenia
Basement walls/ Ściany piwnic	lack of thermal insulation/ brak izolacji termicznej	damaged waterproof insulation/ uszkodzona izolacja przeciwwodna	not assessed/nieoceniany	mould and plaster cavities/ zagrzybienia i ubytki tynku
Balconies/ Balkony	lack of thermal insulation/ brak izolacji termicznej	damaged waterproof insulation/ uszkodzona izolacja przeciwwodna	no cladding, inadequate railings/brak okładziny, nieodpowiednie balustrady	plaster cavities under the balcony slab/ubytki tynku pod płytą balkonu
Roof/Dach	does not meet requirements/ nie spełnia wymagań	leakage in the roof covering/ nieszczelność pokrycia dachowego	not assessed/nieoceniany	not assessed/nieoceniany
External joinery/ Stolarka zewnętrzna	does not meet requirements/ nie spełnia wymagań	no damage/brak uszkodzeń	poor acoustics, operational difficulties/ słaba akustyka, trudności z użytkowaniem	discolouration/przebarwienia
Staircase/ Klatka schodowa	not assessed/nieoceniany	no damage/brak uszkodzeń	uneven stair treads and railings/ nierówne stopnice schodów i balustrad	stain and plaster cavities/ zabrudzenia i ubytki tynku
Assessment (O_j)/ Ocena (O_j)	bz	z	z	bz

Table 3. Proposed k-th repairs grouped to the i-th elements and their impact on the assessment of the building criteria

Tabela 3. Proponowane k-te naprawy pogrupowane do i-tych elementów oraz ich wpływ na oceny kryteriów budynku

k	Repair/Działania renowacyjne	Impact of repairs on the increase in the criterion rating ($O_{k,i}$)/Wpływ naprawy na wzrost oceny kryterium ($O_{k,i}$)				Repair cost (c_k) [zł]/Koszt naprawy (c_k) [zł]	Repair time ($t_{k,w}$) [days]/Czas naprawy ($t_{k,w}$) [dni]	
		1	2	3	4		x	y
1	repair of wall structures/naprawa konstrukcji ścian	F	A	F	F	52 000	20	–
2	replacement of windows and external doors/wymiana okien i drzwi zewnętrznych	B	F	E	D	200 000	10	–
3	wall insulation – ETICS system/docieplenie ścian – system ETICS	A	F	B	A	235 000	45	–
4	comprehensive balcony repair/wykonanie kompleksowej naprawy balkonów	C	C	C	C	115 000	30	–
5	replacement of railings/wymiana balustrad	F	F	B	B	77 000	10	–
6	replacement of the roof covering/wymiana pokrycia dachowego	F	B	F	F	48 000	17	–
7	plaster repair and painting/naprawa tynku i malowanie	F	F	A	A	37 000	–	22
8	replacement of stair cladding/wymiana okładziny schodowej	F	F	A	A	68 000	–	25
9	replacement of railings/wymiana balustrad	F	F	B	A	44 000	–	5
10	installation of waterproofing and thermal insulation/wykonanie izolacji przeciwwodnej i termicznej	C	B	F	F	47 000	37	–
11	installation of plinth cladding/wykonanie okładziny cokołu	F	F	F	C	5 000	5	–
	Z_j	BD	BD	BD	BD	$\Sigma: 928\ 000$	$\Sigma: 226$	

The repairs were grouped according to their association with specific building elements and numbered in accordance with the technological order of their execution. In this way, variants of the sequence of actions have been created, where r is the identifier of the sequence of repairs intended for the i -th building element. The first variant of the sequence consists of one repair, the second of two, and so on. The matrix also contains restrictions on the selection of r -th variants of a -th sequences resulting from e -th conflicts. The results are presented in Table 4.

The optimisation approach applied to the above example aims to identify the cheapest renovation schedule that will ensure the achievement of the assumed building criterion values at each stage of the planned time horizon – target values have been set for successive periods of the planning horizon. The calculations performed allow us to obtain, among other things: sequence variants selected for each stage of the planning horizon, their cost and building rating increases. They have practical application for residents, thanks to which they receive information about the financial consequences of building renovation. The entire planning horizon consists of 5 stages (years), and in each of them, the algorithm indicates variants that ensure the assumed increase in the value of the criteria assessments, taking into account cost minimisation. The results of the optimisation calculations, showing the increase in the criteria assessments at each stage of the renovation period, are presented in Table 5.

