



**UNIWERSYTET
WARMIŃSKO-MAZURSKI
W OLSZTYNIE**



WYDZIAŁ GEOINŻYNIERII
Dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych
Dyscyplina: inżynieria lądowa, geodezja i transport

mgr inż. Marlena Anna Jurczak

Rozprawa doktorska

**Inkorporacja ryzyka decyzyjnego do procesu oceny wariantów inwestycji
budowlanej**

**Incorporation of decision risk into the evaluation process of construction
project variants**

Praca wykonana w Katedrze Konstrukcji i Procesów Budowlanych

Promotor: dr hab. inż. Elżbieta Szafranko, prof.UWM

Promotor pomocniczy: dr inż. Jolanta Harasymiuk

Olsztyn, 2026

Składam serdeczne podziękowania mojej Pani Promotor
Profesor Elżbiecie Szafranko,
za nieocenione wsparcie i motywację, inspirujące wskazówki,
atmosferę sprzyjającą powstawaniu pracy.

Serdecznie dziękuję mojej Pani Promotor pomocniczej
Jolancie Harasymiuk,
za cenne uwagi merytoryczne, wsparcie organizacyjne i emocjonalne,
które miały istotny wpływ na kształt i jakość tej rozprawy.

STRESZCZENIE

Problematyka podejmowania decyzji w budownictwie wiąże się z obecnością ryzyka, które w połączeniu z koniecznością uwzględnienia wielu kryteriów oceny sprawia, że klasyczne metody wspomagania decyzji mogą prowadzić do nietrafnych wyborów.

Celem pracy jest włączenie problematyki ryzyka do procesu analizy wielokryterialnej w ocenach wariantów inwestycji budowlanych. W tym kontekście sformułowano tezę: „Powszechnie stosowane metody wspomagające ocenę wariantów inwestycyjnych mogą prowadzić do decyzji obciążonych ryzykiem nietrafnego wyboru, a ich uzupełnienie o analizę ryzyka – zgodnie z zaproponowaną metodyką – może poprawić jakość procesu decyzyjnego”.

Strukturę rozprawy można podzielić na dwie zasadnicze części. W części teoretycznej scharakteryzowano: złożoność procesu decyzyjnego, metody wspomagania wyboru wariantów w budownictwie, klasyfikacje ryzyka i standardy zarządzania nim. W części badawczej dokonano identyfikacji różnych czynników ryzyka w procesie projektowania konstrukcji budowlanych oraz przedstawiono możliwości opisanych wcześniej metod w oparciu o analizę trzech wariantów inwestycji drogowej. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano autorską metodę „Risk-Eval-MCDA”, integrującą klasyczne podejście metod wielokryterialnych MCDA z oceną ryzyka. Wprowadzono również modyfikację metody poprzez zastosowanie wskaźnika „RCI (*Risk Count Index*)”, uwzględniającego liczbę zidentyfikowanych ryzyk dla danego wariantu. Metoda została zaprezentowana na przykładzie oceny trzech wariantów inwestycji drogowej z uwzględnieniem kryteriów środowiskowych, społecznych, ekonomicznych i komunikacyjnych. Zastosowanie opracowanej metody może przyczynić się do poprawy jakości decyzji inwestycyjnych.

Element końcowy rozprawy stanowią wnioski z przeprowadzonych rozważań i badań, wskazujące na osiągnięcie zakładanych celów pracy. Zwieńczeniem jest wskazanie kierunków dalszych badań, co świadczy o rozwojowym potencjale poruszanej tematyki.

Słowa kluczowe: podejmowanie decyzji, analiza ryzyka, metody oceny wariantów, inwestycje budowlane

ABSTRACT

The issue of decision-making in construction is inherently associated with the presence of risk, which combined with the necessity to consider multiple evaluation criteria, makes traditional decision-support methods prone to inaccurate choices.

The aim of this dissertation is to incorporate risk analysis into the multi-criteria evaluation process for assessing construction investment alternatives. In this context, the following thesis was formulated: “Commonly used methods supporting the evaluation of investment alternatives may lead to decisions burdened with the risk of an incorrect choice, whereas supplementing them with risk analysis – according to the proposed methodology – can improve the quality of the decision-making process”.

The structure of the dissertation can be divided into two main parts. The theoretical section characterizes the complexity of the decision-making process, methods supporting the selection of alternatives in construction, risk classifications, and risk management standards. The research section identifies various risk factors in the process of structural design and demonstrates the applicability of the previously described methods based on the analysis of three road investment variants.

Based on the conducted research, an original method called “Risk-Eval-MCDA” was developed, integrating the classical multi-criteria decision analysis (MCDA) approach with risk assessment. The method was further enhanced by introducing the “RCI (*Risk Count Index*)”, which accounts for the number of identified risks for a given alternative. The proposed methodology was illustrated through the evaluation of three road investment variants, considering environmental, social, economic, and communication criteria. The application of this method may contribute to improving the quality of investment decisions.

The final part of the dissertation presents conclusions drawn from the conducted analyses and research, confirming the achievement of the assumed objectives. It concludes with an indication of directions for further research, highlighting the developmental potential of the discussed topic.

Key words: decision-making, risk analysis, methods for evaluating alternatives, construction investments

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	3
ABSTRACT.....	4
SPIS TREŚCI.....	5
1. WSTĘP	7
1.1 Prezentacja problemu i uzasadnienie podjęcia tematu	7
1.2 Cel i teza pracy	8
1.3 Zakres pracy	9
1.4 Przyjęta metodyka pracy i sposób rozwiązania problemu badawczego	10
2. PROCES PODEJMOWANIA DECYZJI W BUDOWNICTWIE	12
2.1 Struktura procesu decyzyjnego w budownictwie – uczestnicy, etapy, modele wspomagania	12
2.2 Klasyfikacje metod wielokryterialnych	16
2.3 Metody wielokryterialne stosowane w budownictwie	19
2.4 Ocena danych eksperckich	29
3. CHARAKTERYSTYKA RYZYKA W BUDOWNICTWIE	33
3.1 Definicja i klasyfikacje ryzyka.....	34
3.2 Proces zarządzania ryzykiem	36
3.3 Ryzyko a niezawodność w budownictwie	51
3.4 Ryzyko przy projektowaniu konstrukcji obiektu budowlanego.....	53
4. PRZYKŁAD OCENY WARIANTÓW – BADANIE WŁASNE	64
4.1 Ustalenie kryteriów oceny.....	64
4.2 Przygotowanie danych do dalszej analizy.....	65
4.3 Dobór metody analizy wielokryterialnej.....	79
4.3.1 Metoda analizy wielokryterialnej MCE.....	80
4.3.2 Metoda analizy wielokryterialnej AHP	83
5. RYZYKA TOWARZYSZĄCE WYBOROWI WARIANTÓW INWESTYCYJNYCH	92
5.1 Klasyfikacja ryzyk.....	92
5.2 Wpływ zidentyfikowanych ryzyk na wynik procesu decyzyjnego	95
6. AUTORSKA METODA OCENY RYZYKA STOSOWANIA MCDM W OCENACH WARIANTÓW INWESTYCJI BUDOWLANYCH	98

6.1	Metodyka oceny ryzyka decyzyjnego w MCDA „RiskEval-MCDA”	98
6.2	Przykład oceny ryzyka decyzyjnego w MCDA metodą „RiskEval-MCDA”	99
6.2.1	Wnioski dotyczące zastosowanej metody	103
6.3	Rozszerzenie opracowanej metody	104
6.3.1	Wnioski dotyczące rozszerzonej metody	111
7.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI	112
8.	Kierunki dalszych prac	114
	LITERATURA	115
	ZESTAWIENIE RYSUNKÓW	127
	ZESTAWIENIE TABEL	129
	ZAŁĄCZNIKI	132

1. WSTĘP

1.1 Prezentacja problemu i uzasadnienie podjęcia tematu

Realizacja inwestycji budowlanych jest procesem wieloetapowym i wymagającym odpowiedniego przygotowania na każdym etapie cyklu życia. Opracowywane są różne warianty, spośród których należy wybrać rozwiązanie najlepiej spełniające określone kryteria. Podejmowanie decyzji w tym procesie stanowi jedno z kluczowych i najbardziej złożonych zagadnień, obejmujących m.in. wybór lokalizacji, strategii przetargowej, wykonawcy, wariantu konstrukcyjnego czy sposobu realizacji robót. W sytuacjach, gdy istnieje kilka możliwych rozwiązań, a analiza wymaga uwzględnienia wielu kryteriów, szczególnie przydatne okazują się metody analizy wielokryterialnej.

Koncepcja optymalizacji wielokryterialnej została zapoczątkowana przez Francisa Ysidra Edgewortha w 1881 roku, a następnie rozwinięta przez Vilfreda Pareto na początku XX wieku (Kuryło, 2017). W kolejnych latach rozwój teorii wyboru i preferencji kontynuowali m.in. Arrow (1951) (Arrow, 1951) oraz Keeney i Raiffa (1976) (Ralph & Howard, 1976), którzy stworzyli podstawy wieloatrybutowej teorii użyteczności. W drugiej połowie XX wieku powstały kluczowe metody MCDA, takie jak AHP (Saaty, 1980), ELECTRE (Roy, 1990a) czy PROMETHEE (Brans & Vincke, 1985), a następnie TOPSIS (Hwang & Yoon, 1981) i VIKOR (Opricovic & Tzeng, 2004). Pomimo bogatego dorobku wyniki uzyskane różnymi metodami często są rozbieżne, co potwierdza złożoność problemu decyzyjnego i uzasadnia potrzebę poszukiwania nowych rozwiązań integrujących analizę wielokryterialną z oceną ryzyka.

Pierwszym etapem takiej analizy jest ocena sytuacji, czyli identyfikacja czynników, mających wpływ na podjęcie decyzji. Kluczowe znaczenie ma ustalenie priorytetów i celu, gdyż każda decyzja pociąga za sobą określone skutki (Guitouni & Martel, 1998). W praktyce trudności powstają głównie w związku z doбором odpowiednich kryteriów – ich zestawienie powinno być kompletne oraz adekwatne do założeń inwestycji. Niewłaściwy wybór kryteriów może prowadzić do błędnych decyzji, a niepełne uwzględnienie aspektów inwestycji często wymusza powrót do wcześniejszych etapów analizy.

Kolejnym krokiem jest ocena ważności kryteriów. Często przeprowadzana jest ona w oparciu o duże zbiory danych, które trudno poddać bezpośredniej analizie. Istnieje wiele podejść do porządkowania tych informacji, jednak każda z nich wymaga dużego nakładu pracy, a co istotniejsze, otrzymane wyniki mogą budzić kontrowersje.

Wybór zastosowanej metody wielokryterialnej może również prowadzić do uzyskania nieoptymalnego efektu z uwagi na fakt, że każda z metod może wskazać inne rozwiązanie.

Każdy z wymienionych obszarów stwarza potencjalne trudności w wyborze wariantu najlepiej spełniającego oczekiwania. Dodatkowo, sytuację może komplikować obecność różnych czynników zakłócających proces podejmowania decyzji, co wiąże się z ryzykiem nietrafnego wyboru.

Wielu autorów (Flanagan & Norman, 1993; Górecki, 2018; Górecki & Bizon-Górecka, 2017; Zavadskas i in., 2011) rozpatruje problematykę analizy i oceny ryzyka towarzyszącego działalności budowlanej. Brakuje jednak badań naukowych na temat oceny ryzyka towarzyszącego wyborom wariantów projektów budowlanych (Górecki & Núñez-Cacho, 2022). Zidentyfikowana luka badawcza zainspirowała autorkę do podjęcia tej tematyki w dysertacji doktorskiej.

1.2 Cel i teza pracy

Niedostatek badań w zakresie ryzyka towarzyszącego decyzjom o wyborze wariantu przedsięwzięcia budowlanego był podstawą do sformułowania celu ogólnego i celów szczegółowych.

Celem ogólnym pracy jest włączenie oceny ryzyka do procesu analizy wielokryterialnej w ocenach wariantów inwestycji budowlanych.

Cele szczegółowe pracy:

- przegląd literatury związanej z procesami decyzyjnymi w budownictwie i z oceną wariantów projektów budowlanych,
- rozpoznanie metod szacowania ryzyka w działalności budowlanej,
- określenie luki badawczej w zakresie metodyki oceny ryzyka przy wyborze wariantów,
- określenie ryzyk towarzyszących analizie wielokryterialnej na wszystkich etapach procesu oceny,
- dobór metodyki badawczej umożliwiającej integrację oceny ryzyka z analizą MCDA,
- przeprowadzenie próbnych badań, analiza wyników oraz opracowanie autorskiej metodyki oceny ryzyka decyzyjnego,
- zastosowanie opracowanej metodyki w studium przypadku, w celu weryfikacji tezy pracy i oceny jej przydatności w praktyce inżynierskiej.

Teza pracy:

Powszechnie stosowane metody wspomagające ocenę wariantów inwestycyjnych mogą prowadzić do decyzji obarczonych ryzykiem nietrafionego wyboru, a ich uzupełnienie o analizę ryzyka – zgodnie z zaproponowaną metodyką – może poprawić jakość procesu decyzyjnego.

1.3 Zakres pracy

Zakres niniejszej rozprawy obejmuje analizę podejmowania decyzji w budownictwie ze szczególnym uwzględnieniem ryzyka towarzyszącego stosowaniu metod wielokryterialnych w ocenie wariantów. Praca została podzielona na siedem rozdziałów głównych.

W rozdziale 1 przedstawiono wprowadzenie do tematyki badawczej, uzasadnienie wyboru tematu, a także cel i zakres oraz przyjętą metodykę badawczą.

Rozdział 2 stanowi przegląd literatury związanej z podejmowaniem decyzji w budownictwie. Omówiono strukturę tego procesu, uczestników, etapy oraz wybrane metody wielokryterialne, stosowane w ocenie wariantów inwestycyjnych.

W rozdziale 3 dokonano charakterystyki ryzyka w budownictwie na podstawie dostępnej literatury. Przedstawiono jego definicje, klasyfikacje, proces zarządzania ryzykiem oraz metody jego szacowania. Szczególną uwagę zwrócono na relację pomiędzy ryzykiem a niezawodnością. W rozdziale tym zawarto również wyniki badań własnych dotyczących ryzyka przy projektowaniu konstrukcji obiektów budowlanych.

Dalsza część pracy stanowi empiryczne rozwinięcie zagadnień teoretycznych. W rozdziale 4 przedstawiono studium przypadku oceny wariantów inwestycji budowlanej na przykładzie budowy odcinka drogi. Przeprowadzono procedurę wyboru jednego z trzech wariantów, stosując metody wielokryterialne – MCE oraz AHP. Szczególną uwagę zwrócono na trudności, związane z przygotowaniem danych do dalszej analizy. Stwierdzono, że stosowane metody wyboru nie są jednoznaczne – wyniki są rozbieżne, a także wymagają znaczącego wkładu pracy i czasu.

W rozdziale 5 dokonano analizy ryzyka towarzyszącego stosowaniu metod wielokryterialnych w ocenie wariantów inwestycji budowlanych. Zidentyfikowano potencjalne źródła ryzyka na poszczególnych etapach procesu, dokonano ich klasyfikacji oraz przeanalizowano ich wpływ na efektywność podejmowanych decyzji inwestycyjnych.

Rozdział 6 stanowi kluczowy element pracy – zaprezentowano w nim autorską metodę oceny ryzyka decyzyjnego w analizach MCDA. Przedstawiono jej założenia, a także przykład zastosowania. W dalszej części rozdziału zaproponowano rozszerzenie metody poprzez wprowadzenie dodatkowego parametru oceny.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie wyników pracy, wnioski końcowe oraz wskazanie kierunków dalszych badań.

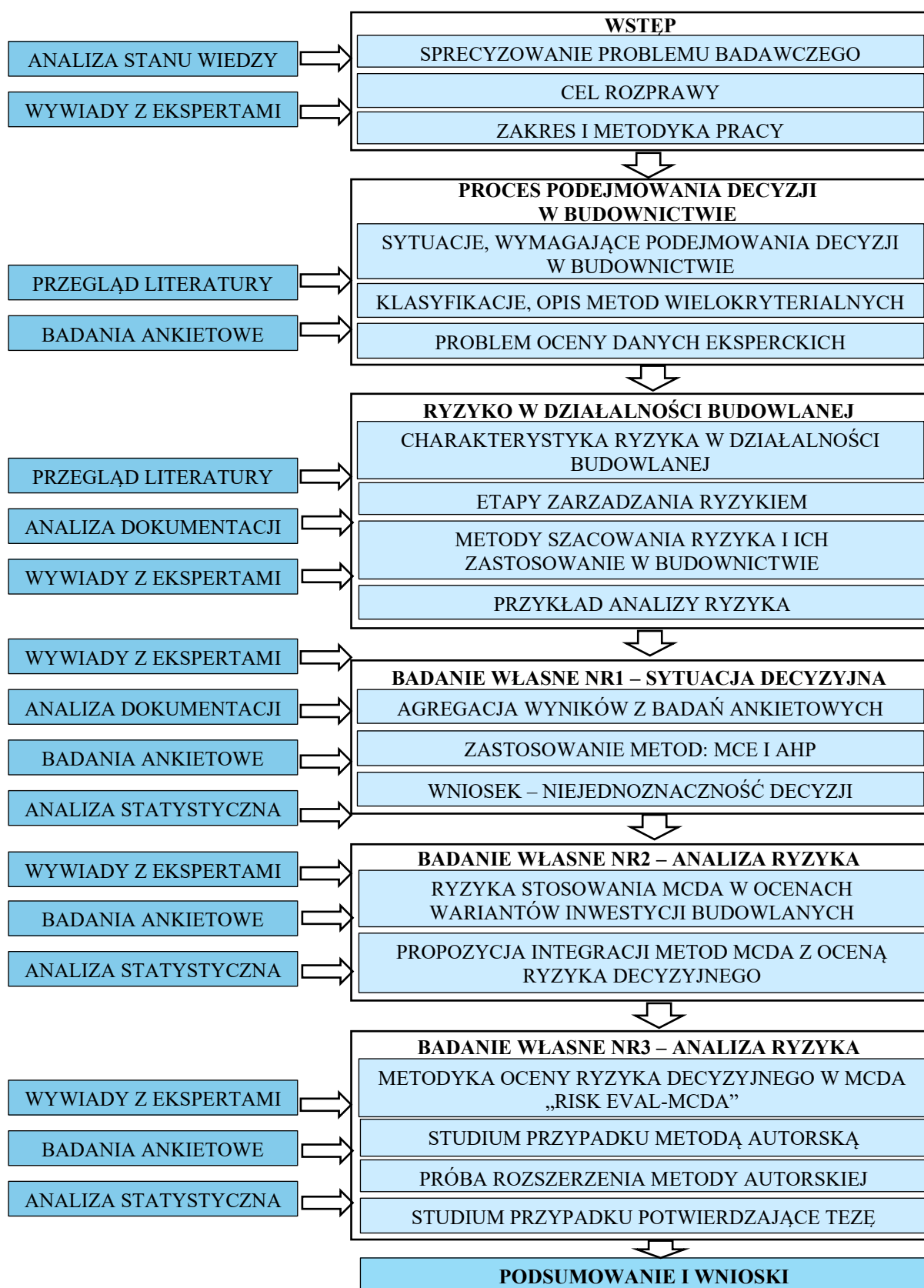
Całość pracy ma charakter interdyscyplinarny, łączy zagadnienia z zakresu inżynierii budowlanej, zarządzania ryzykiem, metod wspomagania decyzji oraz analizy danych eksperckich.

1.4 Przyjęta metodyka pracy i sposób rozwiązania problemu badawczego

W celu weryfikacji postawionej tezy oraz realizacji założonych celów badawczych przyjęto metodykę obejmującą analizę teoretyczną i badania empiryczne. Punktem wyjścia była identyfikacja problemu badawczego na podstawie analizy stanu wiedzy w zakresie podejmowania decyzji w budownictwie oraz ryzyka, związanego z tymi wyborami. Schemat ideowy przeprowadzonych badań i analiz pokazano na rysunku 1.1.

Po zidentyfikowaniu celu pracy i luki badawczej określono zakres badań oraz przyjęto metodykę. Kolejnym krokiem była analiza procesu podejmowania decyzji w budownictwie, obejmująca charakterystykę struktury procesu decyzyjnego, jego uczestników, etapów oraz modeli wspomagania, a także przegląd metod wielokryterialnych najczęściej stosowanych w praktyce inżynierskiej. Szczególną uwagę poświęcono problemowi oceny danych eksperckich. Następnie scharakteryzowano ryzyko, zaczynając od jego definicji, po czym omówiono proces zarządzania nim oraz powiązania ryzyka z niezawodnością konstrukcji budowlanych. W ramach badań własnych dokonano identyfikacji ryzyk związanych z procesem projektowania konstrukcji, ich klasyfikacji oraz oceny istotności. Kolejnym etapem była analiza sytuacji decyzyjnej, polegająca na wyborze wariantu inwestycji drogowej z wykorzystaniem metod wielokryterialnych MCE i AHP, co umożliwiło porównanie wyników. Na podstawie zebranych danych opracowano autorską metodę „Risk-Eval-MCDA” integrującą analizę ryzyka z klasycznymi metodami wielokryterialnymi. Metoda została rozszerzona o wskaźnik RCI (*Risk Count Index*), uwzględniający liczbę zidentyfikowanych ryzyk dla danego wariantu. Weryfikację metody przeprowadzono w studium przypadku, obejmującym ocenę trzech wariantów inwestycji drogowej z uwzględnieniem kryteriów środowiskowych, społecznych, ekonomicznych i komunikacyjnych. Ostatnim etapem była analiza wyników oraz sformułowanie wniosków i kierunków dalszych badań.

