

Wybrane przykłady modelowania i analizy strukturalnej problemów decyzyjnych w budownictwie

Selected cases of modeling and structural analysis of decision problems in the construction sector

dr inż. Grzegorz Śladowski (ORCID: 0000-0002-3452-8829), Politechnika Krakowska

DOI 10.5604/01.3001.0016.2710

Streszczenie: W artykule zwrócono uwagę na ważny aspekt, jakim jest modelowanie i analiza strukturalna problemów w procesie decyzyjnym. Zaprezentowane podejście systemowe na tle klasycznych wielokryterialnych metod wspomaganie decyzji pozwala uwzględnić różne współzależne zewnętrzne i wewnętrzne relacje między kryteriami i wariantami decyzyjnymi, co jest istotne z perspektywy modelowanej rzeczywistości. Przedstawiono podstawowe metody modelowania i analizy strukturalnej, a całość rozważań została poparta wybranymi przykładami problemów decyzyjnych w budownictwie.

Słowa kluczowe: wspomaganie decyzji, podejście systemowe, modelowanie i analiza strukturalna, budownictwo.

Abstract: This paper notes the important aspect of the modeling and structural analysis of problems in decision making. Against classical multi-criteria decision-making support methods, the presented approach considers different co-dependent external and internal relations between criteria and decision alternatives, which is significant from the standpoint of the reality we aim to model. Essential structural modeling and analysis methods were presented, and the entire discussion was backed by samples of decision problems from the construction sector.

Keywords: decision support, systems approach, structural modeling and analysis, construction.

1. Wprowadzenie

Decyzja to świadomy i nielosowy wybór jednego z określonych i dopuszczalnych wariantów planowanego działania [1]. Podejmowanie decyzji wymaga zebrania informacji o rozważanym problemie, a następnie ich analizy w ramach tzw. procesu decyzyjnego.

W literaturze przedmiotu wyróżnia się dwa podejścia do modelowania i analizy jedno- lub wielokryterialnych problemów decyzyjnych [2].

- Wspomaganie decyzji wielocelowych (*Multiple Objective Decision Problem* – MODP), w którym warianty decyzyjne nie są określone a priori, a zamiast tego definiowany jest zbiór ograniczeń oraz wyraźnie określonych przez decydenta kwantyfikowalnych celów.
- Wspomaganie decyzji wieloatrybutowych (*Multiple Attribute Decision Problem* – MADP) wymaga określenia a priori skończonej, dyskretnej liczby wariantów decyzyjnych, przy czym każdy wariant ma wyraźnie określony poziom, niekoniecznie kwantyfikowalnych istotnych z punktu widzenia decydenta atrybutów, na podstawie których podejmowana jest decyzja.

2. Metody wielokryterialne w analizie decyzyjnej

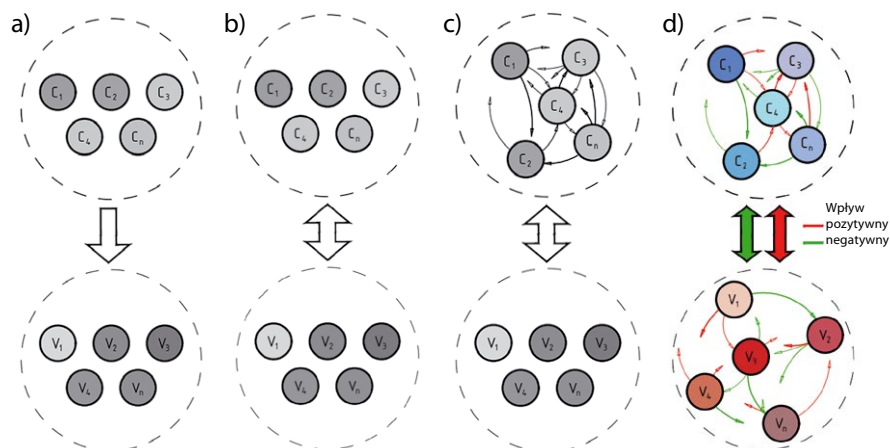
W ostatnim czasie można zaobserwować dynamiczny rozwój metod w ramach drugiego z wyżej wymienionych podejść, czyli wspomaganie decyzji wieloatrybutowych. Metody te

określane skrótem MCDA (*Multi-Criteria Decision Analysis*) powszechnie wykorzystywane są także w budownictwie [2–4]. Prostota modelowania oraz możliwość analizy problemów decyzyjnych, dla których dane mogą mieć zarówno ilościowy, jak i jakościowy charakter niewątpliwie stanowi zaletę tych metod.