The calculations presented in Table 5 show that the repair options ($v_{a,r}$) selected in the early stages of renovation are more cost-effective than those selected in later stages, i.e. the costs incurred are lower in relation to the increases in criterion scores achieved. In the later stages of renovation, the choice of renovation measures is already limited, and the increase in the value of the criteria is achieved on the basis of more expensive and less effective repairs. As a result of optimisation measures, solutions have been identified that meet the requirements of the assumed assessments at each stage of renovation ($Z_{j,h}$). The

Naprawy zostały pogrupowane wg ich związku z elementem budynku i ponumerowane zgodnie z technologiczną kolejnością ich wykonania. W ten sposób utworzono warianty sekwencji działań, gdzie r jest identyfikatorem sekwencji napraw przeznaczonych dla i -tego elementu budynku. Pierwszy wariant sekwencji składa się z jednej naprawy, drugi z dwóch itd. Macierz zawiera również ograniczenia wyboru r -tych wariantów a -tych sekwencji wynikające z e -tych konfliktów. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Podejście optymalizacyjne zastosowane w omawianym przykładzie ma na celu wskazanie najtańszego harmonogramu renowacji, który zapewni uzyskanie zakładanych wartości ocen kryteriów budynku na każdym etapie w planowanym czasie (ustawione zostały oceny docelowe w kolejnych okresach horyzontu planowania). Przeprowadzone obliczenia pozwalają uzyskać m.in. warianty sekwencji wybrane w przypadku każdego etapu horyzontu planowania, ich koszt oraz przyrosty oceny budynku. Mają one praktyczne zastosowanie, gdyż mieszkańcy otrzymają informacje o konsekwencjach finansowych renowacji budynku. Cały horyzont planowania składa się z pięciu etapów (lat) i w każdym z nich algorytm wskazuje warianty, które zapewniają uzyskanie zakładanego przyrostu wartości ocen kryteriów, biorąc pod uwagę minimalizację kosztu. Wyniki obliczeń optymalizacyjnych, pokazujące zwiększenie ocen kryteriów na poszczególnych etapach okresu remontu przedstawiono w tabeli 5.

Z obliczeń przedstawionych w tabeli 5 wynika, że warianty napraw $v_{a,r}$, wybrane w pierwszych etapach renowacji, charakteryzują się większą efektywnością kosztową, w porównaniu z pozostałymi etapami. Na późniejszych etapach renowacji wybór działań renowacyjnych jest ograniczony, a przyrost wartości kryteriów uzyskiwany z uwzględnieniem droższych i mniej efektywnych napraw. W wyniku działań optymalizacyjnych wskazane zostały rozwiązania, które spełniają wymagania zakładanych ocen na każdym etapie renowacji ($Z_{j,h}$). W obliczeniach uwzględnione zostały ogranicze-

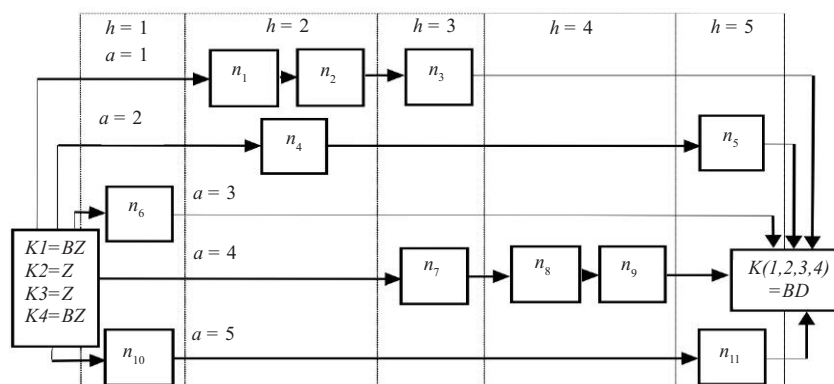
Table 4. Restriction matrix for the selection of repair variants for the first stage of renovation

Tabela 4. Macierz ograniczeń wyboru wariantów napraw w przypadku pierwszego etapu renowacji

Constraint number (b)/ Nr ograniczenia (b)	Variant (r)/Wariant (r)											Requirement/ Warunek
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	≤ 1
2		0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	≤ 1
3	a	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	≤ 1
4		0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	≤ 1
5		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	≤ 1
6	e	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	≤ 1
7		0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	≤ 1

calculations took into account the time constraints for repairs carried out outside (x) and inside the building (y). Figure 3 shows the allocation of repairs in successive h periods of renovation.

The analysis of this and numerous other renovation schedules that minimise renovation costs in order to achieve the assumed building criterion values and meet sequential, collision and time constraints allows us to conclude that the method provides valuable information, e.g. justifying a change in the monthly contribution to the renovation fund. In order to verify its correctness, it has been tested repeatedly by changing the assumptions regarding the assumed criterion ratings and the length of the planning horizon, thus estimating the costs and benefits of choosing a specific scope of repairs.