Warto podkreślić, że zagadnienie zarządzania ryzykiem w przedsięwzięciach budowlanych, mieści się w obszarze badawczym budownictwa w specjalności Inżynieria Przedsięwzięć Budowlanych, co uzasadnia wybór tematyki i przyjętego podejścia badawczego.



Rysunek 1.1 Schemat ideowy przeprowadzonych badań i analiz w pracy.
Źródło: opracowanie własne

2. PROCES PODEJMOWANIA DECYZJI W BUDOWNICTWIE

Podejmowanie decyzji jest kluczowym elementem zarządzania w każdej dziedzinie, zatem jest to zagadnienie uniwersalne. Wybory mogą dotyczyć spraw codziennych, życiowych, zawodowych czy społecznych. W kontekście budownictwa decyzje podejmowane są na wszystkich etapach cyklu życia obiektu – od fazy koncepcyjnej, przez projektowanie, realizację, aż po eksploatację. Proces decyzyjny jest złożony i wieloetapowy. Obejmuje identyfikację problemu, analizę dostępnych wariantów, ocenę ryzyka oraz wdrożenie wybranego rozwiązania. Na jakość podejmowanych decyzji wpływa wiele czynników, w tym: ludzkie emocje, samopoczucie, wcześniejsze doświadczenia, osobiste wartości i przekonania respondenta, wpływ otoczenia, jak również dostępność informacji.

W sektorze budowlanym decyzje dotyczą m.in. wyboru lokalizacji inwestycji, planowania, projektowania, technologii wykonania, strategii finansowania, a także zgodności z obowiązującymi przepisami i normami. Zwłaszcza w obliczu ciągłych zmian na rynku i rosnącej konkurencji, istotne znaczenie ma dostęp do wiarygodnych danych oraz umiejętność ich analizy. Jednym z kluczowych wyzwań jest wybór odpowiednich metod analitycznych, w tym wielokryterialnych, które umożliwiają uwzględnienie różnych, często sprzecznych kryteriów oceny.

2.1 Struktura procesu decyzyjnego w budownictwie – uczestnicy, etapy, modele wspomagania

W poszczególnych etapach realizacji przedsięwzięć budowlanych decyzje są podejmowane przez różne podmioty, których kompetencje i odpowiedzialność są określone przepisami prawa. Należą do nich: inwestor, inspektor nadzoru inwestorskiego, projektant, kierownik budowy/kierownik robót. Istotne znaczenie mają również organy administracji architektoniczno-budowlanej, które np. wydają decyzje o pozwoleniu na budowę, oraz organy nadzoru budowlanego, odpowiedzialne m.in. za wydanie pozwolenia na użytkowanie obiektu. Warto podkreślić, że wpływ na decyzje podejmowane w ramach przedsięwzięć budowlanych mogą mieć również podmioty niebiorące bezpośredniego udziału w realizacji inwestycji, lecz zainteresowane jej przebiegiem i skutkami, np. społeczność lokalna, organizacje ekologiczne, właściciele sąsiednich nieruchomości oraz instytucje opiniujące (Deszcz, 2019).

Zgodnie z klasyfikacją przedstawioną przez Roy'a (Roy, 1990a), w procesie decyzyjnym wyróżnia się trzy główne grupy uczestników:

- decydent,

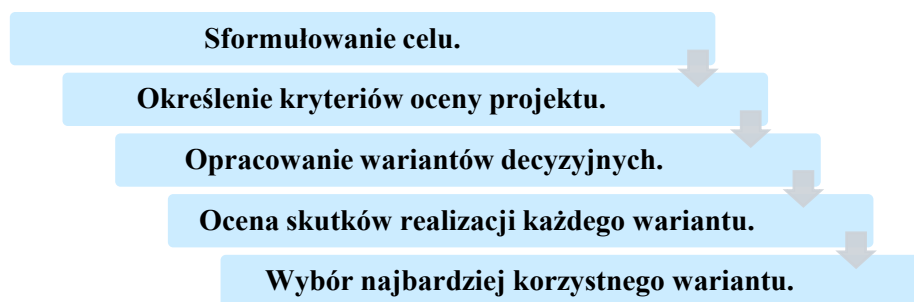
- analityk,
- inne podmioty zainteresowane rozwiązaniem problemu.

Decydentem może być osoba indywidualna lub grupa ekspertów, którzy określają preferencje i starają się, aby proces decyzyjny był do nich dostosowany. W odniesieniu do budownictwa może nim być inwestor, deweloper, projektant, czy też osoba zamierzająca kupić mieszkanie. Taka osoba powinna być kompetentna i właściwie przygotowana do roli eksperta, aby jego ocena była rzetelna, obiektywna i zgodna ze sztuką budowlaną (Książek, 2010). Preferencje decydenta są uzależnione od wielu czynników, które mogą przyczyniać się do zmniejszenia trafności oceny. Według (Książek & Nowak, 2011) na ocenę ma wpływ:

- punkt widzenia sytuacji decyzyjnej,
- poziom wiedzy, doświadczenie,
- stopień skomplikowania problemu,
- typ sytuacji decyzyjnej,
- otoczenie środowiskowe,
- wpływ innych osób (w przypadku decyzji grupowych),
- elementy psychologiczne, takie jak stan emocjonalny decydenta czy też jego własne mniemanie o sobie.

Analityk to osoba, która wspiera decydenta poprzez przygotowanie danych, analizę wariantów, formułowanie rekomendacji. Jego kompetencje mają bezpośredni wpływ na jakość podejmowanych decyzji. Natomiast interesariusze to podmioty zainteresowane rozwiązaniem problemu, których opinie, potrzeby i oczekiwania mogą wpływać na przebieg i wynik procesu decyzyjnego.

Na etapie przygotowania skomplikowanych inwestycji często przeprowadzaną analizą jest studium wykonalności, które dostarcza informacji wspomagających podjęcie decyzji. Warianty inwestycyjne mogą być oceniane przy zastosowaniu różnych metod analitycznych, w tym analizy kosztów i korzyści (ang. *cost-benefit analysis* – CBA) oraz analizy wielokryterialnej (ang. *multi-criteria decision analysis* – MCDA), która pozwala uwzględnić wiele kryteriów jednocześnie. Zastosowanie metod MCDA umożliwia kompleksową ocenę alternatyw, uwzględniając zarówno kryteria ilościowe jak i jakościowe. Dla zapewnienia przejrzystości, proces decyzyjny dobrze jest realizować w sposób uporządkowany. Często spotyka się podział na etapy, przedstawione na rysunku 2.1.



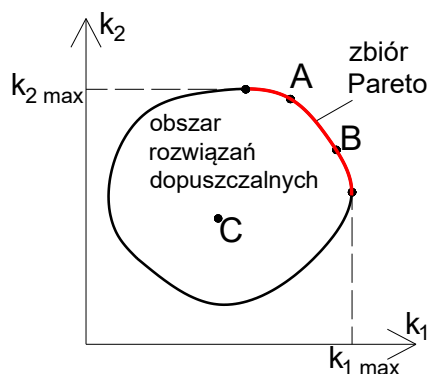
Rysunek 2.1 Etapy procesu decyzyjnego.

Źródło: (Szafranko, 2019)

Ocena wariantów prawie zawsze obejmuje uwzględnienie szeregu kryteriów, które powinny być spełnione przez każde rozwiązanie alternatywne (Książek i in., 2014). Dylemat powstaje w związku z tym, że nie istnieje jeden uniwersalny zestaw kryteriów, który byłby odpowiedni dla wszystkich typów inwestycji budowlanych. Można jednak wyodrębnić grupy czynników, które powtarzają się w różnych przypadkach. Są to m.in.: koszty, czas realizacji, jakość wykonania, wpływ na środowisko czy zgodność z przepisami prawnymi (Cheng i in., 2025). Trudno również zdecydować, która metoda wielokryterialna jest najbardziej odpowiednia w danej sytuacji. W przypadku mniejszej liczby kryteriów możliwe jest zastosowanie prostszych metod analitycznych, natomiast w bardziej złożonych inwestycjach konieczne jest wykorzystanie zaawansowanych narzędzi (Soltanikarbaschi & Hammad, 2023). Duże zastosowanie mają systemy wspomagania decyzji (SWD), które w sposób komputerowy pomagają decydentom rozwiązywać problemy z wykorzystaniem danych i modeli. Systemy te ułatwiają zrozumienie i modelowanie świata zewnętrznego, skracają czas zbierania i przetwarzania danych, łączą różne techniki przetwarzania danych (El-Abbasy, 2025).

Modele wspomagania decyzji tworzy się w celu wsparcia procesu myślowego decydenta i zwiększenia skuteczności podejmowanych decyzji. Podczas konstruowania modelu pojawiają się trudności, takie jak konieczność formalnego zapisu sytuacji decyzyjnej, czy obecność dużej liczby elementów opisu, których znaczenie trudno ocenić na etapie początkowym. W zależności od rozpatrywanego problemu należy liczyć się ze zmianami w ocenie różnych wielkości, np. ceny na rynku, technologii. Do systemów wspomagania decyzji można zaliczyć analizę wielokryterialną MCA (ang. *Multiple Criteria Analysis*). Metodyka ta umożliwia wyznaczenie rozwiązania kompromisowego, które nie jest najkorzystniejsze z punktu widzenia wszystkich kryteriów, lecz najlepsze w odniesieniu do globalnej funkcji celu (Dean, 2022). Oznacza to, że nie można znaleźć rozwiązania lepszego względem jednego kryterium bez pogorszenia wyniku w odniesieniu do pozostałych. Takie rozwiązanie nazywane jest „optymalnym w sensie Pareto” lub „Pareto-optymalne” (niezdominowane) (Dytczak, Ginda, &

Jastrząbek, 2010; Gawin & Woźniak, 2017). Graficzne przedstawienie tej zasady zaprezentowano na rysunku 2.2, dla przykładu maksymalizacji dwóch kryteriów k_1 , k_2 .



Rysunek 2.2 Interpretacja graficzna zbioru rozwiązań Pareto.
Źródło: opracowanie własne

Zarówno rozwiązanie A jak i B nie może zostać polepszone ze względu na dwa kryteria k_1 i k_2 jednocześnie – poprawa względem jednego spowoduje pogorszenie z uwagi na drugie, stąd są to rozwiązania „w sensie Pareto”.

W celu zapewnienia przejrzystości procesu decyzyjnego oraz uwzględnienia ograniczeń percepcyjnych decydenta, zaleca się ograniczenie liczby kryteriów. Zgodnie z zaleceniami maksymalna ich liczba nie powinna przekraczać dziewięciu (Kaczorek, 2022). W zależności od charakteru kryteriów wyróżnia się dwa podejścia oceny: statystyczne i eksperckie. Podejście statystyczne jest stosowane w przypadku kryteriów mierzalnych w oparciu o dostępne dane statystyczne. Natomiast na szerszą skalę do kompleksowej oceny stosowany jest system ekspercki, w którym poszczególnym kryteriom przypisywane są oceny, warianty szacowane i porównywane, nawet w przypadku czynników trudnych do jednoznacznego zmierzenia lub porównania. Schemat postępowania w tym systemie przedstawiono na rysunku 2.3.

1. Zdefiniowanie grup kryteriów i ich wstępna analiza.
2. Wybór ekspertów i ustalenie zasad współpracy.
3. Ocena kryteriów.
4. Uporządkowanie i agregacja danych.
5. Przygotowanie danych do dalszych analiz.
6. Zastosowanie wybranej metody analizy wielokryterialnej.
7. Ocena i analiza uzyskanych wyników.
8. Wybór wariantu i uzasadnienie wyboru.

Rysunek 2.3 Schemat systemu eksperckiego.
Źródło: (Szafranko, 2019)

Inny schemat procedury rozwiązywania problemów decyzyjnych podał Żak (Żak i in., 2004), co pokazano na rysunku 2.4.

I FAZA: Identyfikacja i werbalny opis problemu decyzyjnego.
II FAZA: Konstrukcja matematycznego modelu decyzyjnego.
III FAZA: Analiza oraz wybór metod i algorytmów pozwalających na rozwiązanie problemu decyzyjnego.
IV FAZA: Opracowanie komputerowej implementacji wybranych metod i algorytmów.
V FAZA: Komputerowe eksperymenty obliczeniowe.
VI FAZA: Analiza wyników, przegląd i ocena rozwiązań oraz wybór rozwiązania najbardziej satysfakcjonującego (kompromisowego).

Rysunek 2.4 Fazy procedury wielokryterialnej wg Żaka.
Źródło: (Szafranko, 2019)

Fazy IV i V, przedstawione na rysunku 2.4 odnoszą się do metod wymagających realizacji w środowisku informatycznym. W przypadku takich rozwiązań ważne jest, aby werbalny i matematyczny zapis przetworzyć na odpowiednik przyswajalny przez komputer. Finałnym etapem jest interpretacja rezultatów przez decydentów, obejmująca ich przegląd, ocenę oraz ewentualne dostosowanie parametrów decyzyjnych w celu wyboru rozwiązania w największym stopniu spełniającego założone cele.

2.2 Klasyfikacje metod wielokryterialnych

Rodzina metod wielokryterialnego podejmowania decyzji jest bardzo szeroka, stąd w literaturze pojawiają się różne sposoby ich klasyfikacji. Dytczak w swojej książce (Dytczak, 2010) zaproponował podział na dwie grupy, ujmujące problem podejmowania decyzji w odmienny sposób. Pierwszą kategorię stanowią problemy decyzji wieloatrybutowych (wielokryterialnych) (ang. *Multiple Attribute Decision Analysis* – MADA), polegające na ocenie wcześniej ustalonych, konkretnych wariantów (dysponuje się w nich skończonym zbiorem kryteriów). Drugą zaś problemy decyzji wielocelowych (ang. *Multiple Objective Decision Making* – MODM), w których definiowane są warianty. Porównania tych metod dokonano w tabeli 2.1.

Metody wielokryterialnej analizy decyzji MCDA rozwinęły się w dwóch podstawowych kierunkach, tworząc dwie odrębne szkoły: amerykańską i europejską (Żak i in., 2004). Pierwsza grupa wywodząca się ze szkoły amerykańskiej opiera się na wieloatrybutowej teorii użyteczności, do której zalicza się np.: MAUT (ang. *Multi-Attribute Utility Theory*), AHP (ang.

Analytic Hierarchy Process), DEMATEL (ang. *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*). Polega ona na agregowaniu różnych kryteriów do jednej funkcji użyteczności, która poddawana jest optymalizacji. W jednej globalnej funkcji ujętych jest kilka kryteriów. Charakterystyczną cechą jest porównywalność wszystkich wariantów danego problemu (Jacyna & Turkowski, 2014). Druga rodzina to metody oparte na relacji przewyższania. Narodziła się ona we Francji, a za jej twórcę uznawany jest Roy (Roy B., 1990b). W tym przypadku dopuszcza się występowanie nieporównywalnych wariantów, co oznacza, że decydent nie zawsze potrafi wskazać jednoznacznie lepszego z dwóch rozwiązań (Broniewicz & Dziurdzikowska, 2017; Żak i in., 2004). Porównania realizowane są poprzez tworzenie relacji binarnych, które pozwalają stwierdzić, że dany wariant jest co najmniej tak dobry jak inny.

Tabela 2.1 Porównanie metod MADA i MODM.

Porównywany element	MADA	MODM
Ocena wariantów oparta o	atrybuty (kryteria)	cele
Cel	nie wyrażony wprost	wyraźnie określony
Atrybut	wyraźnie określony	nie wyrażony wprost
Ograniczenia	nie występują (są uwzględnione w kryteriach)	występują
Zbiór rozwiązań	skończony (dyskretny)	nieskończony (ciągły)

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Dytczak, 2010)

Proces podejmowania decyzji nie jest procesem jednorazowym, ale iteracyjnym uczeniem się decydenta o problemie decyzyjnym. Stąd wywodzi się trzecia najnowsza grupa metod określana jako metody interaktywne. Charakterystyczne dla tych metod jest przeplatanie się fazy obliczeniowej i podejmowania decyzji, czyli dialog z decydem (Nowak, 2008). W pierwszym etapie decydent otrzymuje rozwiązania przykładowe lub pareto-optymalne, a w drugim ocenia je, wprowadzając dodatkowe informacje preferencyjne oraz wskazując kierunki poprawy. Proces jest powtarzany do momentu uzyskania rozwiązania, które będzie satysfakcjonowało decydenta – rozwiązania kompromisowego.

W zależności od narzędzi zaangażowanych w ocenę, wyróżnia się metody: matematyczne, geometryczne, taksonomiczne, kwantytatywne (ilościowe). W pracy (Książek, 2011) dokonano analizy tych grup metod w odniesieniu do dziesięciu wybranych wariantów obiektów budowlanych. Porównaniu poddano następujące aspekty: dane wejściowe, liczbę kryteriów oceny, pracochłonność, prezentację wyników. Porównania dokonano stosując oceny

lingwistyczne: „TAK”, „NIE” oraz system punktowy – 0/1 (1 – oznacza, że kryterium jest spełnione, 0 – charakterystykę odwrotną). Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono zasadność stosowania metod matematycznych: ELECTRE (ang. *Elimination et Choix Rasistiques des Alternatives*), AHP, punktu idealnego, entropii oraz metody wykorzystującej elementy logiki rozmytej. Metody te porównano w drugim etapie dodając kryterium „Stopień korelacji wyników”. Najniższą ocenę otrzymała metoda AHP, gdyż wiąże się z nią konieczność przekształcenia wejściowej macierzy danych i dostosowania jej do przyjętej w algorytmie dziesięciostopniowej skali ocen, jak też wysoki stopień skomplikowania procedury postępowania w porównaniu z pozostałymi metodami. W (Trzaskalik, 2014) zaprezentowano najczęściej wykorzystywane wielokryterialne metody dyskretne i możliwości ich zastosowań. Wśród nich wyróżniono m.in. metody AHP, ANP (ang. *Analytic Network Process*), ELECTRE, PROMETHEE (ang. *Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations*), metody werbalne, TOPSIS (ang. *Technique for Order Preference using Similarity to Ideal Solution*), BIPOLAR oraz metody interaktywne w warunkach ryzyka. Są to metody dwuetapowe – etap analityczny (podział na części) i etap syntezy (łączenie w całość).

W Polsce usystematyzowaniem wiedzy na temat analizy wielokryterialnej oraz dalszym jej rozwojem zajmował się zespół badawczy pod kierunkiem Tadeusza Trzaskalika (projekt NN 111235036) w latach 2009-2012. Swój wkład mieli również pracownicy i doktoranci Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach oraz Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. W (Trzaskalik, 2014) wyróżniono wybrane metody oceny wielokryterialnej:

- metody addytywne,
- metoda analitycznej hierarchizacji i metody pokrewne,
- metody werbalne,
- metody ELECTRE,
- metody PROMETHEE,
- wykorzystanie punktów referencyjnych,
- metody interaktywne.

Przegląd klasyfikacji metod wielokryterialnych wskazuje na dużą ich różnorodność i brak uniwersalnego rozwiązania, co podkreśla konieczność świadomego doboru metody do specyfiki problemu decyzyjnego oraz otwiera perspektywę dla rozwiązań hybrydowych, łączących tradycyjne podejścia z nowoczesnymi.

2.3 Metody wielokryterialne stosowane w budownictwie

Z uwagi na specyfikę budownictwa i decyzji towarzyszących realizacji przedsięwzięć, szczególna uwaga została poświęcona wybranym metodom analizy wielokryterialnej. Badania wykazały popularność metod o niezbyt skomplikowanym aparacie matematycznym.

Bezpośrednie porównanie wariantów jest możliwe dzięki metodzie MCE (ang. *Multi-Criteria Evaluation*). Polega ona na ustaleniu wag i oszacowaniu ważności kryteriów. MCE jest prosta w zastosowaniu i przejrzysta w interpretacji – porównanie kryteriów na tym samym poziomie. Znajduje zastosowanie szczególnie w przypadku mniejszej liczby kryteriów. Przykładem wykorzystania MCE jest analiza dwóch alternatywnych rozwiązań konstrukcyjnych dźwigara dachowego – strunobetonowego oraz stalowego (Szafranko, 2015). W innym badaniu zastosowano metodę skalaryzacji punktowej do oceny wariantów organizacyjnych inwestycji budowlanych, uwzględniając trzy grupy kryteriów: 1) technologie realizacji robót, 2) potencjał wykonawczy podmiotu realizującego inwestycję oraz 3) uwarunkowania przestrzenne lokalizacji budowy. Oceny dokonano bezpośrednio w skali punktowej od 0 do 3 (3 – maksymalne spełnienie danego kryterium, 0 – brak jego spełnienia). Analizie poddano jedynie kryteria główne, zasugerowano dokładniejsze badania, obejmujące również podkryteria (Szafranko, 2019).