W literaturze przedmiotu można wyodrębnić poniższe grupy metod MCDA [5].

- Metody oparte na agregacji ocen do postaci funkcji użyteczności mają związek z amerykańską szkołą wspomaganie decyzji. Sposób analizy jest zgodny z tzw. zasadą „od góry do dołu” czy też „od ogółu do szczegółu”. Takie podejście polega na dekompozycji modelu decyzyjnego na prostsze elementy w celu wyodrębnionej analizy branych pod uwagę wariantów decyzyjnych ocenianych z perspektywy określonych atrybutów. Formułowane przez ekspertów oceny wariantów agregowane są następnie do ustalonej postaci wskaźnika syntetycznego. Przykładową metodą z tej grupy jest procedura: MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*) [6].
- Metody oparte na relacjach przewyższenia utożsamiane są ze szkołą europejską, która preferuje podejście „od dołu do góry” i polega na formułowaniu relacji przewyższenia, bazując na cząstkowych relacjach, określanych na podstawie wyróżnionych cech rozważanych wariantów decyzyjnych. Metody te umożliwiają określanie progów wzajemnej różnialności, a także dominacji poszczególnych wariantów decyzyjnych, jak również wykorzystywanie oceny zgodności oraz niezgodności między cząstkowymi ocenami.

Rys. 1. Schematy ideowe podstawowych struktur zawierające kryteria C_i oraz warianty decyzyjne V_i modelowanego problemu decyzyjnego: a) struktura hierarchiczna, b) struktura z zewnętrznym sprzężeniem zwrotnym, c) struktura z zewnętrznym sprzężeniem zwrotnym oraz z wewnętrznymi współzależnymi relacjami w zbiorze kryteriów, d) pełna struktura sieciowa z dodatkowym wyróżnieniem pozytywnych i negatywnych relacji (źródło: opracowanie własne)



Przykładem takiego podejścia jest rodzina metod ELECTRE (*Elimination and Choice Translating Reality*) [7].

- Metody pozostałe to podejścia stosunkowo mniej złożone od wyżej opisanych i są to przede wszystkim metody: rankingowe, podobieństwa czy też odległościowe od tzw. rozwiązań idealnych i antyidealnych. Przykładowa metoda z tej grupy to procedura TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution*) [8].

Na przestrzeni ostatnich dwóch dekad wiele z tych metod zostało rozwiniętych przede wszystkim w zakresie modelowania niepewności ekspertów w formułowaniu opinii i agregacji ocen grupowych do czego wykorzystywano arytmetykę przedziałową lub logikę rozmytą. Należy zwrócić także uwagę na rozwijające się koncepcje hybrydowego podejścia umożliwiającego komplementarne użycie kilku metod MCDA w takich obszarach modelowania i analizy danego problemu decyzyjnego, do których poszczególne metody są lepiej przystosowane [2, 9].