**Fig. 3. Optimal, for the assumptions made, schedule of renovation activities in h -th stages**Rys. 3. Optymalny harmonogram działań renowacyjnych na h -tych etapach w przypadku przyjętych założeń

Summary

The proposed method allows for comprehensive building renovation planning, from building assessment to the selection and scheduling of the most beneficial repair measures. It can serve as a practical tool to assist managers in long-term residential building renovation planning through gradual improvement over time. The method allows for experimentation with different settings in terms of the length

Table 5. Cost and increments of criteria ratings in successive renovation phases

Tabela 5. Koszty i przyrosty wartości ocen kryteriów w kolejnych etapach renowacji

h	1				2				3				4				5				
j	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
$Z_{j,h}$ [pkt]	–	P	–	–	P	D	–	–	D	BD	P	P	BD	–	D	BD	–	–	BD	BD	
$O_j + P_{j,h}$ [pkt]	1,8	3,5	2	1	3,7	5	2,5	1,8	5	5	3,5	3	5	5	4,5	4,2	5	5	5	5	
$T_{u,h} \sum_{r=1}^I t_{u,rh}$ [dni]	x	60/54				60/60				60/45				60/0				60/0			
	y	30/0				30/0				30/22				30/30				30/15			
C_h [zl]	95 000				367 000				272 000				112 000				82 000				
n_k	n_6, n_{10}				n_1, n_2, n_4				n_3, n_7				n_8, n_9				n_5, n_{11}				
$v_{a,r}$	$v_{3,6}, v_{5,10}$				$v_{1,2}, v_{2,4}$				$v_{1,3}, v_{4,7}$				$v_{4,9}$				$v_{2,5}, v_{5,11}$				

*Variants that have been reduced by repairs included in the variants selected at earlier stages of renovation/Warianty, które zostały zredukowane o naprawy ujęte w wariantach wybranych na wcześniejszych etapach renowacji.

The values of the assumed increase $Z_{j,h}$ and the obtained $P_{j,h}$ at individual stages of renovation are marked in bold/Pogrubioną czcionką zaznaczono wartości zakładanego przyrostu $Z_{j,h}$ oraz uzyskane $P_{j,h}$ na poszczególnych etapach renowacji.

nia czasu realizacji napraw, przeprowadzanych na zewnątrz (x) i wewnątrz budynku (y). Rysunek 3 przedstawia alokację napraw w kolejnych h -tych okresach renowacji.

Analiza tego i wielu innych harmonogramów renowacji, minimalizujących koszty renowacji w celu uzyskania zakładanych wartości ocen kryteriów budynku i spełniających ograniczenia sekwencyjne, kolizyjne oraz czasowe wykazała, że metoda dostarcza cennych informacji, np. uzasadniających zmianę miesięcznej opłaty na fundusz remontowy. W celu sprawdzenia poprawności działania wielokrotnie ją testowano, zmieniając założenia dotyczące zakładanych ocen kryteriów oraz długości horyzontu planowania, oszacowując w ten sposób koszty i korzyści wynikające z wyboru określonego zakresu napraw.

of the planning horizon in order to estimate the costs and benefits of choosing a specific scope of repairs. It enables the achievement of the adopted objectives based on the proposed repair measures, from which the best ones are selected at each stage of the renovation. A unique feature of the method is its approach to constraints, which include sequential order between repairs dedicated to building elements. The selection of repairs also depends on time constraints and so-called collisions, which prevent the simultaneous selection of repairs for individual sequences.

The proposed model is deterministic and, at the stage of planning renovation activities, is based on information from the initial assessment of the building's condition and the proposed repair measures. The optimal selection and schedule of activities assumes the possibility of choosing different repairs at different costs to achieve the desired results. However, the adopted method of assessing the condition of the building and the impact of the proposed repairs on its improvement, based on the subjective nature of the input data, requires the assistance of an expert. The method can serve as a practical tool to assist managers in long-term maintenance planning for residential buildings in terms of gradual improvements spread over a long period of time for budgetary reasons. The developed method has been implemented in the form of computer software and can serve as the first basic level of support and development for long-term renovation projects.

The work was funded by a grant (Ministry of Science and Higher Education) project no. FD-20/IL-4/010.

Received: 20.05.2025
Revised: 07.07.2025
Published: 21.11.2025.

nymi ustawieniami w horyzoncie planowania w celu oszacowania kosztów i korzyści wynikających z wyboru określonego zakresu napraw. Umożliwia osiągnięcie planowanego celu z wykorzystaniem zaproponowanych działań naprawczych, z których na poszczególnych etapach renowacji wybiera najlepsze. Unikatową cechą metody jest podejście do ograniczeń, które obejmują sekwencje kolejnościowe między naprawami elementów budynku. Wybór napraw uzależniony jest również od ograniczeń czasowych oraz tzw. kolizji, które uniemożliwiają jednoczesny wybór napraw poszczególnych sekwencji.