Metoda analitycznej hierarchizacji problemu decyzyjnego AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*) to główna metoda szkoły amerykańskiej, wykorzystująca zasady wieloatrybutowej teorii użyteczności (Bodin & Gass, 2003; Saaty, 1988). Została ona opracowana w latach 80-tych XX wieku przez T. Saaty'ego. Jej podstawą jest hierarchiczne przedstawienie struktury problemu decyzyjnego, polegające na dekompozycji zagadnienia na prostsze elementy składowe – cele, kryteria oraz warianty decyzyjne – a następnie ich porównywaniu parami. Realizacja celu głównego jest możliwa poprzez osiągnięcie celów cząstkowych. Autor AHP w (Saaty, 1987) przedstawił praktyczne zastosowanie metody na podstawie dwóch przykładów: wybór rodzaju elektrowni oraz najlepszej szkoły. W tej metodzie do rozwiązania prowadzą następujące etapy:

- konstrukcja hierarchicznej struktury problemu, zdefiniowanie preferencji decydenta,
- określenie kryteriów,
- ocena kryteriów poprzez zastosowanie 9-cio punktowej skali ocen porównań parami wg Saaty'ego (tab.2.2) (analiza macierzy ocen dla kryteriów głównych i podkryteriów, wyznaczenie wektorów priorytetów),

- ocena i uszeregowanie wariantów z wyznaczeniem priorytetów (wagi główne) oraz uwzględnieniem priorytetów wag częściowych.

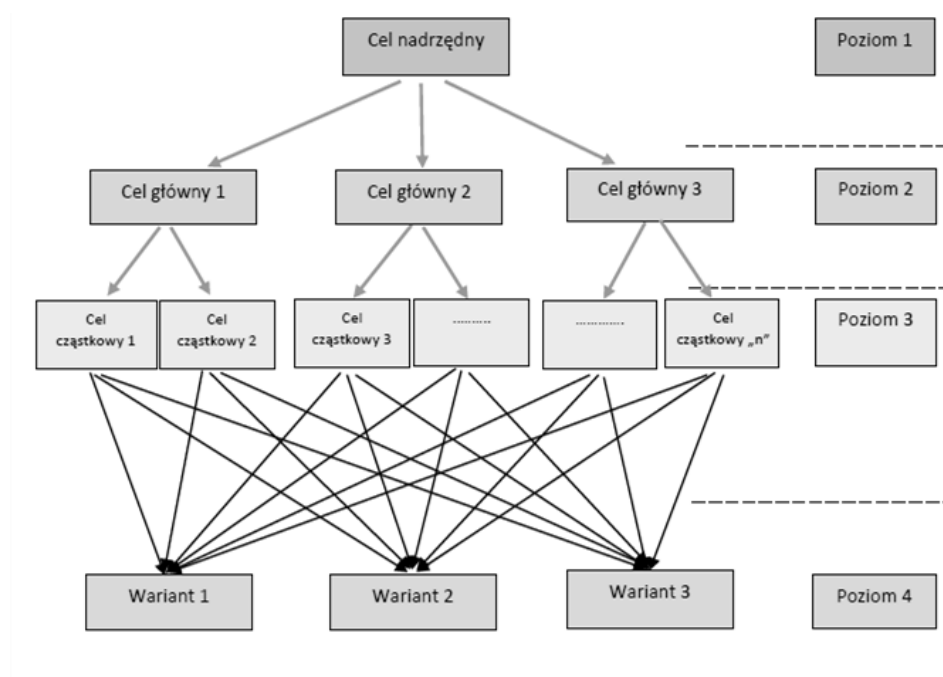
W tabeli 2.2 przedstawiono skale ocen stosowane w metodzie AHP.

Tabela 2.2 Fundamentalna skala ocen stosowana w metodzie AHP wg Saaty’ego.

Skala	Definicja	Wyjaśnienie
1	Równe znaczenie	Obydwa elementy w równym stopniu przyczyniają się do osiągnięcia celu
3	Umiarkowana przewaga jednego nad drugim	Jeden element ma nieco większe znaczenie niż drugi
5	Istotne (silne) znaczenie	Silna preferencja jednego elementu nad drugim
7	Bardzo mocna przewaga	Bardzo mocna preferencja jednego elementu nad drugim
9	Absolutna przewaga	Preferencja jednego elementu nad drugim jest na najwyższym możliwym do określenia poziomie
2,4,6,8	Wartości pośrednie	Stosowane tylko w razie konieczności

Źródło: (Saaty, 1987)

Proces oceny wariantu rozpoczyna się od opracowania listy oczekiwań, które powinna spełnić dana inwestycja. Następnie eksperci wyrażają swoje opinie na temat ważności podanych kryteriów. Ten krok jest trudny zarówno pod względem doboru odpowiednich ekspertów, jak też przetwarzania danych. Często takie dane są niespójne i wymagają dalszego przetworzenia. Do oceny buduje się model hierarchiczny struktury, przeprowadzając dekompozycję problemu w postaci celu nadrzędnego, czynników głównych i czynników częściowych oraz rozważanych wariantów (rys.2.5).



Rysunek 2.5 Struktura hierarchiczna problemu.

Źródło: (Szafranko, 2019)

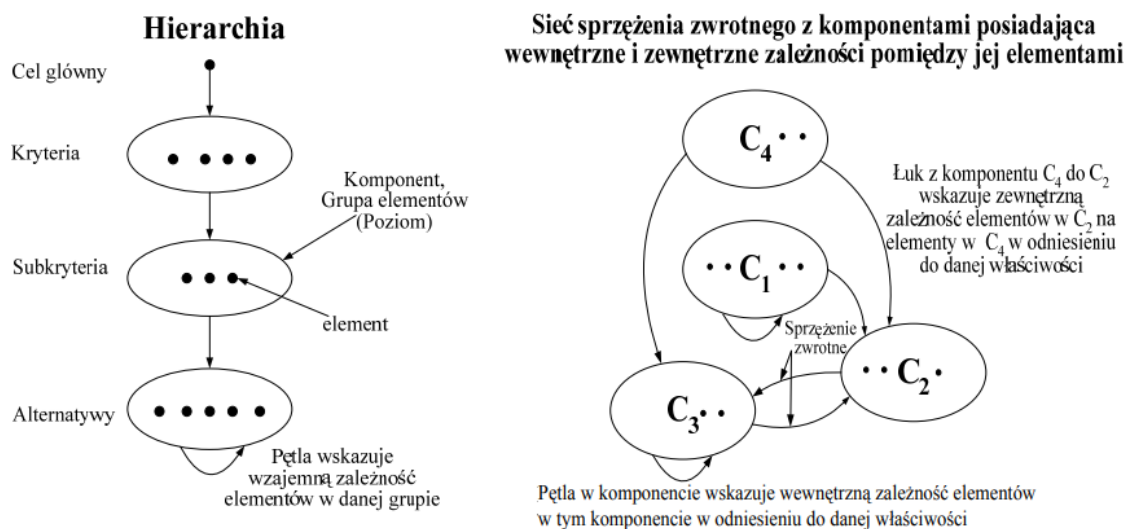
Struktura hierarchiczna powinna obejmować wszystkie elementy wskazane przez decydentów jako istotne. Przy określeniu ocenianych atrybutów należy pamiętać, że elementy niższego poziomu muszą być porównywane parami w odniesieniu do elementów poziomu wyższego. Dla macierzy o wymiarach $n \times n$ liczba porównywanych kryteriów wynosi $n(n - 1)/2$, a elementy macierzy po przekątnej są równe 1. Osoba opiniująca odpowiada na pytania: 1) w odniesieniu do kryterium – które z nich jest ważniejsze, bardziej dominujące? 2) w odniesieniu do podkryterium – które z dwóch podkryteriów ma większy wpływ na kryterium główne. W rezultacie otrzymuje się macierz porównań, którą poddaje się dalszej analizie (Finan & Hurley, 1997; Saaty, 1987; Saaty, 2001). W macierzy wartości większe od jedności świadczą o przewadze rozpatrywanego w danym wierszu kryterium z kolejnymi kryteriami umieszczonymi w układzie kolumnowym. Następnie sprawdza się spójność danych. Uśrednianie wyników nie zawsze odzwierciedla rzeczywistą sytuację (zależy to od fachowej wiedzy i doświadczenia ekspertów). Kolejnym etapem jest agregacja danych, wprowadzenie wag dla poszczególnych kryteriów. Proces ten może być realizowany z wykorzystaniem różnych metod agregacyjnych, których wybór ma istotny wpływ na końcowy wynik analizy. Najbardziej znane i najczęściej stosowane są podejścia probabilistyczne, do których zalicza się np. metody Bayesowskie, agregację liniową i ważoną, behawioralną, logarytmiczną czy też metodę Cook'a (Piegat, 2011).

W (Szafranko E., 2016a) omówiono metodę AHP w odniesieniu do wyboru inwestycji budowlanej. Podkreślono duże znaczenie właściwego przygotowania danych wejściowych, zwłaszcza w kontekście metod opartych na porównaniu parami. Znaczącą uwagę zwrócono na problem rozbieżności opinii ekspertów, który może prowadzić do niespójności macierzy porównań i błędów w wyznaczaniu wag. Zastosowanie metody AHP do wyboru przedsiębiorstwa budowlanego do współpracy partnerskiej przedstawiono w (Radziszewska-Zielina, 2014). W analizie uwzględniono 14 kryteriów, które zostały ocenione w skali od 1 do 5. Oceny te posłużyły do wyznaczenia wektora preferencji na podstawie macierzy ocen częściowych. W tym badaniu nie przeprowadzono kompleksowej, klasycznej metody AHP, lecz wykorzystano wybrane elementy jej algorytmu. Natomiast w (Dziadosz, 2008) uwzględniono złożoność procesu decyzyjnego, podkreślając indywidualny charakter przedsięwzięcia. Autorka zastosowała metodę AHP w rozszerzonej formie, wykorzystując podejście BOCR (ang. *Benefits, Opportunities, Costs, Risks*), które umożliwia klasyfikację kryteriów na cztery grupy: korzyści, możliwości, koszty oraz ryzyka. W każdej z wymienionych grup kryteriom została przypisana ranga zgodnie z metodą AHP. Taka metoda umożliwia wszechstronną analizę najważniejszych dla decydenta kryteriów, co pozwala

zminimalizować ryzyko podjęcia najmniej korzystnego wyboru wariantu inwestycji. Również dobór elementów konstrukcyjnych czy sposobu ich wykonania stanowi złożone zadanie inżynierskie, wymagające wsparcia w procesie decyzyjnym poprzez zastosowanie odpowiednich metod matematycznych. W artykule (Szafranko, 2016b) pokazano zastosowanie AHP do wyboru jednego z trzech wariantów stropu. Zdarza się, że razem z metodą AHP idzie w parze ocena lingwistyczna (opisowa). Takie połączenie przedstawiono w (Bucoń & Tomczak, 2018) na podstawie procesu planowania wydatków na remont budynków mieszkalnych. Do realizacji tego zadania autorzy zaproponowali model decyzyjny, którego celem jest utrzymanie standardu mieszkań lub ich poprawa. Pierwszym etapem była diagnoza stanu budynku z wykorzystaniem ocen lingwistycznych, co pozwoliło na jakościową ocenę elementów obiektu. Następnie wybór najkorzystniejszego zakresu remontu przeprowadzono z zastosowaniem metody AHP, umożliwiającej hierarchizację kryteriów i wariantów. Efektem końcowym podjętych działań była poprawa jakości funkcjonalnej budynków mieszkalnych.

Rozszerzeniem metody AHP jest ANP (ang. *Analytic Network Process*), którą rozpowszechnił Saaty (Saaty, 2004b, 2004a; Saaty & Vargas, 2006). Struktura tej metody nie ma liniowej formy hierarchii jak w metodzie AHP, lecz budowę sieciową, gdzie występują powiązania – sprzężenia zwrotne. Zatem metoda ANP ma zastosowanie do problemów, w których kryteria są wzajemnie powiązane i zależne od siebie, co wyklucza możliwość ich niezależnego traktowania, jak ma to miejsce w metodzie AHP (Chen, 2021). Ważne staje się ustalenie priorytetów w sieci i alternatywnych rozwiązań. Cykle mogą być procesem nieskończonym, dlatego też operacje potrzebne do wprowadzenia priorytetów stają się bardziej wymagające niż w przypadku hierarchii. Na rysunku 2.6 pokazano ogólną postać struktury hierarchicznej oraz jej porównanie do sieci decyzyjnej.

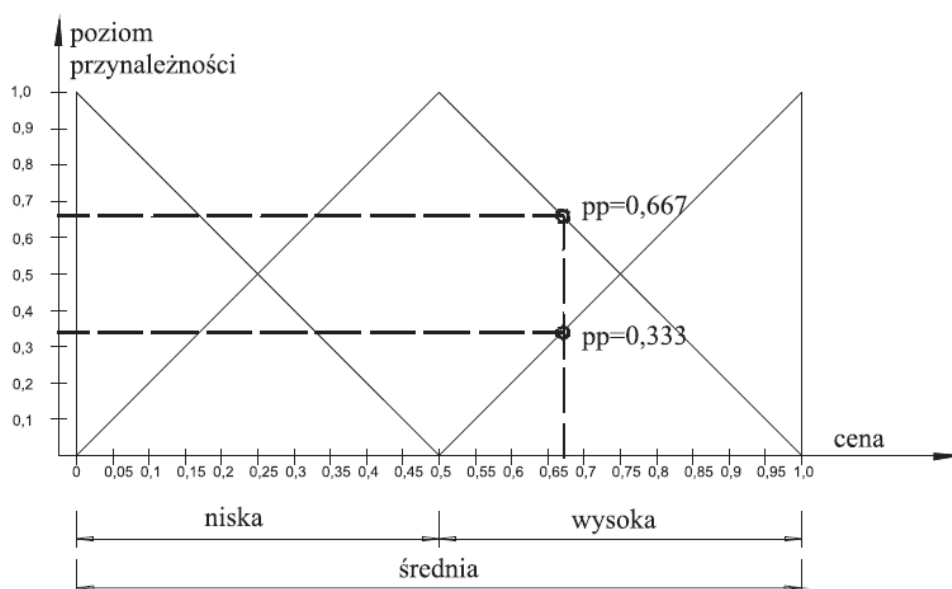
Zasadniczym zagadnieniem w metodzie ANP jest dokonanie syntezy i przedstawienie końcowego wyniku w postaci priorytetów dla wszystkich możliwych sprzężeń, cykli oraz zależności pomiędzy nimi. W ANP system składa się z podsystemów, które obejmują komponenty, a te z kolei zawierają elementy. Wpływ elementów na siebie w sieci przedstawia się w formie supermacierzy, obrazującej wzajemną ważność kryteriów. Aby możliwe było wskazanie najlepszego rozwiązania, wyniki należy połączyć w sub-systemy: korzyści, koszty, szanse i ryzyko (BOCR). W metodach AHP/ANP istotnym parametrem jest współczynnik niezgodności porównań C.R. (ang. *Consistency Ratio*), który nie powinien przekraczać 10%, co oznacza, że porównania są spójne, a wyniki akceptowalne (Florek-Paszkowska & Cymanow, 2012).



Rysunek 2.6 Porównanie ogólnej struktury hierarchicznej do sieci decyzyjnej.

Źródło: (Florek-Paszkowska & Cymanow, 2012)

W skomplikowanych sytuacjach bardzo często stosowanym rozwiązaniem jest logika rozmyta, która pozwala na tworzenie reguł wnioskowania na podstawie ocen ekspertów. W tym zagadnieniu dane kryterium może przynależeć do zakresu zbioru od 0 do 1, a nie jest przypisana mu konkretna wartość. Ma to związek z metodami lingwistycznymi, gdzie opisowe wartości kryteriów przynależą do zbiorów. Przykładową interpretację oceny lingwistycznej pokazano na rysunku 2.7. W metodzie rozmytej tworzy się bazę reguł logicznych, na podstawie których dokonuje się ocen, a następnie podsumowuje w postaci średniej ważonej.



Rysunek 2.7 Graficzne wyznaczenie poziomów przynależności wartości liczbowych do poszczególnych zbiorów rozmytych.

Źródło: (Minasowicz & Kostrzewa, 2010)

W (Saaty & Tran, 2007) stwierdzono, że rozmycie wyników może pogorszyć ostateczny rezultat. Autorzy argumentują, iż rozmycie nie przyczynia się do zwiększenia trafności ocen eksperckich, a jedynie wprowadza perturbacje w danym zakresie, pozostawiając rezultaty w niezmienionym stanie. Natomiast w innym przykładzie, dotyczącym oceny wariantów ofert przetargowych, z zastosowaniem rozszerzonej rozmytej metody AHP (ang. *fuzzy AHP*), wykazano, że charakteryzuje się ona wyższą dokładnością niż klasyczna wersja AHP. Niemniej jednak, również w tym przypadku stwierdzono, że metoda nie jest kompletna i wymaga dopracowania, w szczególności poprzez modyfikację sformułowania problemu oraz poszukiwanie rozwiązań przy użyciu dodatkowych ograniczeń (Jaśkowski i in., 2010). Wspomaganie decyzji przetargowych pokazano w (Leśniak i in., 2018). Zaproponowano autorski model oparty na rozmytym procesie analizy hierarchicznej FAHP. Oceny werbalne zostały uporządkowane dzięki trójkątnym funkcjom przynależności zbiorów rozmytych. Opracowany model okazał się uniwersalny i skuteczny i znalazł zastosowanie na polskim rynku budowlanym. Autorzy jednak wskazali na potrzebę dalszych badań w kierunku większej obiektywizacji kryteriów oraz zwiększenia elastyczności procesu decyzyjnego. Tym samym obszar ten pozostaje otwarty na poszukiwania nowych rozwiązań i doskonalenie istniejących metod. Logikę rozmytą zastosowano także przy doborze zrównoważonych materiałów budowlanych (Akadiri i in., 2013). Do zilustrowania tego podejścia wykorzystano empiryczne studium przypadku trzech proponowanych alternatywnych elementów pokrycia dachowego dla nowego projektu budowlanego. Fuzzy AHP jest wysoce złożoną metodologią i wymaga większej liczby obliczeń numerycznych w procesie oceny priorytetów niż metoda tradycyjna.

W ostatnich latach pojawiło się wiele nowych metod, które umożliwiły bardziej zaawansowane i dokładne analizy. W (Radziszewska-Zielina, 2010) zaproponowano model oceny relacji partnerskich pomiędzy przedsiębiorstwami budowlanymi a ich interesariuszami, oparty na czternastu parametrach oceny (kryteriach). Autorka opracowała dwa alternatywne podejścia do postawionego problemu, oparte na metodzie ELECTRE III (z rodziny metod europejskich). W celu wsparcia procesu decyzyjnego wykorzystano dedykowane narzędzie informatyczne, wdrożone w środowisku akademickim, które pomogło zwiększyć efektywność operacyjną. Inną autorską metodę wraz z komputerowym jej wspomaganiem przedstawiono na przykładzie wyboru rozwiązania naprawczego dla budynku. Wymagało to kompleksowego podejścia, które umożliwiło ocenę aktualnego stanu budynku oraz wymaganego zakresu napraw. Zaproponowany algorytm składał się z 5 etapów obejmujących: ocenę stanu budynku, ocenę jego wartości użytkowej, klasyfikację remontów, sformułowanie wariantów napraw i wybór rozwiązań. Przedstawiono liczbowe przykłady wyboru prac remontowych

na podstawie pięciu budynków wielorodzinnych (Bucoń & Sobotka, 2015). Metodą zupełnie odróżniającą się od pozostałych jest metoda wskaźnikowa, która pozwala uwzględnić również skutki negatywne – ujemne inwestycji, w skali globalnej i lokalnej. Dokonuje się to poprzez zastosowanie skali punktowej w zakresie np. od -5 do +5. Wartości ujemne to oddziaływania negatywne, a dodatnie pozytywne. Zastosowanie tej metody pokazano na przykładzie wyboru inwestycji drogowej (Szafranko, 2014; Szafranko, 2016b). W celu zobrazowania wyników wyboru wariantów utworzono metodę graficzną, która w czytelny sposób odzwierciedla spełnienie określonych warunków, poza tym nie wymaga wykonywania pracochłonnych obliczeń, ma charakter bardzo praktyczny. Przykłady jej zastosowania zostały przedstawione m.in. przy analizie wyboru konstrukcji szkieletowej z betonu zbrojonego czy ze stali (Szafranko, 2017a), oraz przy wyborze lokalizacji dla projektu budowlanego zakładu termicznego przekształcania odpadów (Szafranko, 2017b). Znane metody zostały porównane z autorskim podejściem metodą graficzną. Uzyskane rezultaty wykazały wysoką zgodność ocen pomiędzy poszczególnymi metodami.