3. Podejście systemowe do modelowania i analizy problemów decyzyjnych

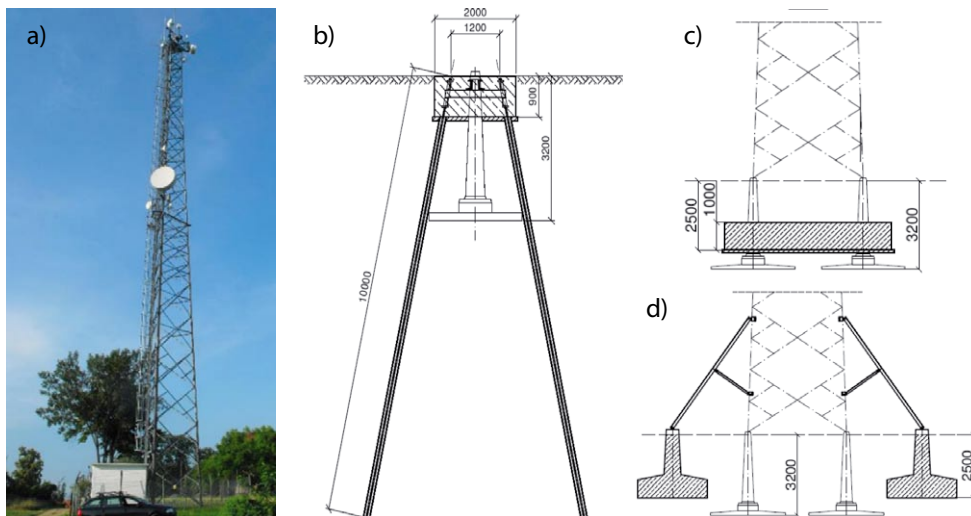
Zdecydowana większość metod MCDA występujących w literaturze przedmiotu zaniedbuje analizę współzależności między kryteriami czy też wariantami decyzyjnymi, co jest dużym uproszczeniem z perspektywy rosnącej złożoności systemowej otaczającej nas rzeczywistości. Zgodnie z teorią systemów [10] system to zbiór elementów, pomiędzy którymi występują wzajemne relacje, a wszystko to jest zorientowane na osiągnięcie konkretnego celu. Każdy problem decyzyjny można więc interpretować jako system zdekomponowanych elementów, takich jak kryteria i warianty decyzyjne, z których co najmniej część może być wzajemnie ze sobą powiązana. Skuteczną koncepcją odwzorowania takich systemów jest modelowanie i analiza strukturalna, która stanowi zbiór różnych narzędzi pozwalających na zrozumienie własności złożonych systemów w tym także problemów decyzyjnych [11].

Podstawowym narzędziem do modelowania struktury analizowanego systemu jest graf skierowany. Wierzchołki grafu

symbolizują elementy modelowanego systemu, zaś łuki relacje (oddziaływania) między tymi elementami. Budowa takiej struktury zależności opiera się na opiniach ekspertów biorących udział w procesie decyzyjnym. Wykorzystanie opinii ekspertów jest również dobrym sposobem na uproszczone modelowanie zależności o nieliniowym charakterze oraz analizy problemu w warunkach trudno mierzalnej informacji. Schematy ideowe podstawowych struktur zależności między elementami (kryteriami i wariantami decyzyjnymi) problemu decyzyjnego przedstawia rysunek 1.

Najprostszą strukturą jest struktura hierarchiczna (rys. 1a) wprowadzająca uporządkowaną formę relacji, w której proces wyznaczania istotności dla poszczególnych elementów (kryteriów i wariantów decyzyjnych) modelu na danym poziomie hierarchii odbywa się poprzez ich analizę względem elementów na poziomie wyższym. Wprowadzenie do struktury systemu zewnętrznej relacji sprzężenia zwrotnego (rys. 1b) powoduje, że nie tylko istotność kryteriów określa wagę wariantów decyzyjnych (jak w hierarchii), lecz również wagę samych wariantów determinuje istotność kryteriów. W pracy [12] autorzy podają przykład problemu decyzyjnego wyboru lepszego pod względem wytrzymałości i estetyki mostu. Pierwszy z porównywanych mostów jest bardziej wytrzymały, lecz z wyglądu jest mniej atrakcyjny od drugiego, przy czym oba są bezpieczne w użytkowaniu. Analiza hierarchiczna takiego problemu decyzyjnego spowoduje, że istotność kryteriów nie będzie oceniana z perspektywy wariantów decyzyjnych i w sposób naturalny kryterium wytrzymałości otrzyma wyższą wagę, co w konsekwencji doprowadzi decydenta do wyboru mostu pierwszego. Wprowadzenie sprzężenia zwrotnego spowoduje jednak, że analiza wysokości wag dla kryteriów wytrzymałości i estetyki dokonywana będzie także z perspektywy wariantów decyzyjnych, co spowoduje, że wybór mostu może być inny na rzecz tego ładniejszego, skoro wiemy, że oba mosty są wystarczająco wytrzymałe. W analizie wielu problemów identyfikowane są również istotne współzależne wewnętrzne relacje między kryteriami (rys. 1c), a w szczególnych przypadkach także i w zbiorze wariantów decyzyjnych (rys. 1d). Uwzględnienie takich współzależności dodatkowo z podziałem na pozytywne