Proponowany model ma charakter deterministyczny i na etapie planowania działań renowacyjnych wykorzystuje informacje z początkowej oceny stanu budynku oraz zaproponowane działania naprawcze. Optymalny wybór i harmonogram działań oznacza możliwość wyboru różnych napraw przy różnych kosztach w celu uzyskania zakładanych efektów. Przyjęty sposób oceny stanu budynku i wpływu proponowanych napraw na jego poprawę bazujący na subiektywnym charakterze danych wejściowych wymaga jednak korzystania z pomocy eksperta. Metoda może służyć jako praktyczne narzędzie wspomagające zarządcę w długoterminowym planowaniu stopniowych ulepszeń budynków mieszkalnych, rozłożonych w długim czasie ze względów budżetowych. Opracowana metoda została zaimplementowana do postaci oprogramowania komputerowego i może stanowić pierwszy podstawowy poziom wspomagania i opracowania długoterminowych projektów renowacyjnych.

Praca była finansowana w ramach dotacji MNiSW – projekt nr FD-20/IL-4/010.

Artykuł wpłynął do redakcji: 20.05.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 07.07.2025 r.
Opublikowano: 21.11.2025 r.

Literature

- [1] Bucoń R. Trends and problems in the sustainable modernisation of residential buildings. Archives of Civil Engineering. 2024. DOI: 10.24425/ace.2024.151897.
- [2] Nowogońska B. A methodology for determining the rehabilitation needs of buildings. Applied Sciences. 2020. DOI:10.3390/app10113873.
- [3] Konior J. Technical assessment of old buildings by fuzzy approach. Archives of Civil Engineering. 2020. DOI:10.24425/ace.2020.134407.
- [4] Adamczewski G, Bednarek K, Świeca M, Zdybska M. Rola diagnostyki technicznej w utrzymaniu obiektów budowlanych. Materiały Budowlane. 2022. DOI: 10.15199/33.2022.03.10.
- [5] Jafari A, Valentin V. Selection of optimization objectives for decision-making in building energy retrofits. Build Environ. 2018. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.12.027.
- [6] Rodrigues C, Freire F. Environmental impacts and costs of residential building retrofits – What matters? Sustain Cities Soc. 2021. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102733.
- [7] Awada M, Srour I. A genetic algorithm based framework to model the relationship between building renovation decisions and occupants' satisfaction with indoor environmental quality. Build Environ. 2018. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.10.001.
- [8] Adegoriola MI, Laib JHK, Abidoye R. Critical success factors of heritage building maintenance management An ISM-MICMAC analysis. J Build Eng. 2023. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106941.
- [9] Bucoń R, Czarnigowska A. Decision support method for optimal modernization of residential buildings. Archives of Civil Engineering. 2024. DOI: 10.24425/ace.2024.148908.
- [10] Radziszewska-Zielina E, Śladowski G, Sibiłak M. Planning the reconstruction of a historical building by using a fuzzy stochastic network. Autom. Constr. 2017. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.003.
- [11] Son H, Kim C. Evolutionary Many-Objective Optimization for Retrofit Planning in Public Buildings: A Comparative Study. J. Clean. Prod. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.102.
- [12] Park S, Kwon N, Ahn Y. Forecasting Repair Schedule for Building Components Based on Case-Based Reasoning and Fuzzy-AHP. Sustainability. 2019. DOI: 10.3390/su11247181.
- [13] Kwon N, Song K, Park YAM, Jang Y. Maintenance cost prediction for aging residential buildings based on case-based reasoning and genetic algorithm. J Build Eng. 2020. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101006.
- [14] Serrano-Jiménez A, Femenías P, Thuvander L, Barrios-Padura Á. A multi-criteria decision support method towards selecting feasible and sustainable housing renovation strategies. J. Clean. Prod. 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123588.
- [15] Bucoń R, Czarnigowska A. Model optymalizacyjny wspomagający długoterminowe utrzymanie wielorodzinnych budynków mieszkalnych. Materiały Budowlane. 2022. DOI: 10.15199/33.2022.12.12.
- [16] Jiménez-Pulido C, Jiménez-Rivero A, García-Navarro J. Improved sustainability certification systems to respond to building renovation challenges based on a literature review. J Build Eng. 2022. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103575.
- [17] Cho K, Kim T. Optimized scheduling method for office building renovation projects. Expert Systems with Applications, Expert Syst Appl. 2021. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.114212.
- [18] AlOtaibi M, El-Rayes K. Optimizing the Renovation Scheduling of Leased Residential Buildings to Minimize Total Project Cost. J Constr Eng. M. 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002063.