Inną znaną metodą wielokryterialną, opracowaną przez Emilio Fontelę i André Gabusa w latach siedemdziesiątych XX wieku w Szwajcarii, jest DEMATEL (ang. *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory*) (Dytczak & Ginda, 2015). Jej algorytm jest podobny do AHP – w obydwu występuje macierz porównań i relacji bezpośrednich. Kluczowa różnica polega na tym, że DEMATEL koncentruje się na identyfikacji i ocenie wzajemnych zależności przyczynowo-skutkowych pomiędzy kryteriami, a nie na estymacji ich względnej ważności (Broniewicz & Ogrodnik, 2021). DEMATEL daje możliwość uwzględnienia czynników trudno mierzalnych, a także sprzężeń w oddziaływaniach między elementami, co sprawia, że jest coraz częściej stosowana. W (Dytczak i in., 2011) stwierdzono, że uzasadnione jest zastosowanie jej w budownictwie, pokazując przykłady obliczeniowe dotyczące analizy łańcuchów przyczynowo-skutkowych (np. identyfikacja przyczyn awarii konstrukcji, opóźnienia w realizacji robót) oraz stwierdzając jej przystosowanie jako narzędzia do analizy zagadnień wielokryterialnej oceny decyzji. Również wielowymiarowy proces decyzyjny, taki jak planowanie przestrzenne został przeanalizowany za pomocą metody DEMATEL (Ogrodnik, 2015). Najpierw zidentyfikowano istotne czynniki decyzyjne, następnie oceniono zależności między nimi w parach, stosując skalę punktową. Sformułowano wniosek, że metoda DEMATEL, jak również uzyskane przy jej użyciu wyniki powinny stanowić jedynie wsparcie, pewien rodzaj wspomagania przy podejmowaniu decyzji, a nie określoną regułę postępowania. Innym przykładem może być diagnoza stanu bezpieczeństwa i ochrony zdrowia (BIOZ) na budowie. Zasady BIOZ różnią się w zależności od zastosowanych technologii, a także

organizacji i metod prowadzenia prac budowlanych. W ramach projektu badawczego przeprowadzono ankietę wśród 350 respondentów, w tym 300 pracowników budowlanych oraz 50 przedstawicieli kadry kierowniczej. Kierownictwo dokonywało oceny częstotliwości występowania określonych zjawisk w skali od 1 (występuje sporadycznie) do 10 (zawsze występuje), przy jednoczesnym przypisaniu wag znaczeniowych od 1 (mało istotne) do 4 (kluczowe dla bezpieczeństwa i ochrony zdrowia). Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że spośród analizowanych czynników największe znaczenie dla poziomu bezpieczeństwa pracy ma widoczne zaangażowanie kierownictwa budowy w kwestie związane z ochroną zdrowia i życia pracowników (Obolewicz, 2017).

Metody TOPSIS (ang. *Technique for Order Preference using Similarity to Ideal Solution*), VIKOR (serb. *VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) bazują na wykorzystaniu punktów referencyjnych. W (Opricovic & Tzeng, 2004) dokonano ich analizy porównawczej. Obydwie metody umożliwiają ocenę alternatyw na podstawie ich położenia względem określonych punktów odniesienia. W I etapie ustalane są najlepsze i najgorsze oceny na podstawie podanych kryteriów. Następnie dla poszczególnych wariantów obliczana jest suma ważona znormalizowanych odległości od punktu idealnego (S) oraz maksymalna odległość ważonej znormalizowanej oceny (R). Im niższa wartość tych składników tym lepiej. W kolejnym kroku oblicza się wartość wskaźnika kompleksowego (Q). W efekcie otrzymuje się trzy listy rankingowe. Im niższe wartości tych wskaźników tym wyższą pozycję w rankingu zajmuje dany wariant. Metoda TOPSIS opiera się na dwóch punktach referencyjnych: rozwiązanie idealne (Positive Ideal Solution – PIS) i rozwiązanie antyidealne (Negative Ideal Solution – NIS). Są to punkty odniesienia dla różnych wariantów decyzyjnych. Rozwiązanie optymalne charakteryzuje się najmniejszą odległością od PIS i największą od NIS (Hwang & Yoon, 1981; Lai i in., 1994).

Uzyskanie wiarygodnych wyników oceny wymaga często zastosowania kilku komplementarnych metod ewaluacji, co pozwala na wieloaspektowe spojrzenie na analizowany problem. Porównanie rezultatów uzyskanych różnymi technikami zwiększa rzetelność procesu decyzyjnego i umożliwia wybór rozwiązania optymalnego w odniesieniu do przyjętych kryteriów. Przykładem może być ocena trzech technologii realizacji budynków mieszkalnych (dwie tradycyjne i jedna nowatorska) (Gicala & Sobotka, 2017). Analizie poddano przegrody budowlane: ściany i stropodachy, stosując trzy metody: WAP (wielowymiarowa analiza porównawcza), AHP oraz TOPSIS. Celem było wskazanie wariantu, który osiągnie najwyższe wartości w odniesieniu do przyjętych miar: wskaźników syntetycznych (metoda WAP), wektora priorytetów (metoda AHP) oraz względnej bliskości do rozwiązania optymalnego

(metoda TOPSIS). Wyniki wszystkich trzech analiz były spójne – najlepszym rozwiązaniem okazała się konstrukcja oparta na szkielecie drewnianym. W innej pracy przedstawiono problem wyboru oferty spośród kilku ogłoszonych przetargów (Leśniak & Radziejowska, 2017). Zaproponowano trzy podejścia: SAW (ang. *Simple Additive Weighting Method*), PROMETHEE II i AHP. Analiza objęła trzy warianty ofertowe oceniane według 15 kryteriów, przy zastosowaniu skali punktowej od 1 do 7. Wyniki wskazały jednoznacznie, że niezależnie od zastosowanej metody, oferta B została uznana za najkorzystniejszą. W kolejnej pracy podjęto tematykę doboru najlepszego wariantu systemu deskowań do wykonywania budynku w technologii żelbetowej (Radziejowska & Sobotka, 2020). Analizie poddano nowoczesne rozwiązania systemowe, znacznie przyspieszające tempo prac. Po przeglądzie literatury i na podstawie przeprowadzonych ankiet ustalono zestaw kryteriów, po czym przeprowadzono dwuetapową analizę weryfikacyjną (algorytmy z teorii grafów i ankiety eksperckie). Następnie dokonano kwantyfikacji wyników i przeprowadzono analizę wielokryterialną za pomocą trzech wybranych metod: metody wskaźnikowej, AHP oraz PROMETHEE II. Wszystkie zastosowane metody wskazały ten sam wariant jako najbardziej efektywny.

Jeszcze inną metodą wielokryterialną stosowaną w środowisku budowlanym jest metoda entropii. Entropia to pojęcie zaczerpnięte z termodynamiki, gdzie określa stopień nieuporządkowania układu. W kontekście podejmowania decyzji metoda ta umożliwia obiektywne oszacowanie istotności kryteriów na podstawie stopnia rozbieżności informacji zawartych w ocenach wariantów. W rezultacie otrzymuje się dwa rodzaje ocen: 1) subiektywne stopnie spełnienia kryteriów, określone przez decydenta, 2) obiektywne stopnie spełnienia kryteriów, uzyskane na podstawie procedury obliczeniowej. Jako przykład przedstawiono proces wyboru izolacji cieplnej budynku, uwzględniający zarówno kryteria kosztowe, jak i prognozowane korzyści eksploatacyjne. Analizie poddano cztery alternatywne materiały, a wyniki porównania pozwoliły na wskazanie wariantu najlepiej spełniającego założone kryteria oceny (Nowak & Skłodkowski, 2016).

W ostatnim czasie wzrosło zainteresowanie technologią BIM (ang. *Building Information Modeling*). Dąży się do jak najefektywniejszego jej zastosowania w budownictwie, stąd pojawiają się analizy dotyczące identyfikacji strategii poprawy synergii między MCDM (ang. *Multi-Criteria Decision Making*) i BIM (Jangam i in., 2025; Yarramsetty i in., 2023). W (Tan i in., 2021) omówiono pięć kluczowych obszarów zastosowań tej integracji: zrównoważony rozwój, modernizacja, wybór dostawców, bezpieczeństwo i możliwości konstrukcyjne. Autorzy podkreślają, że BIM może znacząco usprawnić proces MCDM poprzez automatyzację gromadzenia, analizy i integracji danych, co przekłada się na większą precyzję i transparentność

procesu decyzyjnego. Technologia BIM umożliwia pozyskanie szczegółowych informacji o obiekcie, takich jak geometria, koszty, harmonogram czy wpływ na środowisko, które stają się kryteriami w analizie wielokryterialnej. Dzięki temu możliwe jest szybkie generowanie i porównywanie wariantów projektowych w czasie rzeczywistym, a każda zmiana w modelu natychmiast aktualizuje dane wejściowe do analizy. Kolejną zaletą jest możliwość wizualizacji wyników MCDA w środowisku 3D. Ponadto istnieje możliwość integracji BIM z algorytmami decyzyjnymi poprzez wtyczki i narzędzia programistyczne, co pozwala na automatyzację obliczeń i zwiększenie efektywności procesu.

Problematyka podejmowania decyzji w budownictwie może dotyczyć wszystkich faz cyklu życia inwestycji – fazy przygotowawczej, realizacyjnej i eksploatacyjnej. Jednym z kluczowych obszarów jest proces przetargowy. W (Leśniak, 2016) przedstawiono przykład wspomagania decyzji przetargowej wykonawcy z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN), który umożliwiał prognozowanie wyniku przetargu na podstawie danych wejściowych, dotyczących warunków kontraktu i charakterystyki robót. Natomiast w (Leśniak, 2021) pokazano podejmowanie decyzji przetargowej za pomocą metod statystycznych, takich jak regresja logistyczna (LOG) oraz liniowa analiza dyskryminacyjna (LDA). Modele te opierały się na danych historycznych i umożliwiały identyfikację zmiennych, mających wpływ na decyzję. Wśród nich wyróżniono m.in. typ robót, stopień ich trudności, warunki kontraktowe, wartość projektu czy ewentualny udział podwykonawców. Ważną konkluzją było stwierdzenie, że modele matematyczne nie mogą w pełni zastąpić procesu myślowego decydenta, lecz zwiększyć skuteczność decyzji przetargowej.

Wybór metody podejmowania decyzji jest zagadnieniem wielokryterialnym samym w sobie. Problem wyboru metody wspomagającej podejmowanie decyzji poruszono w (Gajzler i in., 2010), gdzie podjęto temat selekcji przedsięwzięć inwestycyjnych m.in. ze względu na koszty realizacji, przyjęte rozwiązania projektowe i wykonawcze. Autorzy wskazali na konieczność dostosowania metody do charakteru danych wejściowych oraz oczekiwanej jakości wyników. Z kolei w (Dytczak, Ginda, & Kwiesielewicz, 2010) przedstawiono podejście do grupowego wspomagania decyzji z wykorzystaniem różnych metod MCDA stosowanych równolegle. Celem było zwiększenie wiarygodności wyników poprzez integrację kilku metod w ramach jednego procesu decyzyjnego, co jest szczególnie przydatne w sytuacjach o dużym znaczeniu społecznym i gospodarczym.

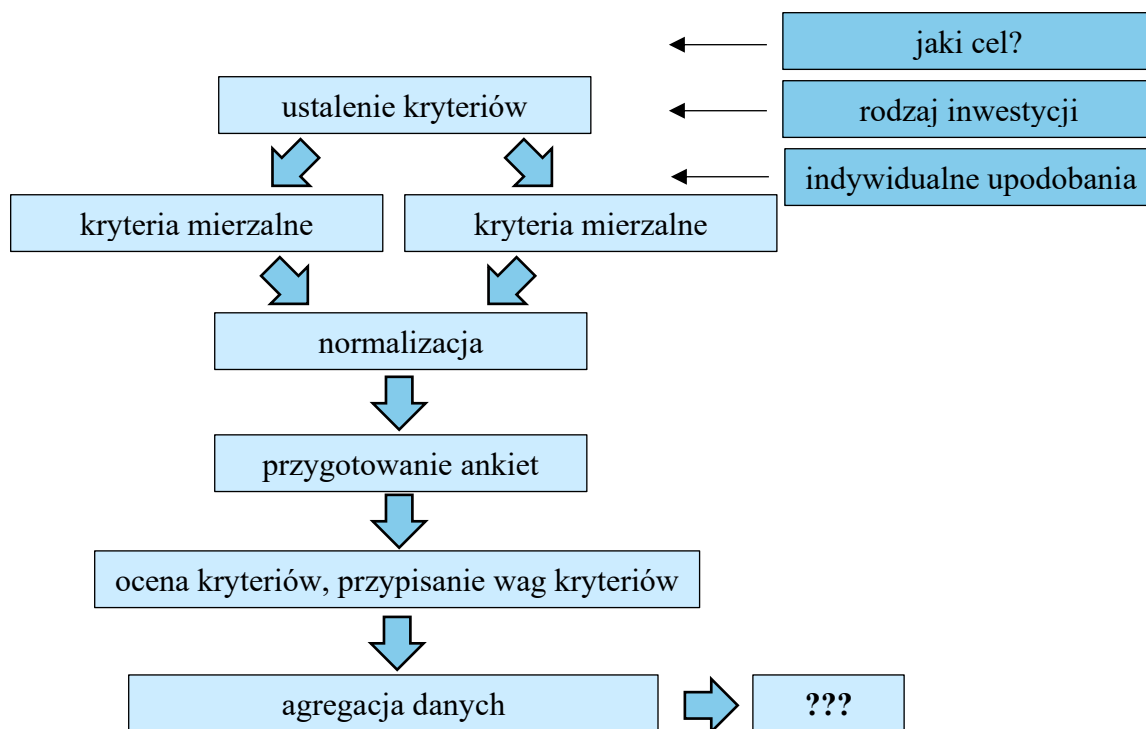
W budownictwie może znaleźć zastosowanie wiele metod wielokryterialnych. W praktyce najczęściej wybierane są jednak metody o najprostszym aparacie matematycznym.

Zaleca się stosowanie dwóch lub trzech metod jednocześnie w celu zweryfikowania uzyskanych wyników.

2.4 Ocena danych eksperckich

Dobór i ocena kryteriów wymagają konsultacji z gronem ekspertów (Ibadov N i in., 2011; Kanapeckiene i in., 2010). W praktyce występują kryteria określone jako mierzalne (cena, odległość) oraz niemierzalne (jakość, funkcjonalność). W celu zapewnienia porównywalności między nimi konieczne jest odpowiednie dobranie skali ocen, tak aby jednego kryterium nie umniejszyć względem drugiego. Aby było możliwe ich porównanie należy wszystkim kryteriom nadać wartości liczbowe niemianowane. Proces ten jest nazywany normalizacją (Żabicki & Gardziejczyk, 2014). Istnieje bardzo dużo metod normalizacji, m. in.: metody oparte na średniej i odchyleniu standardowym, wartości minimalnej/maksymalnej czy medianie (Singh & Singh, 2020). System oceny kryteriów może być binarny (zero-jedynkowy) lub bardziej rozbudowany w postaci stopniowania wartości, gdzie oceny liczbowe muszą być uzupełnione o opisy. Sposób formułowania pytań oraz przygotowania narzędzi badawczych (np. ankiet) zależy od przyjętej metody. Ważne jest zapewnienie podstawowych danych wejściowych do dalszej analizy. Procedura może mieć przebieg jedno- lub dwuetapowy. W procedurze jednoetapowej eksperci udzielają odpowiedzi na pytania z ankiet w ustalonej wcześniej skali. Natomiast w przebiegu dwuetapowym w pierwszej kolejności przeprowadzane są konsultacje z ekspertami w celu identyfikacji kryteriów uznanych za istotne, a następnie dokonywana jest ich ocena. Ważna jest również weryfikacja wiedzy i doświadczenia ekspertów, co stanowi wyzwanie metodologiczne (Beliakov & Warren, 2001; Budescu & Rantilla, 2000; Lindstädt i in., 2018). Na podstawie wyników takiej weryfikacji opiniujący są zapraszani do współpracy. Decydenci mają różne spojrzenie na świat i zachodzące w nim procesy, jak też pełnią różne funkcje w procesie inwestycyjnym, stąd należy liczyć się z subiektywnością i błędami w ocenach. Kolejnym krokiem jest przypisanie wag kryteriom, czyli nadanie im ważności. Dokonuje się tego różnymi sposobami. W wielu przypadkach jest to uśrednienie danych lub odrzucenie najbardziej skrajnych wartości, co jednak może wpłynąć na zniekształcenie wyników. Należy pamiętać, że te obliczone wartości pochodzą z niespójnych wyników. W takiej sytuacji należy ponownie rozważyć czy grupa ekspertów została dobrana odpowiednio, czy pytania zostały właściwie sformułowane. Zdarza się, że opinie są bardzo zróżnicowane, jednak ich rozkład można przybliżyć do krzywej Gaussa. Ostatnim etapem jest uporządkowanie zbioru danych. Istnieje wiele metod agregacji danych,

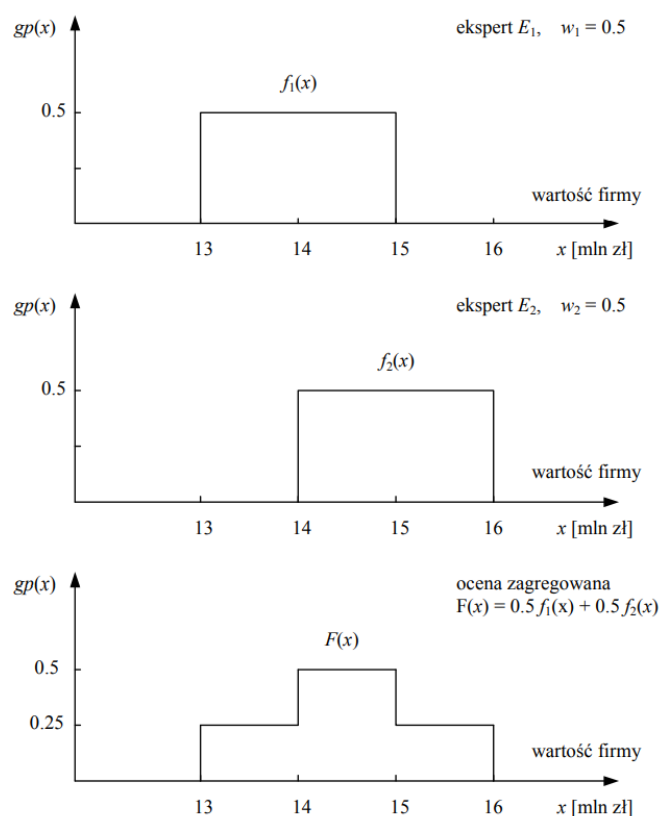
jednak każda z nich sprawia trudności, a ich procedury budzą wątpliwości. Kolejne etapy opisane powyżej zestawiono na rysunku 2.8.



Rysunek 2.8 Etapy początkowe analizy wielokryterialnej.

Źródło: opracowanie własne

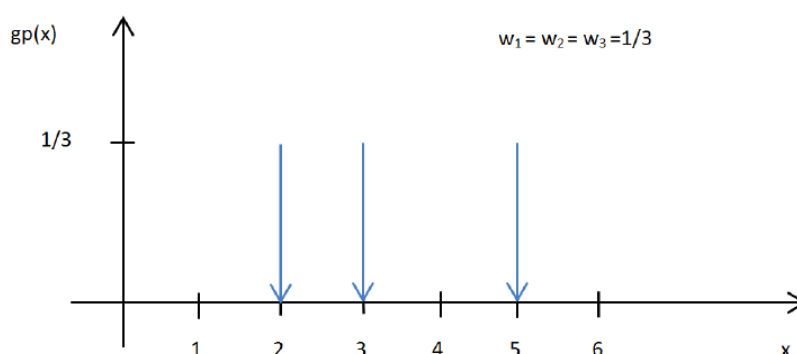
Wywiady i ankiety eksperckie generują dziesiątki czy nawet setki danych. Niezwykle trudnym zadaniem jest przygotowanie ich do dalszego przetwarzania. W tym zakresie istnieje wiele różnych podejść. Najlepiej, gdy oceny ekspertów są zbieżne. Stopień podobieństwa można ocenić na podstawie analizy spójności wyników. Jedną z podstawowych metod przetwarzania danych jest ich uśrednianie. Wówczas największy wpływ mają najczęściej powtarzane oceny. Inną metodą jest znalezienie mediany wśród dostępnych wyników. W wielu przypadkach przeprowadzana jest analiza, w której odrzucane są wartości skrajne, czyli takie które znacznie różnią się od większości – od średniej ocen. Jednak w tych przypadkach nie zawsze otrzymuje się wyniki, które dokładnie odzwierciedlają sytuację i analizowane zjawisko. Stąd też w wielu sytuacjach konieczne jest podsumowanie ocen stosując bardziej zaawansowane agregacje danych, które pozwalają na uzyskanie bardziej wiarygodnych wyników. Istnieje szereg metod i podejść, opracowanych przez lata badań, lecz nie łatwo powiedzieć, która z nich jest obiektywnie najskuteczniejsza, gdyż trudno ocenić stopień niepewności (Destercke i in., 2009; Jurczak i in., 2024). Liczną grupę metod agregacji opracowano w ramach teorii prawdopodobieństwa (Piegat, 2011). Bardzo często stosowana jest metoda liniowej agregacji ważonej. Przykład jej zastosowania pokazano na rysunku 2.9.



Rysunek 2.9 Przykład zastosowania metody agregacji liniowej dla dwóch spójnych opinii eksperckich.

Źródło: (Piegat., 2011)

Oceny ekspertów są najczęściej ocenami punktowymi, które są przykładem całkowitej niespójności opinii. Na rysunku 2.10 pokazano przykład oceny kryterium przez trzech ekspertów w skali od 1 do 6 z wagą ocen $w = 1/3$. W związku z brakiem spójności odpowiedzi nie może być tutaj zastosowana metoda agregacji liniowej, lecz bardziej zaawansowane metody.