Rys. 2. Wieża telekomunikacyjna i zaproponowane sposoby wzmocnienia jej posadowienia: a) widok wieży, b) zastosowanie mikropali, c) wykonanie płyty żelbetowej, d) wprowadzenie dodatkowych stóp fundamentowych (źródło: opracowanie własne na podstawie) [17]



i negatywne efekty tych oddziaływań powoduje zwiększenie złożoności problemu decyzyjnego, co znacznie komplikuje jego analizę.

Strukturyzacja problemów decyzyjnych wymaga zastosowania specjalnych metod do ich analizy, z których najbardziej znane to: AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [13], ANP (*Analytic Network Process*) [14], DEMATEL (*Decision Making trial and evaluation laboratory*) [15] i WINGS (*Weighted Influence Nonlinear Gauge System*) [16]. Wymienione metody oparte są na agregacji ocen do postaci funkcji użyteczności, a sposób modelowania struktury systemu i jego analizy opiera się na podobnych wyrażeniach algebraicznych. Wejściowe wartości formułowanych przez ekspertów opinii w analizowanym modelu wprowadzane są bowiem do macierzy, której suma wszystkich jej potęg (w sensie granicznym) zwraca wartości wyjściowe. Ze względu na fakt, że wszystkie wyżej wymienione metody mają zbliżone podstawy formalne i prowadzą do podobnych wyników, ważnym czynnikiem wpływającym na wybór konkretnej metody jest jej implementacja i użyteczność na potrzeby analizy konkretnego problemu decyzyjnego. Metody DEMATEL i WINGS umożliwiają w sposób metodyczny budowę struktury relacji między elementami systemu i są dużo prostsze w implementacji, a do jej przeprowadzenia wystarczy wykorzystanie zwykłego arkusza kalkulacyjnego. Jeżeli chodzi o metody AHP i ANP to analiza wcześniej przygotowanego modelu strukturalnego polega na żmudnej procedurze porównywania parami, a w przypadku metody ANP do przeprowadzenia obliczeń potrzebne jest już specjalistyczne oprogramowanie. Znane są przypadki łączenia metod DEMATEL i ANP w formę hybrydy, w której do budowy modelu strukturalnego wykorzystywana jest ta pierwsza zaś do ustalania priorytetów wagowych dla elementów analizowanego systemu wykorzystywana jest druga z wymienionych procedur [2, 9].

4. Przykłady modelowania i analizy strukturalnej problemów decyzyjnych

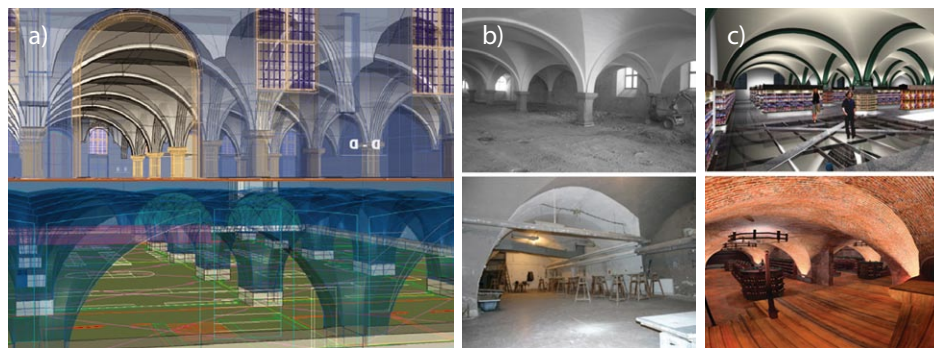
Pierwszy przykład dotyczy wieży telekomunikacyjnej Radiowej Stacji Bazowej (RBS) Wierzbicęce zlokalizowanej