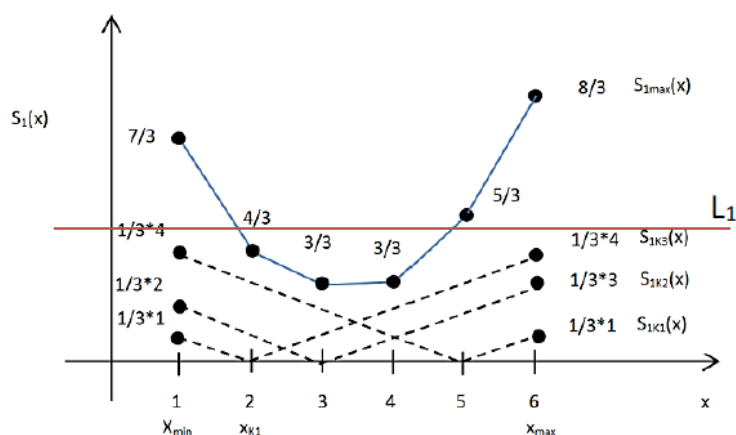


Rysunek 2.10 Wizualizacja ocen punktowych.

Źródło: (Szafranko, 2016a)

W artykule (Piegat, 2011) przedstawiono metodę opartą na funkcji dokładności reprezentowania ocen ekspertów przez możliwe hipotezy dotyczące ocenianej zmiennej. Aby

sprawdzić stopień zgodności wszystkich opinii istnieje możliwość opracowania poziomu akceptacji ich rozbieżności. Przykład takiej analizy przedstawiono na rysunku 2.11, gdzie wartości 1, 5 i 6 powinny zostać odrzucone, gdyż są powyżej tego poziomu, który oznaczono jako L_1 . Jest to bardzo przydatna informacja, która może zostać zastąpiona również postępowaniem intuicyjnym.



Rysunek 2.11 Poziom akceptacji rozbieżności analizowanych opinii.

Źródło: (Szafranko, 2016a)

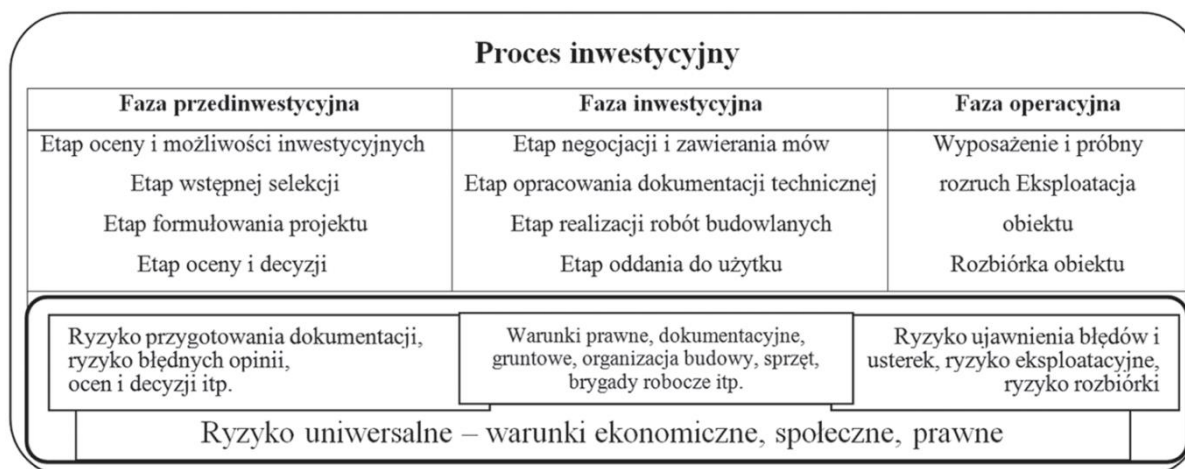
Podsumowując wcześniejsze rozważania można stwierdzić, że już sama metodyka oceny kryteriów i wariantów może budzić wątpliwości co do wyniku całego procesu decyzyjnego. Dodatkowo, sytuację mogą komplikować uwarunkowania otoczenia, które generują ryzyko dokonania wyboru nie najlepszego wariantu według zakładanych kryteriów.

W działalności budowlanej występuje duża liczba czynników zakłócających procesy decyzyjne, a całość przedsięwzięcia obarczona jest istotnym ryzykiem, wynikającym zarówno z uwarunkowań technicznych, organizacyjnych, społecznych, jak i prawnych.

3. CHARAKTERYSTYKA RYZYKA W BUDOWNICTWIE

Złożoność procesów budowlanych, wielość interesariuszy, zmienność otoczenia oraz ograniczona dostępność informacji sprawiają, że decyzje podejmowane w budownictwie są obarczone wysokim poziomem niepewności. W konsekwencji skuteczne zarządzanie ryzykiem staje się kluczowym czynnikiem wpływającym na powodzenie inwestycji. Nie polega ono na wyłącznie identyfikacji zagrożeń, ale również na wdrożeniu mechanizmów zapewniających jakość realizacji przedsięwzięcia. Jak podkreśla Harasymiuk (Harasymiuk, 2006), systemowe podejście do zapewnienia jakości w procesie kierowania realizacją inwestycji budowlanej jest nierozdzielnie związane z minimalizacją ryzyka i zwiększeniem niezawodności działań. W praktyce oznacza to, że zarządzanie ryzykiem i jakością powinno być traktowane jako komplementarne elementy strategii projektowej, wpływające na bezpieczeństwo, terminowość i efektywność kosztową.

Wiele rozwiązań o dużym potencjale rozwojowym wiąże z wysokim poziomem ryzyka, którego akceptacja może prowadzić do przewagi konkurencyjnej. W związku z powyższym, kluczowe znaczenie ma świadome podejmowanie decyzji dotyczących ryzyka, z uwzględnieniem jego wpływu na założone cele. Złożoność procesu budowlanego sprawia, że planowanie jest działaniem rozbudowanym i jednym z najważniejszych w całym cyklu projektu. Obejmuje ono m.in. określenie ogólnego zakresu planowanej inwestycji (projekt, specyfikacja techniczna), czasu (harmonogram), kosztu (kosztorys), dostępnych zasobów. Każdy z tych elementów może stanowić źródło ryzyka, które – w przypadku braku właściwej identyfikacji i zarządzania – może prowadzić do niepowodzenia inwestycji. Ryzyko występuje w każdej fazie procesu inwestycyjnego w budownictwie, co przedstawiono na rysunku 3.1.



Rysunek 3.1 Schemat ryzyk na różnych etapach procesu inwestycyjnego w branży budowlanej.

Źródło: (Szafranko, 2016)

W chwili podejmowania decyzji, na wczesnym etapie tego procesu, nie dysponuje się pewnymi danymi, ale przesłankami pochodzącymi z podobnych realizacji, które miały miejsce w przeszłości. Stąd należy prognozować przyszłe skutki teraźniejszych decyzji, identyfikować możliwe zagrożenia oraz podejmować działania zapobiegawcze, co jest przedmiotem wielu badań.

3.1 Definicja i klasyfikacje ryzyka

Pojęcie ryzyka jest ściśle związane z niepewnością oraz podejmowaniem decyzji w warunkach ograniczonej wiedzy. W tym obszarze można wyodrębnić trzy powiązane ze sobą koncepcje: niepewność, ryzyko i zagrożenie. W 1921 r. Frank H. Knight w swojej książce napisał: "Niepewność panuje, gdy prawdopodobieństwo wydarzeń w przyszłości jest nieokreślone lub niemożliwe do obliczenia, natomiast ryzyko jest obecne, gdy przyszłe zdarzenia występują z prawdopodobieństwem, które daje się zmierzyć" (Knight, 1921). Niepewność i ryzyko wynikają ze sprzeczności między planami a rzeczywistością. Ryzyko jest nieuniknionym elementem podejmowania jakiejkolwiek decyzji, a jego zrozumienie wymaga podejścia interdyscyplinarnego, integrującego spostrzeżenia z różnych dziedzin takich jak m.in. statystyka, ekonomia, filozofia, psychologia, socjologia, w celu uchwycenia jego złożoności (Baloi & Price, 2003). W momencie dokonywania wyboru nie dysponuje się pełną informacją o potencjalnych czynnikach zewnętrznych lub wewnętrznych, czyli występuje niepewność przy podejmowaniu decyzji, a z nią wiąże się ryzyko. Niepewność jest stanem w kontekście osiągalności celu o szerszym znaczeniu, zaś ryzyko ma charakter wymierny (Ward & Chapman, 2003; Xia i in., 2018). Nawet w sytuacji, gdy nie dysponuje się wystarczającą ilością informacji można oszacować prawdopodobieństwo wystąpienia danego zjawiska. Ryzyko powszechnie kojarzone jest ze skutkami negatywnymi (zagrożeniami), ale może również obejmować pozytywne zdarzenia (szanse) (Project Management Institute, 2003). Takie założenie pozwala na analizę pełnego spektrum możliwych do wystąpienia scenariuszy. Niepewność jest kluczowym czynnikiem utrudniającym skuteczność zarządzania ryzykiem projektu (*ang. risk management project*) (Nygqvist i in., 2024).

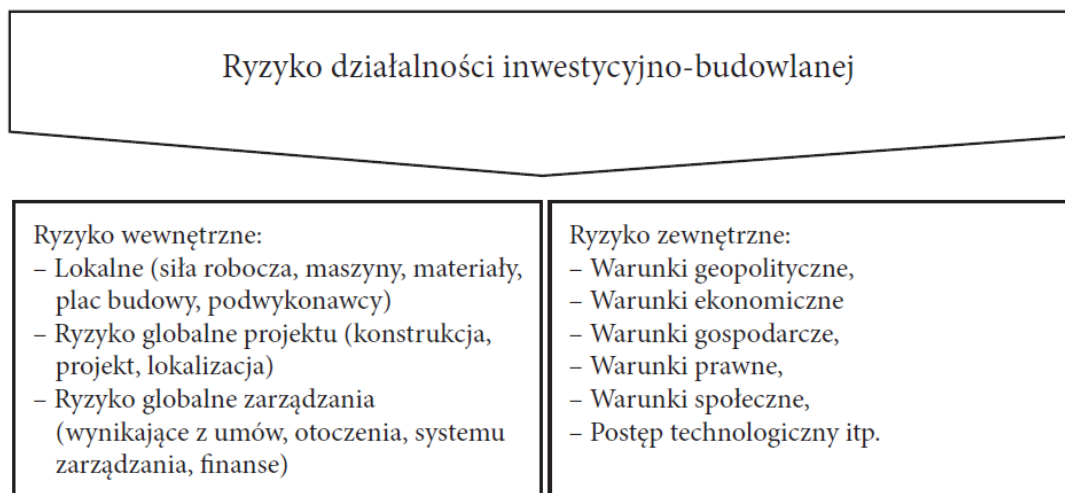
Analiza dostępnej literatury prowadzi do wielu różnych klasyfikacji ryzyka. W (Szymański, 2017) podano podział na ryzyko: finansowe, czasowe, techniczne, rynkowe, środowiskowe, zewnętrzne oraz związane z czynnikiem ludzkim i bezpieczeństwem w miejscu pracy. W tej samej pracy w odniesieniu do projektów budowlanych wyróżniono pięć kluczowych etapów, w których występuje ryzyko: projekt wstępny (konceptcja), przetarg, projekt wykonawczy, roboty budowlane i finansowanie inwestycji (rys.3.2). Z punktu widzenia

częstotliwości występowania oraz możliwości kontroli, ryzyko w budownictwie można podzielić na: systematyczne (zewnętrzne, rynkowe), niezależne od kontroli podmiotu, oraz specyficzne (wewnętrzne) związane z konkretnymi projektami (Rybka & Bondar-Nowakowska, 2010). Jak wskazują przywołani autorzy, źródłami ryzyka specyficznego mogą być np. konkurencja, dostępność surowców, płynność finansowa, natomiast ryzyka rynkowego – zmiany pogody, inflacja, bezrobocie. Przykład klasyfikacji ryzyka w działalności inwestycyjno-budowlanej przedstawiono na rysunku 3.3.

projekt wstępny (koncepcja)	•ryzyko błędnych założeń lokalizacyjnych, funkcjonalnych, technologicznych
przetarg	•ryzyko nieprawidłowego przygotowania dokumentacji przetargowej, nieuczciwej konkurencji, błędów formalnych
projekt wykonawczy	•ryzyko niedopasowania rozwiązań technicznych do warunków lokalnych, niezgodności z normami
roboty budowlane	•ryzyko opóźnień, błędów wykonawczych, kolizji branżowych, awarii sprzętu
finansowanie inwestycji	•ryzyko utraty płynności, zmiany warunków kredytowych, wzrostu kosztów

Rysunek 3.2 Ryzyko na różnych etapach procesu inwestycyjnego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Szymański, 2017)



Rysunek 3.3 Przykład klasyfikacji ryzyka w działalności inwestycyjno-budowlanej.

Źródło: (Szafranko, 2016)

Próba klasyfikacji ryzyka uświadamia złożoność tego zagadnienia, gdyż w zależności od przyjętego obszaru tematycznego i zastosowanego kryterium podziału można wymienić wiele jego rodzajów (Górecki, 2024). Mając na uwadze powyższe wnioski, w niniejszej dysertacji autor nie będzie odnosił się do jednej klasyfikacji, gdyż to wykracza poza zakres

pracy, ale obiekt rozważań będą stanowiły ryzyka zidentyfikowane przez autora w odniesieniu do konkretnych przykładów.

3.2 Proces zarządzania ryzykiem

W różnych dziedzinach życia można znaleźć wiele podejść do zarządzania ryzykiem, które zostały sformalizowane w postaci międzynarodowych standardów. Do najczęściej stosowanych należą FERMA (ang. *Federation of European Risk Management Associations*), COSO II (ang. *The Committee of Sponsoring Organizations of the Tradeway Commission*) oraz norma ISO 31000. W każdym z tych standardów zdefiniowane jest ryzyko i proces zarządzania nim w oparciu o różny stopień szczegółowości.

Warto wyróżnić model FERMA, opracowany w 2002 roku przez zespół brytyjskich specjalistów. Przedstawia on etapowy charakter procesu zarządzania ryzykiem. Ma on odniesienie do każdej dziedziny życia i może być stosowany zarówno przez podmioty publiczne jak i prywatne (Standard zarządzania ryzykiem FERMA, 2002). Schemat tego uniwersalnego standardu przedstawiono na rysunku 3.4.

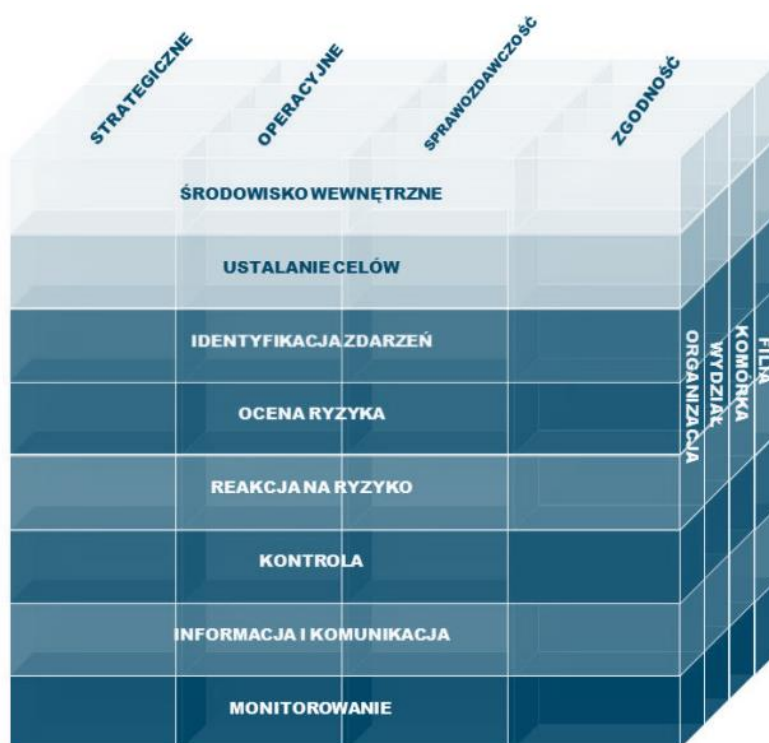


Rysunek 3.4 Schemat standardu zarządzania ryzykiem FERMA.

Źródło: (Standard zarządzania ryzykiem FERMA, 2002)

Drugi z wymienionych standardów – COSO II został opublikowany w 2004 roku przez amerykańską organizację The Committee of Sponsoring Organizations of the Tradeway Commission i jest wykorzystywany do zarządzania ryzykiem korporacyjnym. W odróżnieniu

od podejścia FERMA, w COSO II proces zarządzania nie jest etapowy, ale przebiega wielokierunkowo i jest wizualizowany w formie sześcienniej kostki (rys.3.5). W głównej płaszczyźnie (czołowej) przedstawiona jest sekwencja ośmiu etapów tworzących proces, druga odzwierciedla strukturę organizacyjną przedsiębiorstwa, a trzecia – górna powierzchnia – prezentuje cztery kategorie celów (The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission, 2004).

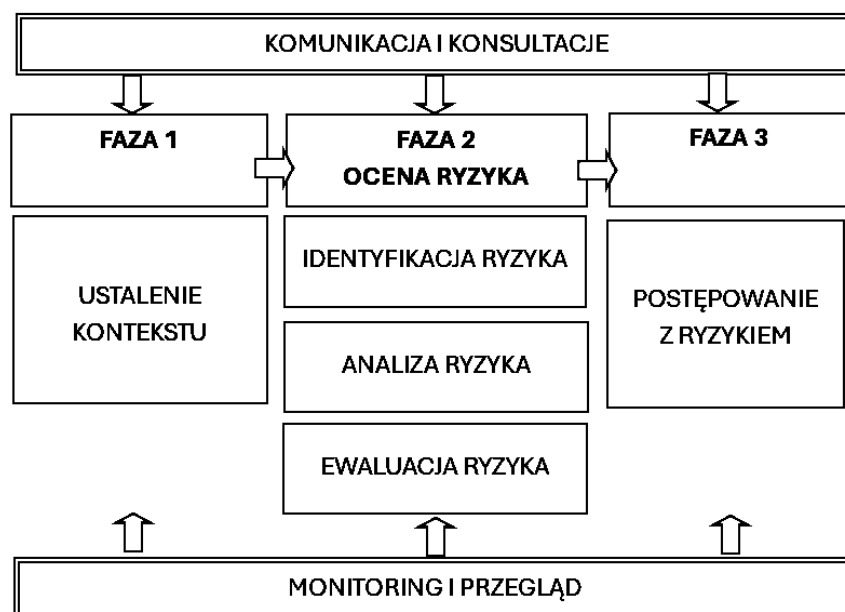


Rysunek 3.5 Schemat standardu zarządzania ryzykiem COSO II.

Źródło: (The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission, 2004)

Standard ISO 31000 został utworzony w 2009 roku przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną ISO (*International Organization for Standardization*). Jego polskim odpowiednikiem jest norma PN-ISO 31000:2018. Ten standard jest dedykowany organizacjom publicznym i prywatnym, niezależnie od profilu działalności, wielkości i może być stosowany na różnych etapach, stąd w niniejszej dysertacji w dalszej części będą omówione bardziej szczegółowo etapy zarządzania ryzykiem zgodnie z tymi zasadami. Według tej normy „zarządzanie ryzykiem to skoordynowane działania dotyczące kierowania i nadzorowania organizacją w odniesieniu do ryzyka” (PN-ISO 31000:2018 Zarządzanie ryzykiem – Zasady i wytyczne, 2018).

Zgodnie z powyższą normą procesy zarządzania ryzykiem sprowadzają się do etapów przedstawionych na rysunku 3.6.



Rysunek 3.6 Etapy zarządzania ryzykiem wg normy ISO 31000.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (PN-ISO 31000:2018 Zarządzanie ryzykiem – Zasady i wytyczne, 2018)

Inne modele zarządzania ryzykiem przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Wybrane podejścia do zarządzania ryzykiem.

Proponowane podejście	Etapy zarządzania ryzykiem
PMBOK (Project Management Institute, 2003)	1. Plan zarządzania ryzykiem. 2. Identyfikacja ryzyka. 3. Przeprowadzenie jakościowej analizy ryzyka. 4. Przeprowadzenie ilościowej analizy ryzyka. 5. Zaplanowanie reakcji na ryzyko. 6. Monitorowanie i kontrola.
PN-EN IEC 31010:2020-01 Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka (PN-EN IEC 31010:2020-01 Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka, 2020)	1. Określenie kontekstu. 2. Ocena ryzyka. 2.1 Identyfikacja ryzyka. 2.2 Analiza ryzyka. 2.3 Ewaluacja ryzyka. 3. Zarządzanie ryzykiem. 4. Monitorowanie i weryfikacja. 5. Komunikacja i konsultacje.
Dziadosz A.(Dziadosz, 2010b)	1. Identyfikacja. 2. Kwantyfikacja. 3. Reakcja na ryzyko.
Zhi (Zhi, 1995)	1. Klasyfikacja. 2. Identyfikacja. 3. Ocena ryzyka. 4. Monitorowanie ryzyka.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Dziadosz, 2010b; PN-EN IEC 31010:2020-01 Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka, 2020; Project Management Institute, 2003; Zhi, 1995)

Analiza ryzyka w budownictwie jest procesem złożonym, wymagającym podejścia interdyscyplinarnego, dokładnego wyjaśnienia zachodzących zjawisk, dlatego duży nacisk kładzie się na kompilację już istniejących narzędzi, czyli stosowanie podejścia hybrydowego. W ISO/IEC 31010 zostało przedstawionych 31 metod analizy ryzyka (PN-EN IEC 31010:2020-01 Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka, 2020). Dokument ten wskazuje również na jakim etapie procesu, które metody najtrafniej wykorzystywać. W normie porównano metody pod kątem ich użyteczności i uzyskiwanych wyników. W artykule (Dziadosz, 2010a) przedstawiono zestawienie metod dedykowanych trzem kluczowym fazom zarządzania ryzykiem: identyfikacji, kwantyfikacji oraz reakcji wraz z ich zaletami, wadami oraz przydatnością w praktyce (tab. 3.2).

Tabela 3.2 Metody analizy ryzyka.

Etap procedury zarządzania ryzykiem	Metoda	Charakterystyka
IDENTYFIKACJA	– burza mózgów	Problem związany z: – subiektywnością uzyskanych ocen, – brakiem dostępu do informacji lub ich ograniczonym zakresem, – ilościowym zapisem wyodrębnionych czynników ryzyka, – uwzględnieniem dodatkowych zagrożeń związanych z danym przedsięwzięciem (problem stałej listy zagrożeń dla każdego przedsięwzięcia).
	– gotowe listy sprawdzeń tzw. check lists	
	– ocena ekspertów, specjalistów, konsultantów	
	– audyt wewnętrzny w przedsiębiorstwie	
KWANTYFIKACJA	– analiza wrażliwości	– Polega na badaniu stopnia wrażliwości przedsięwzięcia inwestycyjnego na zmiany wartości zmiennych wejściowych (zmniejszanie lub zwiększanie wartości zmiennych w stosunku do poziomu przyjętego na wejściu). – Pozwala zidentyfikować te zmienne, które zasługują na największą uwagę, ze względu na ich znaczny wpływ na powodzenie przedsięwzięcia budowlanego, – podaje, w jakim stopniu i jakie czynniki wpływają na wynik końcowy. – Ma jedynie informacyjny charakter, ponieważ pokazuje obszary, w których popełnione błędy szacunkowe poczynią najwięcej szkód, jednak nie przekazuje informacji dotyczącej prawdopodobieństwa wystąpienia danej zmiany elementu rachunku.

c.d. Tabeli 3.2

Etap procedury zarządzania ryzykiem	Metoda	Charakterystyka
	– metody probabilistyczne – rachunek prawdopodobieństwa	– Główne narzędzia to: rozkład normalny, wskaźniki prawdopodobieństwa występowania określonych wielkości oraz ich wariancje, odchylenia standardowe i współczynniki zmienności. – Możliwość określenia skali i rozkładu odchyleń parametrów od wcześniej zaprojektowanego poziomu na skutek oddziaływania różnych czynników. – Zarówno odchylenie standardowe, jak i współczynnik zmienności wyznaczają margines bezpieczeństwa przedsięwzięcia. – W sytuacjach, kiedy zachodzi potrzeba wyznaczania prawdopodobieństw złożonych stosuje się metodę Monte Carlo (symulacja komputerowa).
	– symulacja komputerowa ryzyka	– Umożliwia badanie wpływu wielu czynników jednocześnie na wyniki przedsięwzięcia budowlanego, istotne jest natomiast ustalenie typu rozkładów dla wyszczególnionych czynników.
	– drzewa decyzyjne	– Jedna z najczęściej wykorzystywanych technik analizy danych. – Szczególnie przydatna w problemach decyzyjnych z licznymi, rozgałęziającymi się wariantami. – Cechuje je prostota i czytelność w przedstawieniu wariantów decyzji i ich konsekwencji (prawdopodobieństwo wystąpienia danego wariantu).
	– zbiory rozmyte	– Możliwość formalnego zapisu zmiennych lingwistycznych w postaci wielkości mierzalnych przy wykorzystaniu ustalonego aparatu pojęciowego teorii zbiorów rozmytych. – Możliwość opisu zjawiska określonego w naturze w sposób nieprecyzyjny. – Formułowania rozwiązań problemów w oparciu o subiektywne oceny, elastyczność.
	– sztuczne sieci neuronowe	– Duża dokładność wyników. – Skomplikowany aparat matematyczny. – Rozbudowana baza danych wejściowych.
REAKCJA	– przeniesienie ryzyka (transfer) – eliminacja ryzyka – ograniczenie ryzyka – pochłonięcie ryzyka	– Odniesienie przyjętej strategii do harmonogramów budowlanych i założonego budżetu.

Źródło: (Dziadosz, 2010a)

Oprócz metod wymienionych w tabeli 3.2 dostępnych jest wiele innych. Już w latach 50-tych XX wieku opracowano metodę PERT (ang. *Program Evaluation and Review Technique*)

(Taroun, 2014). Jest to probabilistyczna metoda planowania i kontroli projektu, która w sposób graficzny przedstawia sekwencję zadań od początku do końca, umożliwiając określenie trzech kluczowych czasów realizacji: najkrótszego, najdłuższego oraz najbardziej prawdopodobnego. Modyfikację tej metody zastosowano w (Gładysz i in., 2015), sprowadzając ją do mieszanego problemu programowania liniowego. Na przykładzie wybranego projektu budowlanego wskazano, które ryzyka można zaakceptować, a które należy wyeliminować, aby spełnić wymagania inwestora dotyczące terminu zakończenia realizacji przy minimalizacji kosztów.

Omawiając metody zarządzania ryzykiem warto wspomnieć również o nowych technologiach, jak np. BIM (ang. *Building Information Modelling*) czy VR (ang. *Virtual Reality*), które wykorzystują rozwiązania ICT (ang. *Information and Communication Technologies*). Implementacja BIM znacząco usprawnia komunikację w zespole projektowym, umożliwiając efektywną współpracę, scentralizowane zarządzanie danymi oraz natychmiastowy dostęp do aktualnych informacji (Zou i in., 2017). Budowa modelu 3D pozwala na wizualizację projektu, pokazanie szczegółów konstrukcyjnych, dzięki czemu można zminimalizować lub nawet wyeliminować błędy. Kolejną zaletą technologii BIM jest możliwość bieżącej aktualizacji projektu, w tym modyfikacji parametrów technicznych i funkcjonalnych obiektu oraz przekazywania zaktualizowanych rysunków w całym cyklu życia inwestycji. Technologia BIM staje się narzędziem wspierającym zarządzanie ryzykiem w sposób dynamiczny i zintegrowany. Zmiana projektu zarządzanego w sposób tradycyjny powoduje ryzyko nadgodzin, słabej komunikacji. Technologia BIM zostaje stopniowo wdrażana, ale istnieją opory związane głównie z wysokimi kosztami początkowymi wprowadzania tej technologii, wydłużeniem czasu, co wynika z konieczności przeszkolenia pracowników (Waqar i in., 2023). Jednak warto zauważyć, że technologia BIM jest ważnym i przyszłościowym narzędziem modelowania do zarządzania ryzykiem projektu (Khatib & Alzoubi, 2022).

Skuteczne zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwach budowlanych może znacząco wpływać na efektywność wdrożonych systemów zarządzania jakością. W (Harasymiuk & Barski, 2016) autorzy wskazali, że integracja procedur identyfikacji i oceny ryzyka z wymaganiami normy ISO 9001:2015 (ISO-9001: Systemy Zarządzania jakością. Wymagania, 2015) pozwala nie tylko na lepsze przygotowanie organizacji do reagowania na nieprzewidziane zdarzenia, ale również na zwiększenie odporności procesów realizacyjnych na zakłócenia.

Podstawowy dokument związany z ryzykiem stosowany na całym świecie to norma PN-ISO 31000:2018 Zarządzanie ryzykiem - Wytyczne (ISO 31000) (PN-ISO 31000:2018 Zarządzanie ryzykiem – Zasady i wytyczne, 2018). Zgodnie z tym dokumentem można wyróżnić 3 podstawowe fazy zarządzania ryzykiem: „ustalenie kontekstu” („establishing the context”), ocenę ryzyka oraz postępowanie z ryzykiem.

Pod pojęciem „ustalenia kontekstu” rozumie się zdefiniowanie zewnętrznych i wewnętrznych parametrów, które powinny być uwzględniane podczas zarządzania ryzykiem. Wiąże się z tym określenie celów, zakresu oraz cech przedsięwzięcia, a także ustalenie z kim należy się konsultować w ramach identyfikacji ryzyka oraz wybór najlepszej metody komunikacji.

Po analizie ogólnej przedsięwzięcia budowlanego można przejść do oceny ryzyka. W pierwszej kolejności dokonywana jest identyfikacja ryzyka, czyli określenie czynników, które mogą mieć wpływ na realizację inwestycji. W ten proces należy zaangażować cały zespół projektowy oraz ekspertów z różnych dziedzin, aby zapewnić jak najszerze spojrzenie na potencjalne zagrożenia. Według Project Management Institute bardzo ważny jest plan zarządzania ryzykiem oraz informacje historyczne, czyli jakie ryzyko występowało w przeszłości w podobnych inwestycjach (Project Management Institute, 2003). Zgodnie z normą ISO31000 można wyróżnić wiele procedur identyfikacji ryzyka, jednak nie ma potrzeby korzystania ze wszystkich – wystarczające jest zastosowanie kilku komplementarnych technik. Takie podejście umożliwia uzyskanie bardziej kompleksowego obrazu ryzyka, przy jednoczesnym zachowaniu efektywności procesu analitycznego (PN-ISO 31000:2018 Zarządzanie ryzykiem – Zasady i wytyczne, 2018). Wśród dostępnych metod można wyróżnić:

- analizę dokumentacji projektowej,
- burzę mózgów,
- wywiady z ekspertami,
- analizę przyczynowo-skutkową (Fishbone/Ishikawa),
- checklisty ryzyka,
- analizę scenariuszy i symulacje,
- analizę SWOT,
- analizę danych historycznych

i wiele innych (Hillson, 2002; Teixeira i in., 2011).

W celu łatwiejszego zarządzania ryzykiem warto je sklasyfikować, dobierając kategorie adekwatnie do specyfiki projektu, tak aby odpowiadały typowym źródłom ryzyka w obszarze danego projektu. Przykładowe obszary ryzyka podano na rysunku 3.7.

ryzyka techniczne	•dotyczące projektu, technologii, jakości materiałów, zgodności z normami
ryzyka finansowe	•związane z kosztami, budżetowaniem, płynnością finansową czy zmiennością cen materiałów
ryzyka operacyjne	•dotyczące harmonogramu, dostępności zasobów, logistyki czy zarządzania zasobami ludzkimi
ryzyka środowiskowe	•wpływ warunków pogodowych, ryzyka naturalne, wpływ na otoczenie
ryzyka prawne i kontraktowe	•związane z umowami, regulacjami prawnymi, odpowiedzialnością

Rysunek 3.7 Przykładowe obszary ryzyka.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Krawczuk & Wieczorek, 2020)

Etapy identyfikacji ryzyka są zróżnicowane w zależności od charakteru projektu, jego złożoności oraz umiejętności zespołu w zakresie zarządzania ryzykiem. Proces ten nie ma charakteru jednorazowego – jest iteracyjny, co oznacza, że powinien być powtarzany na kolejnych etapach realizacji przedsięwzięcia, w miarę pojawiania się nowych informacji i zmieniających się warunków otoczenia. Jego wynikiem jest rozpoznanie potencjalnych czynników ryzyka według źródła ich pochodzenia oraz możliwego ich wpływu na projekt. Każdy cykl identyfikacji powinien kończyć się aktualizacją rejestru ryzyka, który stanowi podstawę dalszej analizy i oceny. W praktyce oznacza to, że ryzyko jest uznawane jako dynamiczny zbiór informacji, który ewoluuje wraz z projektem.

Ryzyko istnieje w układzie wyznaczonym przez dwa stany niepewności: całkowite niepowodzenie (zerowe prawdopodobieństwo) oraz pełen sukces (stuprocentowe prawdopodobieństwo). Wszystkie zidentyfikowane ryzyka można umieścić w tym zakresie. Analiza ryzyka obejmuje ocenę prawdopodobieństwa wystąpienia każdego czynnika oraz jego potencjalnego wpływu na projekt. Najczęściej stosuje się metody ilościowe (wykorzystujące dane numeryczne, przeliczenie niepewności związanych z ryzykiem na potencjalne skutki finansowe lub czasowe) oraz jakościowe – opisowe (skupienie się na wielkości ryzyka i jego wpływie). Wybór między analizą ilościową a jakościową zależy od dostępności danych, złożoności projektu, rodzaju i skali ryzyka. Zaleca się stosowanie obu metod – analiza jakościowa może służyć jako wstępna filtracja ryzyk, które następnie poddaje się bardziej szczegółowej analizie ilościowej. Ocena jakościowa koncentruje się głównie na określeniu czynników, które wymagają reakcji w celu minimalizacji wpływu na wyniki projektu. Taka

analiza dostarcza wiedzy na temat potencjalnych problemów, które mogą wpłynąć na projekt. Pomaga w skoncentrowaniu zasobów na najważniejszych ryzykach (priorytetyzacja), umożliwia przygotowanie skuteczniejszych planów reakcji na ryzyko (lepsze planowanie), a także przyczynia się do realistycznego ustalania celów projektu w kontekście potencjalnych zagrożeń. Stosuje się ją jako wstępną czynność do bardziej szczegółowej oceny, gdy podanie informacji jest wystarczające do podjęcia decyzji lub kiedy dostępne informacje nie są wystarczające do przeprowadzenia szacunków ilościowych (Adedokun i in., 2013; Banaitiene & Banaitis, 2012). Dzięki takiej analizie ryzyko może być oceniane np. jako wysokie, umiarkowane lub niskie. Del Cano i Pillar de la Cruz w (del Caño Gochi & Cruz, 2002) wyróżnili następujące techniki analizy jakościowej:

- listy kontrolne,
- analiza założeń,
- ranking precyzji danych,
- opis prawdopodobieństwa i wpływu (ryzyka są oceniane w skali (np. niska, średnia, wysoka), co pomaga ustalić, które ryzyko wymaga większej uwagi),
- tabele oceny ryzyka opartej na prawdopodobieństwie i wpływie (wizualna ocena ryzyka i dzięki temu łatwa priorytetyzacja działań – pokazanie krzyżowania się ryzyka z prawdopodobieństwem jego wystąpienia),
- diagramy przyczynowo-skutkowe lub diagramy Ishikawy,
- schematy blokowe,
- diagramy wpływów,
- drzewa zdarzeń i błędów.

W (Nadaf i in., 2008) zastosowano jakościową analizę ryzyka w celu gromadzenia, analizy i raportowania wyników. W powyższej pracy informacje pozyskano z badań ankietowych, a następnie dokonano zestawienia w postaci macierzy, oceniając prawdopodobieństwo, wpływ, ważność oraz priorytetowość danego ryzyka, co pozwoliło na wysnucie wniosku o konieczności podjęcia kluczowych decyzji w celu minimalizacji negatywnych skutków danego projektu budowlanego.

Ilościowa analiza ryzyka opiera się na konkretnych danych liczbowych. Wykorzystuje się w niej metody matematyczne i statystyczne, dlatego też jest bardziej skomplikowana oraz wymaga odpowiednich danych. Najczęściej ryzyko opisywane jest jako iloraz prawdopodobieństwa jego wystąpienia i wpływu na powodzenie projektu (Project Management Institute, 2003) (wzór 1):

$$R = f(P, C) \quad (1)$$

gdzie:

R – ryzyko,

P – prawdopodobieństwo wystąpienia pewnego ryzyka,

C – konsekwencje zdarzenia na efekt końcowy realizowanego przedsięwzięcia.

Takie parametry są wykorzystywane m.in. w metodzie PHA (ang. *Preliminary Hazard Analysis*), w której uwzględnia się szkodliwe czynniki na danym stanowisku pracy. Inną metodą stosowaną przy ocenie ryzyka zawodowego jest Risk score, w której dodatkowo należy brać pod uwagę ekspozycję na dane zagrożenie, co opisuje się wzorem 2 (Marwa & Altaie, 2022):

$$R = S \cdot E \cdot P \quad (2)$$

gdzie:

R – ryzyko,

S – możliwy skutek wydarzenia (straty, które są spowodowane poprzez dane zdarzenie),

E – ekspozycja na niebezpieczeństwo,

P – prawdopodobieństwo nastąpienia wydarzenia.

Mając do dyspozycji różnorodne dane ilościowe dotyczące ryzyka, w celu jego pomiaru często wykorzystuje się: ankiety eksperckie, drzewa decyzyjne, metodę PERT (ang. *Program Evaluation and Review Technique*) oraz symulacje (Pritchard, 2002). Wśród symulacji popularna jest metoda Monte Carlo, pozwalająca zaobserwować, w jaki sposób zmiany w jednym elemencie projektu mogą wpłynąć na całość. Pomiar ryzyka umożliwia określenie jego ogólnego poziomu, zestawienie w postaci diagramu, wykresu, macierzy czy tabel, co sprawia, że otrzymane dane są klarowne, dzięki czemu łatwiej zarządzać ryzykiem na dalszych etapach.

Kluczowym elementem oceny ryzyka jest jego szacowanie. Polega ono najczęściej na określeniu prawdopodobieństwa wystąpienia danego zagrożenia oraz jego potencjalnych skutków w formie opisowej lub liczbowej. Analizując literaturę nasuwa się wniosek, że ryzyko budowlane jest szacowane jako iloczyn prawdopodobieństwa jego wystąpienia i skutku. Jednak w licznych publikacjach można znaleźć propozycje „ulepszenia” metody poprzez wprowadzenie nowych parametrów (Frank, 2006; Zhang, 2007). Cervone zaproponował połączenie trzech wymiarów: skutku (wpływu), prawdopodobieństwa oraz dyskryminacji. Trzeci czynnik pozwolił na ocenę wpływu ryzyka na dany projekt. Określono trzy poziomy dyskryminacji w zależności od tego czy cel projektu jest zagrożony i w jakim stopniu będą

wymagane zmiany (Frank, 2006). Dodanie innego czynnika jakim jest podatność projektu zaproponował Zhang (Zhang, 2007) pokazując, że kierownicy projektów powinni identyfikować i oceniać ryzyka pod kątem relacji jego wystąpienia a konsekwencjami oraz umiejętnie reagować na ryzyko i radzić sobie z nim.

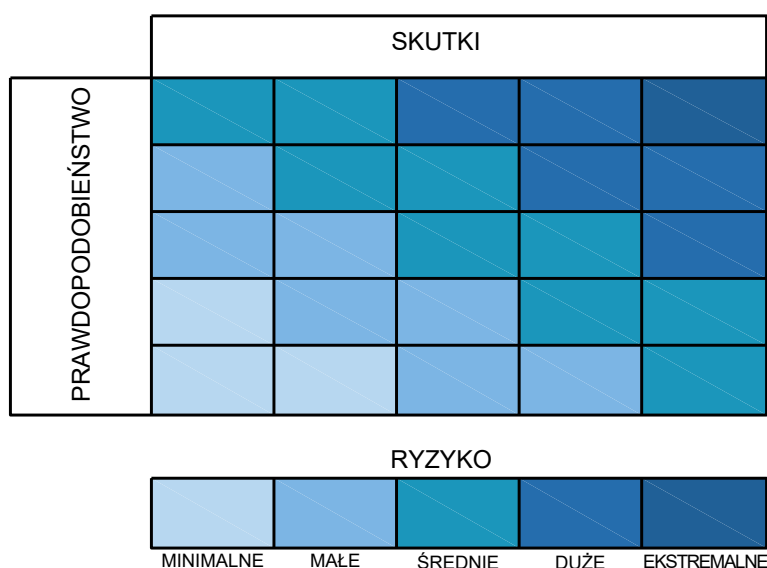
Znaną metodą szacowania ryzyka w Polsce jest metoda FMEA (ang. *Failure Mode and Effect Analysis*) (Pilarczyk & Ulewicz, 2024). W początkach XX wieku była stosowana w przemyśle zbrojeniowym, a następnie w programach kosmicznych przez NASA. Jest to metoda analizy możliwych przyczyn błędów i skutków, do jakich mogą one doprowadzić. Pomaga eliminować słabe punkty, ulepszać produkty i procesy oraz zmniejszać prawdopodobieństwo awarii, które mogłyby prowadzić do zagrożeń. Metoda ta w sposób szczegółowy została opisana w normie PN-EN IEC 60812:2018 „Analiza rodzajów i skutków uszkodzeń (FMEA i FMECA)” (PN-EN IEC 60812:2018 Techniki analizy niezawodności systemu – procedura analizy przyczyn i skutków awarii (FMEA), 2018). Ocenę ilościową ryzyka przeprowadza się w niej biorąc pod uwagę trzy kryteria: prawdopodobieństwo (P – *Probability*), skutek (S – *Severity*) oraz wykrywalność (D – *Detection*) (Wang i in., 2019). Na ich podstawie oblicza się liczbę priorytetów RPN (*Risk Priority Number*) według wzoru (3):

$$RPN = P \cdot S \cdot D \quad (3)$$

Wartości dla każdego z kryteriów mogą być ustalane indywidualnie (w określonych granicach) oraz są zależne od wiedzy i doświadczenia eksperckiego osób oceniających ryzyko. Dla przykładu w (Grulkowski & Zariczny, 2013) zastosowano 10-cio stopniową skalę oceny, w której:

- dla prawdopodobieństwa:
 - wartość 1 oznacza niskie lub wręcz zerowe prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia,
 - wartość 10 – bardzo wysokie prawdopodobieństwo jego wystąpienia,
- dla skutków (konsekwencji):
 - wartość 1 oznacza brak istotnego wpływu na projekt,
 - wartość 10 – bardzo poważne konsekwencje, mogące zagrażać realizacji przedsięwzięcia,
- dla wykrywalności:
 - wartość 1 oznacza łatwość identyfikacji danego zagrożenia,
 - wartość 10 – brak możliwości wykrycia zagrożenia przed jego wystąpieniem.