w gminie Nysa na terenie Polski [17]. Planowana modernizacja i rozbudowa przedmiotowej budowli wiąże się ze zwiększeniem obciążeń, co stawia decydentów przed problemem decyzyjnym wyboru wariantu wzmocnienia posadowienia konstrukcji. Uwzględniając szereg ograniczeń ostatecznie, zaproponowano trzy koncepcje wzmocnienia: pierwsza (V_1) polega na wykonaniu dodatkowych stóp fundamentowych, druga (V_2) to zastosowanie mikropali, trzecia (V_3) wiąże się z wykonaniem żelbetowej płyty fundamentowej (rys. 2).

Analiza wariantów wzmocnienia posadowienia konstrukcji dokonana została z uwzględnieniem siedmiu kryteriów: czas wykonania wzmocnienia (C_1), ilość gruntu do wywiezienia (C_2), zaangażowanie potrzebnego sprzętu (C_3), koszt wykonania wzmocnienia, (C_4), potrzeba tymczasowej stabilizacji konstrukcji (C_5), stopień skomplikowania robót (C_6), wymagania formalno-prawne (C_7). Na potrzeby analizy problemu decyzyjnego rozważono różne struktury zależności pomiędzy kryteriami i wariantami decyzyjnymi. Otrzymany w wyniku analizy metodami AHP i ANP ranking wariantów dla każdej z rozważanych struktur modeli decyzyjnych był taki sam, wskazując wariant (V_2), czyli mikropale jako najlepszy względem zaproponowanych kryteriów wyboru zaś wariant (V_1) związany z wykonaniem stóp fundamentowych jako najgorszy z rozpatrywanych. Należy jednak zwrócić uwagę, że zwiększeniu uległy różnice w wartościach priorytetów globalnych między wariantami. Przykładowo w modelu hierarchicznym (rys. 1a) różnica w wartości priorytetów globalnych między pierwszym a drugim wariantem w rankingu wynosiła zaledwie 3%, lecz w przypadku uwzględnienia zewnętrznej zależności w formie sprzężenia zwrotnego (rys. 1b) umożliwiającego weryfikację znaczenia kryteriów dokonywanej z perspektywy wariantów decyzyjnych, zwiększyło tę różnicę do 16%.

Drugi przykład problemu decyzyjnego związany jest z wyborem nowych funkcji użytkowych w adaptacji piwnic i parteru zabytkowego budynku Wielkiej Zbrojowni w mieście Gdańsk [18]. W tym celu zaproponowano następujące

Rys. 3. Jedna z propozycji zagospodarowania Wielkiej Zbrojowni w mieście Gdańsk na funkcję sklepu ogólnospożywczego na parterze oraz winiarnię w piwnicy: a) model 3D obiektu. b) stan istniejący parteru i piwnicy przed adaptacją, c) wizualizacja proponowanych nowych funkcji użytkowych (źródło: opracowanie własne na podstawie) [18]