Relacje między poszczególnymi parametrami można zobrazować w macierzy ryzyka (rys. 3.8). Wskazaną macierz należy interpretować w taki sposób, że w przypadku wysokiego prawdopodobieństwa zdarzenia (ocena 10), przy dotkliwych skutkach (ocena 10) i niskiej jego wykrywalności (ocena 10) ryzyko wystąpienia zdarzenia jest ekstremalnie wysokie. W takim przypadku należy podjąć działania minimalizujące ryzyko. Natomiast, gdy prawdopodobieństwo zdarzenia jest niskie (ocena 1), skutki mało znaczące i można w łatwy sposób zidentyfikować możliwe zagrożenie (ocena 1), wówczas ryzyko jest niewielkie (tolerowane) i nie ma konieczności wprowadzania dodatkowych czynności zapobiegawczych.



Rysunek 3.8 Przykładowa macierz ryzyka.

Źródło: opracowanie własne na podstawie (PN-EN IEC 60812:2018 Techniki analizy niezawodności systemu – procedura analizy przyczyn i skutków awarii (FMEA), 2018)

Badanie ryzyka, w tym m.in. ocena tak złożonych procesów jak poziom bezpieczeństwa czy siła zagrożeń może być przeprowadzane metodami analizy wielokryterialnej. Metody te ułatwiają identyfikację, analizę i ustalanie priorytetów ryzyka, umożliwiając decydentom ocenę alternatyw projektu poprzez integrację opinii ekspertów i ocen ilościowych. Skuteczna ocena ryzyka zapewnia, że projekty budowlane są dostarczane na czas, w ramach budżetu i zgodnie z wymaganymi standardami jakości. Do oceny ryzyka w branży budowlanej stosowane są różne podejścia. Połączenie logiki rozmytej z techniką DEMATEL w oparciu o opinie ekspertów przedstawiono w (Jalhoom & Mahjoob, 2024) jako nową metodę Grey Fuzzy Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (FGDEMATEL). Celem było usprawnienie procesu ustalania priorytetowych obszarów ryzyka poprzez organizowanie ich zgodnie ze strukturą podziału ryzyka. W teorii Grey’a przyjęto frazy językowe dla zbiorów preferencji, które odpowiadają przedziałom liczbowym – użycie rozmytego systemu oceny. Innym przykładem jest metoda AHP, która pomaga uszeregować ryzyko, porównując je parami

(Assaf i in., 2023; Koulinas i in., 2023). Już w latach 90-tych XX-tego wieku przyjęto metodę AHP do oceny ryzyka związanego z budową mostu (Mustafa & Al-Bahar, 1991). Przedstawiono zalety AHP oraz jej przydatność w branży budowlanej, jako narzędzie ułatwiające decydentowi ocenę ilościową priorytetów. W (Teng, 2024) przedstawiono zasady oceny ryzyka w projektach budowy budynków wysokich. Wyróżniono sześć kolejnych etapów procesu zarządzania ryzykiem: system zarządzania bezpieczeństwem, badanie i gromadzenie danych, wybór metod analizy, analiza typowych przypadków dla tego typu inwestycji, identyfikacja wskaźników, klasyfikacja ryzyka. Zaproponowano wskaźnikowy system oceny ryzyka dla fazy budowy obiektów wysokościowych, promując w ten sposób zwiększenie bezpieczeństwa na placu budowy oraz poprawę efektywności zarządzania zasobami i harmonogramem.

Wyniki uzyskane podczas analizy ryzyka są porównywane z kryteriami ryzyka, ustalonymi podczas „analizy konspektu” (PN-ISO 31000:2018 Zarządzanie ryzykiem – Zasady i wytyczne, 2018). Na tej podstawie można przeprowadzać dalsze działania polegające na wyborze scenariusza, opracowaniu metod reagowania na możliwe zagrożenia. Ewaluacja stanowi podstawę do stwierdzenia w jakim stopniu dane ryzyko jest istotne, czy można je przyjąć, co należy z nim zrobić.

Postępowanie z ryzykiem stanowi trzecią fazę procesu zarządzania ryzykiem i polega na wyborze oraz wdrożeniu odpowiednich strategii reagowania na zidentyfikowane i ocenione zagrożenia. W najprostszym ujęciu można wyróżnić dwa poziomy postępowania z ryzykiem: pierwszy – wiąże się z akceptacją ryzyka, w którym nie wymagane są szczególne czynności, drugi – konieczne są natychmiastowe działania zmniejszające ryzyka, które przekraczają próg tolerancji. Postawą do wyboru działań są wszystkie zgromadzone wcześniej informacje. Zgodnie z normą PN-ISO 31000 wyróżnia się następujące sposoby postępowania (PN-ISO 31000:2018 Zarządzanie ryzykiem – Zasady i wytyczne, 2018):

- unikanie ryzyka poprzez decyzję o nierozpoczynaniu lub przerwaniu działań, które je generują, np. „nie inwestować, wybrać innego partnera do realizacji przedsięwzięcia, inną firmę lub kraj”, (Skorupka, 2008)
- podjęcie lub zwiększenie ryzyka w celu wykorzystania szansy, np. podpisanie umowy o „duże” roboty budowlane, mimo nieznajomości ceny końcowej,
- usunięcie źródła ryzyka, np. zmiana dostawcy materiałów budowlanych po wykryciu niezgodności z normami,

- zmiana prawdopodobieństwa, np. dodatkowe szkolenia BHP dla pracowników w celu ograniczenia ryzyka wypadków na budowie,
- zmiana następstw, np. zapewnienie rezerw finansowych na wypadek wzrostu cen,
- dzielenie ryzyka z inną stroną lub stronami (łącznie z umowami i finansowaniem ryzyka), np. ubezpieczenia lub umowy z podwykonawcami,
- utrzymanie ryzyka na podstawie świadomej decyzji, np. zachowanie dotychczasowego harmonogramu robót mimo ryzyka niewielkich opóźnień.

Natomiast Pitchard podał następujące kategorie metod reagowania na ryzyko (Pitchard, 2002):

- unikanie ryzyka,
- transfer ryzyka,
- łagodzenie ryzyka,
- akceptacja ryzyka.

Unikanie ryzyka występuje w sytuacji, gdy istnieje możliwość wyboru rozwiązania obciążonego mniejszym ryzykiem. Może to oznaczać np. zmianę zakresu projektu, harmonogramu, stosowanych technologii, dostawcy. Nie zawsze można lub nie powinno się tak postępować, gdyż czasami wybór większego ryzyka oferuje lepszy potencjał rozwoju, większą elastyczność, wyższą wydajność.

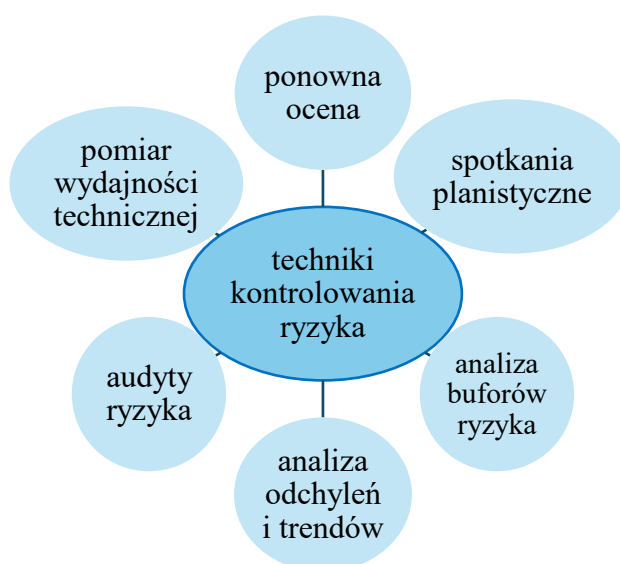
Transfer ryzyka polega na przeniesieniu skutków, odpowiedzialności na inną grupę interesu, m. in. na ubezpieczycieli, kontrahentów, wykonawców, partnerów, klientów. Nie eliminuje to ryzyka, a jedynie przenoszona jest odpowiedzialność na osobę trzecią. Tego typu rozwiązanie często wiąże się z korzyściami poprzez uniknięcie strat finansowych. Zwłaszcza popularne są ubezpieczenia, które zapewniają ochronę przed nieprzewidzianymi wydatkami, mogą zwiększyć zaufanie inwestorów i klientów do realizacji projektu oraz pomóc w szybkiej reakcji na nieoczekiwane zdarzenia, minimalizując opóźnienia i zapewniając ciągłość prac. Zatem ta forma strategii wiąże się z zapłatą składki na rzecz podmiotu przejmującego odpowiedzialność.

Strategia łagodzenia ryzyka polega na zmniejszeniu prawdopodobieństwa wystąpienia ryzyka lub jego skutków. Podejmowanie działań w początkowym stadium jest często o wiele bardziej skuteczne niż próba naprawiania szkód po ich wystąpieniu. Ta forma postępowania z ryzykiem może obejmować dodatkowe testy, lepsze przygotowanie zespołu, zmianę harmonogramu, podziału pracy czy wybór bardziej stabilnego dostawcy.

W niektórych sytuacjach najkorzystniejsza może być akceptacja ryzyka, czyli przyjęcie wszelkich konsekwencji z ewentualnego wystąpienia zdarzenia. Takie postępowanie ma

uzasadnienie zwłaszcza wówczas, gdy koszt zapobiegania jest wyższy niż potencjalne skutki ryzyka. Akceptacja może być pasywna, bez podejmowania jakichkolwiek działań, lub aktywna, czyli również pogodzenie się ze skutkami, ale wymaga specjalnego planu postępowania w sytuacji wystąpienia ryzyka. Każdy uczestnik procesu powinien mieć świadomość charakteru ryzyka, jego konsekwencji, wielkości i wiedzieć jak z nim postępować.

Po opracowaniu planu reakcji na ryzyko, kluczowe znaczenie ma jego systematyczne monitorowanie oraz aktualizacja w miarę postępu projektu. Otoczenie realizacyjne projektu jest dynamiczne – zmieniają się warunki techniczne, ekonomiczne, organizacyjne oraz otoczenie zewnętrzne, co może wpływać na pojawienie się nowych ryzyk lub modyfikację wcześniej zidentyfikowanych. Istnieje wiele technik, które można stosować do kontrolowania ryzyka. Niektóre z nich przedstawiono na rysunku 3.9.



Rysunek 3.9 Techniki kontrolowania ryzyka.
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Newton, 2015)

Monitorowanie oznacza śledzenie zmian w otoczeniu projektu (kwestie prawne, ekonomiczne, społeczne, technologiczne), ocenę skuteczności działań zapobiegawczych oraz aktualizację rejestru ryzyka. W ramach kontroli ryzyka realizowane są działania dostosowywania planów zarządzania ryzykiem, implementacji czynności korygujących, jak też komunikacji z zainteresowanymi stronami. Kluczowe dla projektu może okazać się opracowanie alternatywnych strategii, dokonanie ponownych ocen i całego procesu planowania. Obecnie występuje wiele narzędzi wspierających monitorowanie i kontrolę ryzyka. Wśród nich można wyróżnić oprogramowanie do zarządzania projektami czy też dashbordy i raporty, pozwalające na wizualizację kluczowych wskaźników oraz postępów w realizacji projektu.

3.3 Ryzyko a niezawodność w budownictwie

Ryzyko i niezawodność w budownictwie wiążą się bezpośrednio z oceną zdolności konstrukcji budowlanych do spełniania wymaganych funkcji, przy czym kluczowe znaczenie ma wyznaczenie jasno ustalonej granicy między stanem dopuszczalnym, a niedopuszczalnym, określanej jako stan graniczny. Dąży się, aby konstrukcja była niezawodna, czyli spełniała swoje funkcje w określonym czasie i warunkach eksploatacyjnych. Zgodnie z definicją zawartą w Eurokodzie PN-EN 1990: „niezawodność konstrukcji – zdolność do bezawaryjnego funkcjonowania w przewidzianym, tzw. projektowanym okresie użytkowania – jest zasadniczym kryterium jakości i głównym (normatywnym) postulatem formułowanym w odniesieniu do konstrukcji” (Eurokod 0 - PN-EN 1990 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji, 2004). Teoria niezawodności oraz analiza ryzyka stanowią podstawę nowoczesnego podejścia do projektowania i zarządzania inwestycjami budowlanymi, których celem jest zapewnienie bezpieczeństwa i dobra publicznego.

Po II wojnie światowej, w odpowiedzi na rosnące wymagania jakościowe, zaczęto rozwijać statystyczne i probabilistyczne metody oceny niezawodności, takie jak m.in.: analiza FMEA, dedukcyjna analiza drzewa usterek FTA (ang. *Fault Tree Analysis*), techniki estymacji bayesowskiej, a w nowym tysiącleciu pojawiły się narzędzia symulacyjne, jak metoda Monte Carlo. Dalszy postęp wiązał się z wprowadzeniem uczenia maszynowego ML (ang. *machine learning*), rozbudowywaniem sieci Bayesa, sztucznej inteligencji, technologii BIM, Internetu Rzeczy IoT (ang. *Internet of Things*) (Modarres & Groth, 2023).

W inżynierii niezawodność może być podejmowana z perspektywy deterministycznej lub probabilistycznej. Modele deterministyczne pozwalają na dokładne przewidywanie skutków, podczas gdy modele probabilistyczne uwzględniają losowość, niepewność zdarzeń. Ze względu na stochastyczny charakter wielu procesów zachodzących w realizacji projektów budowlanych, prognozowanie niezawodności obiektów budowlanych oraz ocena ryzyka opiera się na metodach probabilistycznych. W przypadku dostępności odpowiednich danych empirycznych, dotyczących częstotliwości występowania katastrof/awarii i ich przyczyn oraz skutków, możliwe jest zastosowanie modeli statystycznych do ich przewidywania. Drugim zaś aspektem jest modelowanie przyczynowe, które koncentruje się na analizie zmiennych warunków środowiskowych, technologicznych i organizacyjnych wpływających na prawdopodobieństwo wystąpienia awarii. W analizie niezawodności należy brać pod uwagę kilka elementów. Po pierwsze niezawodność całego systemu wiąże się z niezawodnością poszczególnych komponentów, które są podstawową jednostką fizyczną. Po drugie ważny jest

sposób powstania awarii oraz jaki ma wpływ na funkcjonowanie całego systemu, jak też powiązania pomiędzy elementami.

Realizacja inwestycji budowlanych wiąże się z ryzykiem determinowanym przez czynniki techniczne oraz zewnętrzne. Jak wskazuje Nowak (Nowak, 2007), do głównych obszarów ryzyka konstrukcyjnego należą:

- losowo zmienne obciążenia naturalne, a zwłaszcza obciążenia wyjątkowe (śnieg, wiatr, temperatura, trzęsienie ziemi),
- losowo zmienne obciążenia związane z działalnością człowieka, w tym również obciążenia wyjątkowe (pożar, wybuch gazu, kolizja z pojazdem lub jednostką pływającą, akt terrorystyczny),
- losowo zmienne własności materiałów i elementów konstrukcyjnych (wytrzymałość, wymiary),
- niedokładne modele analityczne konstrukcji (warunki brzegowe, uproszczone modele obciążeń, rozkład obciążeń, zaokrąglone wyniki),
- błędy w planowaniu, projektowaniu, wykonaniu konstrukcji w zakładzie i na placu budowy, transporcie do placu budowy, użytkowaniu i w końcu przy rozbiórce.

W praktyce zawsze będzie występowało swego rodzaju ryzyko, ale problemem jest ustalenie takiego jego poziomu, aby było ono akceptowalne.

Od 1 stycznia 2021 roku w Polsce obligatoryjne stało się projektowanie na podstawie Eurokodów, zgodnie z którymi zjawiska związane z losowością są uwzględniane przez zastosowanie częściowych współczynników bezpieczeństwa. Zaletami takiego podejścia jest prostota i wygoda użycia. Alternatywę mogą stanowić metody probabilistyczne – rozwiązania teorii niezawodności, które zostały opisane w PN-EN 1990 (Eurokod 0 - PN-EN 1990 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji, 2004). Zgodnie z drugim podejściem prawdopodobieństwo zniszczenia P_f wiąże się z przekroczeniem stanu granicznego g , przy czym (wzór 4):

$$g = R - E \quad (4)$$

gdzie:

R – nośność,

E – efekt oddziaływań.

Zgodnie z powyższym dla $g > 0$ konstrukcję uważa się za bezpieczną, natomiast gdy $g < 0$ za niespełniającą warunków nośności/użytkowości. Definiuje się również

alternatywną miarę w postaci wskaźnika niezawodności β , związanego z P_f zależnością (wzór 5):

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (5)$$

gdzie:

Φ – funkcja rozkładu prawdopodobieństwa standaryzowanego rozkładu normalnego.

Mimo stosowania tych procedur bezpieczeństwa, nie występuje konstrukcja w pełni niezawodna z uwagi na nieprzewidywalne czynniki, takie jak zmienność obciążeń, błędy wykonawcze, degradacja materiałów czy wpływ środowiska zewnętrznego. Każdemu rozwiązaniu projektowemu towarzyszy ryzyko wystąpienia awarii, przekroczenia założeń eksploatacyjnych lub niezgodności z przewidywanym modelem zachowania konstrukcji. W związku z tym konieczne staje się przejście do analizy ryzyka towarzyszącego samemu procesowi projektowania konstrukcji obiektu budowlanego.

3.4 Ryzyko przy projektowaniu konstrukcji obiektu budowlanego

Projektowanie konstrukcji obiektów budowlanych stanowi jeden z najbardziej wrażliwych etapów cyklu życia inwestycji, determinujący bezpieczeństwo, trwałość i koszty realizacji. Etap ten jest obarczony istotnym ryzykiem wynikającym głównie z niepewności dotyczącej obciążeń, właściwości materiałów, warunków gruntowo-wodnych, poprawności przyjętych modeli obliczeniowych oraz interpretacji norm i wytycznych technicznych (A. S.Nowak, 2007; Runkiewicz & Sieczkowski, 2019). Potrzeba integracji zarządzania ryzykiem na etapie projektowania została przedstawiona w literaturze, m.in. w kontekście budynków prefabrykowanych. Kluczowe ryzyka zidentyfikowano w obszarach: koordynacji dokumentacji, poprawności rozwiązań konstrukcyjnych oraz planowaniu montażu (Lv i in., 2023). W innych badaniach wskazano dodatkowo na presję czasu przy gromadzeniu danych projektowych, niejasne cele inwestora oraz niedostateczną koordynację międzybranżową jako istotne czynniki ryzyka (Tabarroki i in., 2024).

W ramach badań własnych autor, odwołując się do doświadczenia projektowego, przeprowadził analizę ryzyk towarzyszących procesowi projektowania konstrukcji. Identyfikacja ryzyk została oparta na częściowo strukturyzowanych wywiadach eksperckich z projektantami konstrukcji budowlanych, kierownikami projektów oraz inspektorami nadzoru inwestorskiego (załącznik 1). Wywiady umożliwiły uzyskanie szczegółowych informacji, które trudno byłoby zdobyć za pomocą innych metod badawczych, takich jak np. ankieta. Celem takiego pogłębionego wywiadu było uzyskanie bardziej indywidualnych odpowiedzi,

niezależnych od opinii współuczestników. Respondentów poproszono również o opisanie przyczyn zaistniałych ryzyk, jak też podanie propozycji działań naprawczych (dodatkowe informacje, przydatne do dalszych etapów analizy). Uzyskane odpowiedzi w formie danych jakościowych zestawiono w tabeli 3.3. Scenariusz tego wywiadu eksperckiego dodano w załączniku 1. Dokonano podziału ryzyk na dwie grupy: ryzyka organizacyjne (związane ogólnie z procesem organizacji projektu) oraz projektowe (bezpośrednio związane z projektowaniem). Tabela została na ten moment zakończona znakiem „...”, co oznacza, że nie jest ona zamknięta i w każdej chwili można uzupełniać ją o nowo zidentyfikowane zagrożenia.

Tabela 3.3 Zidentyfikowane ryzyka, związane z procesem projektowania konstrukcji budowlanych.