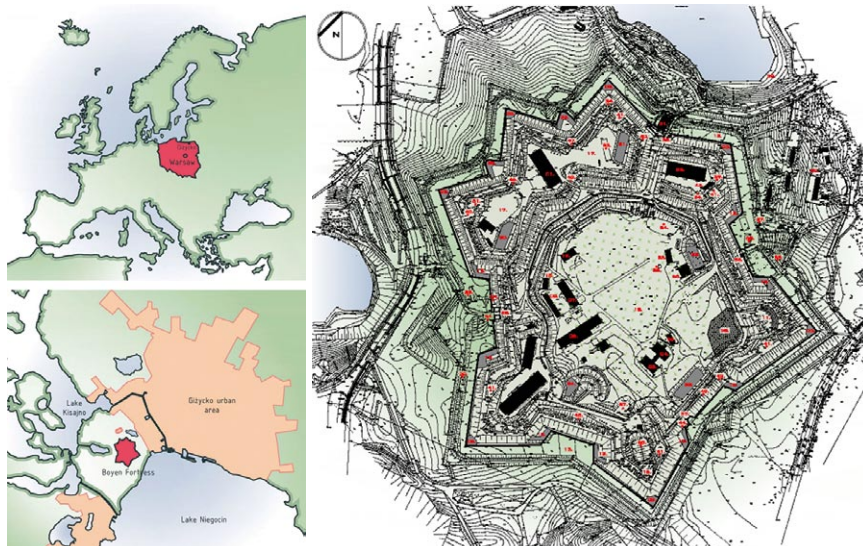
warianty zagospodarowania obiektu. Wariant pierwszy (V_1) przewiduje sklep ogólnospożywczy na parterze oraz winiarnię w piwnicy (rysunek 3). W wariacie drugim (V_2) zaproponowano galerię sztuki na parterze zaś w piwnicy restaurację. Ostatni rozważany zestaw funkcji (V_3) to muzeum historyczne na parterze i kino studyjne w piwnicy.

Zaproponowanym wskaźnikiem jakości rozważanych wariantów funkcji użytkowych był zestaw następujących kryteriów korzyści: ekonomicznych (C_1), społecznych (C_2), wynikających z ochrony środowiska (C_3), z zachowania dziedzictwa kulturowego (C_4), oraz związane z minimalizacją nakładów potrzebnych do przeprowadzenia procesu adaptacji (C_5). Zwrócono uwagę na fakt, że zaproponowane kryteria korzyści w istotny sposób wzajemnie na siebie wpływają (rys. 1c). Do modelowania struktury problemu decyzyjnego z uwzględnieniem wewnętrznych, współzależnych relacji między kryteriami zaproponowano metodę WINGS. Ze względu na niepełny i nieprecyzyjny charakter danych determinowanych przez specyfikę przedmiotowego obiektu zabytkowego autorzy do modelowania niepewności opinii eksperckich wykorzystali teorię liczb rozmytych. Ostatecznie w wyniku przeprowadzonej analizy wariant (V_2) adaptacji obiektu na galerię sztuki na parterze i restaurację w piwnicy okazał się najlepszy z perspektywy przyjętych kryteriów wyboru.

Ostatni przykład modelowania i analizy strukturalnej problemu decyzyjnego dotyczy analizy form użytkowania zespołu budynków zabytkowych w obrębie Twierdzy Boyen w Giżycku [9]. Obiekt ten jest bardzo dobrym przykładem analizy doboru różnie się uzupełniających form użytkowania (rysunki 4 i 5).

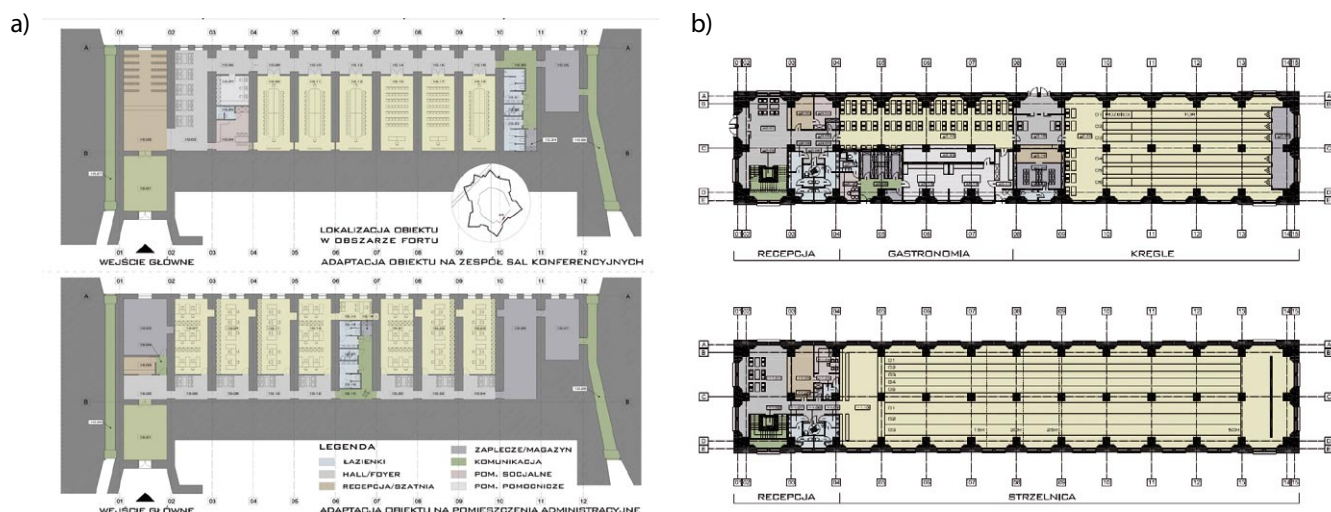
Ze względu na fakt, że twierdza jest stosunkowo dużym kompleksem, który stanowi jedną całość, adaptacja tego miejsca powinna być przeprowadzona kompleksowo i holistycznie, w sposób zapewniający jego funkcjonowanie jako niezależnego, spójnego systemu.

Rys. 4. Zespół obiektów zabytkowych w obrębie Twierdzy Boyen w Giżycku (źródło: opracowanie własne na podstawie) [9]



Aby to było możliwe, nowe funkcje użytkowe powinny wzajemnie się uzupełniać tak, aby mogły pozytywnie wpływać zarówno na inne formy użytkowania, jak i na indywidualne korzyści uzyskane z adaptacji. Zatem dla przedstawionego powyżej przypadku wynikiem wielokryterialnej analizy sposobów użytkowania zabytkowego obiektu nie jest wybór jednego wariantu nowej funkcji, lecz rekomendacja wielu funkcji z określeniem ich procentowego udziału w adaptowanym obiekcie.

Zaproponowano następujące komplementarne funkcje użytkowe: hotelowa (V_1), muzealna (wystawowa) (V_2), komercyjna (V_3), administracyjna (V_4), sportowa (rekreacyjna) (V_5). Komplementarność nowych funkcji użytkowych została uwzględniona w modelu strukturalnym poprzez wprowadzenie wewnętrznych współzależności między wariantami decyzyjnymi (rys. 1d). Do analizy wariantów przyjęto uniwersalny zestaw kryteriów korzyści: ekonomicznych (C_1), społecznych (C_2), wynikające z ochrony środowiska (C_3), z ochrony dziedzictwa kulturowego (C_4), architektonicznych (funkcjonalność i komfort użytkowania) (C_5). Fakt występowania współzależności między wyżej wymienionymi kryteriami również został uwzględniony w modelu decyzyjnym. Ostatecznie model strukturalny problemu decyzyjnego uwzględnia współzależności zarówno w zbiorze kryteriów, jak i wariantów decyzyjnych oraz wprowadzoną zewnętrzną relację sprzężenia zwrotnego pomiędzy wymienionymi zbiorami. Dodatkowo



Rys. 5. Przykładowe warianty funkcji użytkowych dla dwóch wybranych obiektów: a) zespół pomieszczeń konferencyjnych albo administracyjnych, b) różne formy funkcji rekreacyjnych: kręgielnia lub strzelnica (źródło: opracowanie własne na podstawie [9] oraz materiałów archiwalnych IPG sp. z o.o.)

wprowadzono rozróżnienie dotyczące pozytywnych i negatywnych oddziaływań pomiędzy elementami modelu (rys. 1d). Do modelowania i analizy strukturalnej problemu decyzyjnego zaproponowano odpowiednio do tego celu dostosowaną hybrydę metod DEMATEL i ANP.

Wyniki analizy wykazały, że największa część powierzchni obiektu przeznaczonej do adaptacji powinna być wykorzystana na przestrzeń muzealne (wystawowe) (V_2), co jest uzasadnione ze względu na walory dziedzictwa kulturowego Twierdzy Boyen. Pozostały procentowy udział nowych funkcji użytkowych w powierzchni rozkładał się kolejno według rankingu: hotelowa (V_1), sportowa (rekreacyjna) (V_3), administracyjna (V_4), komercyjna (V_5).

5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano systemowe podejście do modelowania i analizy problemów decyzyjnych w budownictwie. Wymienione procedury AHP, ANP, DEMATEL czy WINGS w odróżnieniu od innych znanych z literatury metod umożliwiają modelowanie i analizę strukturalną problemów decyzyjnych, w których zidentyfikowano istotne współzależności między rozważanymi elementami (kryteria i warianty decyzyjne). Potencjał aplikacyjny prezentowanego podejścia potwierdziły przytoczone w artykule wybrane przykłady problemów decyzyjnych. Na koniec należy zwrócić uwagę na fakt, że z racji popularności metody AHP w wielu przypadkach w sposób rutynowy budowana jest uporządkowana struktura hierarchiczna relacji między elementami modelu, co nie zawsze w pełni odzwierciedla specyfikę rozważanego problemu decyzyjnego. Rosnąca złożoność otaczającej nas rzeczywistości raczej powinna skłaniać decydentów do przyjęcia sieciowej współzależności między kryteriami i wariantami decyzyjnymi jako punktu wyjścia do modelowania docelowej struktury rozważanego problemu decyzyjnego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kozmiński A. K., Piotrowski W., Zarządzanie. Zarządzanie. Teoria i praktyka, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002
- [2] Ginda G., Maślak M., Wybrane metody analizy eksperckiej w wielokryterialnej ocenie parametrów determinujących bezpieczeństwo w pożarze, 2015
- [3] Szwabowski J., Deszcz J., Metody wielokryterialnej analizy porównawczej: podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań w budownictwie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2001
- [4] Dydczak M., Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie, Politechnika Opolska, 2010
- [5] Kobryń A., Wielokryterialne wspomaganie decyzji w gospodarowaniu przestrzenią, Difin SA., 2014
- [6] Keeney R., Raiffa H., Decisions with multiple consequences: preferences and value tradeoffs, 1976
- [7] Roy B., Classement et choix en présence de points de vue multiples. Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle, 2(8)1968, str. 57–75
- [8] Hwang C. L., Lai Y. J., Liu T. Y., A new approach for multiple objective decision making, Computers & operations research 20(8)1993, str. 889–899
- [9] Śladowski G., Szewczyk B., Barnaś K., Kania O., Barnaś J., The Boyen Fortress: structural analysis of selecting complementary forms of use for a proposed adaptive reuse project, Heritage Science 9(1)202, str. 11–20
- [10] Von Bertalanffy L., General system theory, a new approach to unity of science. Towards a physical theory of organic teleology, feedback and dynamics, Human biology 4/1951, str. 346–361
- [11] Roberts F. S., Applications of the theory of meaningfulness to psychology, Journal of Mathematical Psychology 29(3)1985, str. 311–332
- [12] Adamus W., Gręda A., Wspomaganie decyzji wielokryterialnych w rozwiązywaniu wybranych problemów organizacyjnych i menedżerskich, Badania operacyjne i decyzje tom 2, 2005, str. 5–36
- [13] Saaty T. L., The Analytic Hierarchy Process: Planning, priority setting, resource allocation, McGraw-Hill, Nowy Jork, 1980
- [14] Saaty T. L., Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process, RWS Publications, Pittsburgh, 1996
- [15] Gabus A., Fontela E., World Problems an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL, Battelle Geneva Research Centre, Switzerland Geneva, 1972
- [16] Michnik J., Weighted Influence Non-linear Gauge System (WINGS) – An analysis method for the systems of interrelated components, European Journal of Operational Research, 228, 2013, str. 536–544
- [17] Szewczyk B., Śladowski G., Ratoń K., Impact of decision model structure on the selection of a telecommunications tower footing reinforcement alternative, Archives of Civil Engineering 67, 2021, str. 309–321
- [18] Radziszewska-Zielina E., Śladowski G., Supporting the selection of a variant of the adaptation of a historical building with the use of fuzzy modelling and structural analysis, Journal of Cultural Heritage 26, 2017, str. 53–63