Lp. ryzyka	Opis ryzyka	Przyczyny
Ryzyka organizacyjne		
O1	Niewystarczające zaangażowanie inwestora w projekt może doprowadzić do sytuacji, że dopiero w końcowej fazie projektowania zdecyduje on o konieczności wprowadzenia zmian we wcześniejszych fazach, co pociąga za sobą dodatkową pracę projektanta.	– Słaba komunikacja między projektantem a inwestorem. – Małe zainteresowanie inwestora tematem lub brak czasu z jego strony.
O2	Chaotyczność inwestora w przedstawianiu nowych pomysłów.	– Niezdecydowanie inwestora oraz jego podatność na pomysły innych. – Brak ustalenia zasad między projektantem a inwestorem w zakresie rozliczania za dokonywanie poprawek w projekcie. – Nieświadomość inwestora w zakresie nakładu pracy ze strony projektanta.
O3	W przypadku zatrudnienia początkujących projektantów – asystentów istnieje ryzyko, że popełnią błędy: a) drobne, które nie pociągną głównego projektanta do odpowiedzialności za wadliwie wykonany projekt, b) rażące, które mogą skutkować katastrofą budowlaną.	– Niesprawdzanie pracy wykonywanej przez asystenta: a) zaufanie, że na pewno wykonuje ją prawidłowo, b) brak czasu ze strony projektanta głównego, c) nieodpowiedzialne podejście do sprawy projektanta głównego, brak świadomości, że spoczywa na nim odpowiedzialność i to on odpowiada za ewentualne uchybienia w projekcie.
O4	Odejście z pracy pracowników w końcowej fazie procesu projektowego może skutkować niedotrzymaniem terminów, a nawet niewykonaniem prac.	– Współpracownicy sami rezygnują z pracy lub projektant zwalnia ich z wyjaśnionych przyczyn. – Nieprzemyślenie ze strony projektanta, że może dojść do takiej sytuacji.

c.d. Tabeli 3.3

Lp. ryzyka	Opis ryzyka	Przyczyny
O5	Przeciążenie pracą projektanta spowodowane: a) nieoczekiwanym napłynięciem nowych projektów, lub b) koniecznością wprowadzenia korekt we wcześniejszych projektach.	– W przypadku napływu nowych zleceń, nieumiejętność asertywnego odmawiania. – „Pogoń za zleceniami” – projektant przyjmuje jak najwięcej prac, aby zarobić. – Konieczność powrotu do projektów wykonywanych wcześniej i dokonywanie w nich korekt.
O6	Jakość wykonania projektu nie spełnia oczekiwań klienta.	– Brak doświadczenia w zespole projektowym. – Niestosowanie się do zaleceń inwestora. – Brak dobrej komunikacji w zespole. – Zmienne oczekiwania inwestora, który nie do końca wie, jaki efekt końcowy chciałby osiągnąć.
O7	Klient kwestionuje wygórowaną (w jego opinii) cenę projektu i nie chce uiścić stosownej opłaty.	– Nieodpowiedzialność inwestora, niepoważne traktowanie przez niego pracy projektanta.
O8	Konieczność rozstrzygnięcia w kwestii zapłaty za zmiany w projekcie, gdyż stan obecny nie jest wystarczający do uzyskania pozwolenia na budowę.	– Nieprecyzyjność zapisów w umowie między inwestorem a projektantem. – założenie, że nie zajdzie potrzeba uzupełnień i zmian.
O9	Słaba komunikacja między branżystami lub brak skutecznej komunikacji może doprowadzić do sytuacji, że projektant pracuje na nieaktualnej wersji projektu.	– Opóźnione podejmowanie decyzji. – Projektant nie uwzględnia bieżących zmian, więc wersja projektu, na której pracuje jest nieaktualna.
...	...	...
Ryzyka projektowe		
P1	Błędne zestawienie, zebranie i niedoszacowanie obciążeń: a) korzystanie z niewłaściwej normy, b) nieuwzględnienie współczynników bezpieczeństwa, c) przyjęcie niewłaściwych ciężarów materiałów, d) nieuwzględnienie właściwej strefy obciążenia śniegiem, wiatrem, ewentualnego obciążenia sejsmicznego, dynamicznego, d) niewłaściwy podział obciążeń ze względu na czas ich trwania.	– Niski poziom wiedzy i umiejętności konstruktora. – Korzystanie z danych wprowadzonych w poprzednich projektach w celu przyspieszenia pracy oraz brak sprawdzenia poprawności i aktualności danych.
P2	Niewłaściwe przyjęcie schematu statycznego elementu do obliczeń, co daje błędne wyniki – jeśli projektant je zaakceptuje może przyjąć niewłaściwe przekroje, materiały itd., nie będą one optymalne, a w najgorszym przypadku doprowadzą do katastrofy budowlanej.	– Niski poziom wiedzy i umiejętności konstruktora. – Niezrozumienie pracy konstrukcji przez projektanta. – Błędne przyjęcie schematu przez niedopatrzenie lub pracę w pośpiechu.

c.d. Tabeli 3.3

Lp. ryzyka	Opis ryzyka	Przyczyny
P3	Niewłaściwy dobór geometrii elementu konstrukcyjnego lub rodzaju materiału, z którego ma zostać on wykonany, może doprowadzić do obniżenia nośności konstrukcji, zwiększenia jej podatności na uszkodzenia; w skrajnych przypadkach tego typu błędy projektowe mogą skutkować wystąpieniem awarii lub katastrofy budowlanej.	– Wytrzymałość elementu konstrukcyjnego na zginanie, ściskanie, rozciąganie, wyboczenie oraz jego podatność na ugięcia w znacznym stopniu zależą od jego geometrii, zatem niewłaściwe dobranie elementu może zagrozić niezawodności całej konstrukcji.
P4	Nieuwzględnienie przy projektowaniu warunków środowiska może spowodować uszkodzenia elementów lub całej konstrukcji w czasie wznoszenia lub eksploatacji obiektu; zbyt mała otulina może doprowadzić do odsłonięcia zbrojenia i dalszej degradacji elementu.	– Niedostateczny poziom wiedzy i umiejętności konstruktora. – Bezkrytyczne wykorzystanie danych z wcześniejszych projektów bez ich weryfikacji pod kątem aktualności oraz zgodności z warunkami konkretnej inwestycji. – Brak przekazania projektantowi informacji o szczególnych wymaganiach wynikających z ekspozycji konstrukcji na agresywne środowisko lub specyficzne warunki eksploatacyjne.
P5	Błędne rozpoznanie lub nieodpowiednia interpretacja warunków gruntowych oraz gruntowo-wodnych przez konstruktora, czego efektem mogą być niewłaściwie zaprojektowane fundamenty.	– Niski poziom wiedzy i umiejętności konstruktora. – Brak aktualnych badań podłoża gruntowego. – Niedostateczny zakres badań podłoża.
P6	Brak odpowiedniego opracowania detali projektowych, w szczególności połączeń konstrukcyjnych (np. brak rysunku detalu połączenia stropu z płytą balkonową, stropu ze ścianą nośną, czy nieprawidłowo zaprojektowane węzły elementów stalowych) może skutkować błędnym wykonaniem, co zwiększa ryzyko wystąpienia awarii konstrukcji.	– Brak wymaganej szczegółowości projektu.
P7	Brak uwzględnienia stabilności i ryzyka wyboczenia smukłych elementów co może skutkować ich zniekształceniem lub zniszczeniem, mimo spełnienia kryteriów wytrzymałościowych.	– Niski poziom wiedzy i umiejętności konstruktora, niewłaściwe wprowadzenie danych do programu obliczeniowego lub nieuwzględnienie właściwych warunków brzegowych i innych założeń.
P8	Nieprawidłowe uwzględnienie obciążeń lub osiadania budynku dla danego rodzaju i typu konstrukcji (nowej, rozbudowywanej, nadbudowywanej), mogące prowadzić na etapie budowy lub eksploatacji do pękania ścian.	– Niedoszacowanie obciążeń. – Nieuwzględnienie warunków gruntowych (nierównomierne osiadanie budynku).

c.d. Tabeli 3.3

Lp. ryzyka	Opis ryzyka	Przyczyny
P9	Niewłaściwe zaprojektowanie działań konserwacyjnych elementów konstrukcyjnych co może przyczynić się do degradacji budynków (korozja, pęknięcia, zużycie materiałów, nieszczelności w izolacji),	– Niski poziom wiedzy i umiejętności konstruktora. – Nieznajomość nowych technologii związanych z konserwacją.
P10	Błędy obliczeniowe wynikające z nieprawidłowego zastosowania programów komputerowych.	– Niewystarczająca znajomość programu obliczeniowego stosowanego przez projektanta. – Brak świadomości projektanta związanego z ryzykiem błędnie wprowadzonych danych do programu. – Brak weryfikacji wyników otrzymanych z programu komputerowego.
P11	Zagrożenia, awarie, katastrofy budowlane.	– Błędne interpretacje lub nieprzestrzeganie wymagań technicznych, norm, ocen technicznych, instrukcji, wytycznych dla danych warunków projektowanych obiektów.
P12	Dokumentacja rysunkowa różni się od obliczeniowej.	– Pomyłki spowodowane pracą w pośpiechu, pod presją czasu, w chaosie.
...	...	...

Źródło: opracowanie własne

W kolejnym etapie dokonano analizy ryzyk wyszczególnionych w tabeli 3.3. Przeprowadzono badanie ankietowe, w którym poproszono grupę 24 projektantów konstrukcji budowlanych z województwa warmińsko-mazurskiego o oceny każdego ryzyka pod kątem trzech parametrów: prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia (P), dotkliwości skutków (S), wykrywalności (D) (załącznik 2). Ocen dokonano w skali od 1 do 10, gdzie 1 oznaczał najniższy poziom danego parametru (bardzo małe prawdopodobieństwo, niewielka dotkliwość skutków oraz trudność w wykryciu danego ryzyka), a 10 najwyższy poziom (charakterystykę odwrotną). Ekspertiści zostali poproszeni również o wypełnienie metryczki, która pozwoliła na określenie bardziej szczegółowych informacji na ich temat. Większość osób ankietowanych posiadała ponad 5 lat doświadczenia w projektowaniu konstrukcji, w tym osoby z ponad 10-letnim stażem. Ponad 80% z nich posiadało uprawnienia budowlane w specjalności konstrukcyjno-budowlanej do projektowania bez ograniczeń. Spośród najczęściej projektowanych obiektów wskazywano budynki mieszkalne wielorodzinne, obiekty przemysłowe oraz użyteczności publicznej. Z powyższych informacji nasuwa się wniosek, że oceny ryzyk pochodzą od osób posiadających odpowiednie kompetencje i doświadczenie

zawodowe. Na podstawie przeprowadzonego badania ankietowego dla każdego ryzyka uśredniono ocenę, a następnie obliczono dwie wielkości: ryzyko w klasycznym ujęciu jako iloczyn prawdopodobieństwa i konsekwencji oraz liczbę priorytetów RPN, zgodnie z metodą FMEA. Podsumowanie otrzymanych wyników zestawiono w tabeli 3.4.

Tabela 3.4 Wyniki oceny zidentyfikowanych ryzyk – klasyczne ujęcie ryzyka oraz według metody FMEA (współczynnik RPN).

Lp. ryzyka	Prawdopodobieństwo P (1-10)	Skutki S (1-10)	Wykrywalność D (1-10)	$P \cdot S$	RPN
Ryzyka organizacyjne					
O1	5	7	4	35	140
O2	5	6	2	30	60
O3	9	9	7	81	567
O4	4	9	8	36	288
O5	4	8	2	32	64
O6	3	9	3	27	81
O7	2	7	3	14	42
O8	3	6	2	18	36
O9	9	10	5	90	450
Ryzyka projektowe					
P1	5	10	7	50	350
P2	5	10	5	50	250
P3	5	10	6	50	300
P4	6	8	4	48	192
P5	4	10	7	40	280
P6	6	6	6	36	216
P7	4	9	7	36	252
P8	5	9	6	45	270
P9	6	8	8	48	384
P10	3	9	8	27	216
P11	6	7	7	42	294
P12	3	9	7	27	189

Źródło: opracowanie własne

Wysokie wartości $P \cdot S$ oraz wskaźnika RPN świadczą o dużym poziomie ryzyka. W przypadku iloczynu $P \cdot S$ maksymalna wartość, jaka mogła być osiągnięta to 100. Dla niniejszej analizy ustalono następującą klasyfikację:

- $P \cdot S \geq 50$ – bardzo wysokie ryzyko – należy podjąć natychmiastowe działania naprawcze,

- $30 \leq P \cdot S < 50$ – wysokie ryzyko – należy podjąć działania naprawcze, jednak może nie być konieczności ich zastosowania,
- $P \cdot S < 30$ – akceptowalne ryzyko – można podjąć działania naprawcze, ale ryzyko nie ma kluczowego wpływu.

Zgodnie z powyższą klasyfikacją pogrupowano ryzyka w tabeli 3.5 oraz uszeregowano je od najbardziej do najmniej istotnych w celu większej czytelności.

Tabela 3.5 Zestawienie zidentyfikowanych ryzyk wg wartości iloczynu $P \cdot S$.

Lp. ryzyka	Prawdopodobieństwo P (1-10)	Skutki S (1-10)	$P \cdot S$
Ryzyka organizacyjne			
O9	9	10	90
O3	9	9	81
O4	4	9	36
O1	5	7	35
O5	4	8	32
O2	5	6	30
O6	3	9	27
O8	3	6	18
O7	2	7	14
Ryzyka projektowe			
P1	5	10	50
P2	5	10	50
P3	5	10	50
P4	6	8	48
P9	6	8	48
P8	5	9	45
P11	6	7	42
P5	4	10	40
P6	6	6	36
P7	4	9	36
P10	3	9	27
P12	3	9	27

	$P \cdot S \geq 50$ – bardzo wysokie ryzyko
	$30 \leq P \cdot S < 50$ – wysokie ryzyko
	$P \cdot S < 30$ – akceptowalne ryzyko

Źródło: opracowanie własne

Z danych przedstawionych w tabeli 3.4 wynika, że w klasycznym podejściu do oceny ryzyka najwyższą wartość przypisano nieskutecznej komunikacji międzybranżowej (O9) oraz błędom ze strony początkujących projektantów (O3). Spośród zagrożeń w samym procesie projektowym należy zwrócić szczególną uwagę na właściwe zestawienie obciążeń (P1), przyjęcie odpowiedniego schematu statycznego (P2), jak też uwzględnić dobór kształtu i materiału dla elementu konstrukcji (P3).

Podobną klasyfikację przeprowadzono dla wartości wskaźnika RPN:

- $RPN \geq 300$ – bardzo wysokie ryzyko
- – należy podjąć natychmiastowe działania naprawcze,
- $150 \leq RPN < 300$ – wysokie ryzyko – należy podjąć działania naprawcze, jednak może nie być konieczności ich zastosowania,
- $RPN < 150$ – akceptowalne ryzyko – można podjąć działania naprawcze, ale ryzyko nie ma kluczowego wpływu.

Zidentyfikowane ryzyka uszeregowano od najbardziej istotnego do najmniej według liczby priorytetów RPN w tabelach 3.6 (ryzyka organizacyjne) oraz 3.7 (ryzyka projektowe).

Tabela 3.6 Zestawienie zidentyfikowanych ryzyk organizacyjnych wg wartości wskaźnika RPN.

Lp. ryzyka	Prawdopodobieństwo <i>P</i> (1-10)	Skutki <i>S</i> (1-10)	Wykrywalność <i>D</i> (1-10)	RPN
Ryzyka organizacyjne				
O3	9	9	7	567
O9	9	10	5	450
O4	4	9	8	288
O1	5	7	4	140
O6	3	9	3	81
O5	4	8	2	64
O2	5	6	2	60
O7	2	7	3	42
O8	3	6	2	36

	$RPN \geq 300$ – bardzo wysokie ryzyko
	$150 \leq RPN < 300$ – wysokie ryzyko
	$RPN < 150$ – akceptowalne ryzyko

Źródło: opracowanie własne

Tabela 3.7 Zestawienie zidentyfikowanych ryzyk projektowych wg wartości wskaźnika RPN.

Lp. ryzyka	Prawdopodobieństwo <i>P</i> (1-10)	Skutki <i>S</i> (1-10)	Wykrywalność <i>D</i> (1-10)	RPN
Ryzyka projektowe				
P9	6	8	8	384
P1	5	10	7	350
P3	5	10	6	300
P11	6	7	7	294
P5	4	10	7	280
P8	5	9	6	270
P7	4	9	7	252
P2	5	10	5	250
P6	6	6	6	216
P10	3	9	8	216
P4	6	8	4	192
P12	3	9	7	189

	RPN ≥ 300 – bardzo wysokie ryzyko
	150 ≤ RPN < 300 – wysokie ryzyko
	RPN < 150 – akceptowalne ryzyko

Źródło: opracowanie własne

Zgodnie z metodą FMEA z największym ryzykiem wiążą się możliwe błędy ze strony początkujących projektantów (O3) oraz słaba komunikacja między branżystami lub jej brak (O9). Zatem są to te same rodzaje, które zostały wskazane zgodnie z klasycznym podejściem. Natomiast w grupie ryzyk bezpośrednio projektowych najistotniejsze okazało się niewłaściwe zaprojektowanie konserwacji elementów konstrukcyjnych (P9), przyjęcie obciążeń (P1) i dobranie rodzaju materiału oraz kształtu elementu (P3).

Po zapoznaniu się z istotnością każdego z czynników ryzyka można przejść do fazy nazywanej postępowanie z ryzykiem, w której ryzyko można zaakceptować, wprowadzić działania zapobiegawcze lub je odrzucić. Dla każdego zidentyfikowanego w tabeli 3.3 ryzyka zestawiono czynności zapobiegawcze, które przedstawiono w tabeli 3.8.

Tabela 3.8 Przykłady działań naprawczych dla zidentyfikowanych ryzyk.

Lp. ryzyka	Działania zapobiegawcze i naprawcze
O1	– Podpisanie umowy między projektantem i inwestorem z jasno określonym zakresem praw i obowiązków obu stron. – Ustalenie dodatkowego wynagrodzenia w przypadku konieczności wykonania prac projektowych wykraczających poza zakres umowy.
O2	– Ustalenie jasnych zasad współpracy między inwestorem a projektantem. – Uświadomienie inwestora o złożoności pracy projektanta.
O3	– Sprawdzanie pracy asystentów, wprowadzanie korekt w przypadku błędów. – Ubezpieczenie od odpowiedzialności zawodowej dla osób zaangażowanych w proces projektowy.
O4	– Zadbanie o dobrą atmosferę w zespole projektowym. – Podejmowanie się realizacji projektów, które jest się w stanie realnie wykonać.
O5	– Racjonalne planowanie zadań.
O6	– Zatrudnienie doświadczonego projektanta. – Sprawna komunikacja w zespole projektowym oraz z inwestorem.
O7	– Jasno określone obowiązki i zasady wynagrodzenia w umowie.
O8	– Precyzyjnie określone obowiązki stron umowy.
O9	– Stała komunikacja w zespole projektowym. – Utworzenie miejsca w sieci/na dysku, gdzie będzie dostępna dla każdego branżysty aktualna wersja projektu. – Korzystanie z technologii BIM, która umożliwia współpracę, wymianę informacji w czasie rzeczywistym.
P1	– Ścisłe przestrzeganie obowiązujących norm projektowych. – Analiza pod kątem możliwości wystąpienia drgań lub innych zachowań konstrukcji, zwłaszcza w elementach smukłych lub o dużej rozpiętości. – Dokładne sprawdzanie ciężaru przyjętych materiałów w katalogach producentów lub normach.
P2	– Uważne prześledzenie projektu i analiza pracy konstrukcji. – Skonsultowanie wątpliwości z bardziej doświadczonym projektantem. – Porównanie rozwiązania z podobnymi w sprawdzonych źródłach.
P3	– Zapoznanie się projektanta ze standardami projektowania poprzez analizę literatury, norm, katalogów producentów. – Dokładne modelowanie, sprawdzanie przyjętych właściwości materiału, wymiarów, kształtu. – Sprawdzanie obliczeń uzyskanych w programach komputerowych na podstawie doświadczenia i wiedzy projektanta. – Wybór wysokiej jakości nowoczesnych materiałów.
P4	– Utworzenie przez projektanta listy najważniejszych, podstawowych zasad, jakimi należy się kierować w trakcie projektowania. – Zastosowanie środków ochronnych, takich jak zwiększenie przekrojów, przyjęcie większej otuliny, projektowanie z uwzględnieniem klasy ekspozycji o wyższych wymaganiach, w sytuacji pojawienia się wątpliwości co do dokładnego rodzaju środowiska, w jakim będzie pracowała konstrukcja.

c.d. Tabeli 3.8

Lp. ryzyka	Działania zapobiegawcze i naprawcze
P5	– Uważna analiza i interpretacja warunków gruntowych przez projektanta. – Skonsultowanie z inwestorem możliwości zwiększenia kosztów w sytuacji konieczności zastosowania fundamentów innych niż tradycyjne posadowienie. – Konsultacja uzyskanych wyników z innym bardziej doświadczonym konstruktorem. – Konsultacja z geologiem, który był fizycznie na placu budowy. – Uwzględnienie przez projektanta zaleceń i uwag geologa. – Ubezpieczenia od odpowiedzialności zawodowej osób zaangażowanych w proces projektowy.
P6	– Korzystanie z zasobów branżowych, zawierających informacje dla projektantów. – Korzystanie ze sprawdzonego oprogramowania do wspomagania obliczeń w projekcie. – Konsultacje rozwiązań z innymi projektantami. – Zamieszczanie w projekcie technicznym zasad i wytycznych wykonania konstrukcji obiektu.
P7	– Stosowanie programów obliczeniowych, w których automatycznie wykonywana jest kontrola wybożenia oraz pojawiają się komunikaty o konieczności usztywnienia np. środnika w celu osiągnięcia stabilności. – Stosowanie przekrojów mniej wrażliwych na wybożenie. – Usztywnianie elementów smukłych np. poprzez wprowadzenie dodatkowych podpór, odciągów.
P8	– Dokładne zbieranie obciążeń oraz szczegółowa analiza pracy konstrukcji. – Konsultacje rozwiązań z innymi projektantami.
P9	– Bieżące kontakty z firmami zajmującymi się dystrybucją materiałów konserwacyjnych. – Konsultacje projektanta z osobami zajmującymi się na co dzień konserwacją obiektów. – Przeglądanie katalogów technicznych aktualnie stosowanych środków zabezpieczeń elementów konstrukcyjnych.
P10	– Świadome korzystanie z programów do obliczeń. – Szkolenia z obsługi programów. – Weryfikacja uzyskanych wyników w drugim programie oraz na podstawie dotychczasowych doświadczeń projektanta.
P11	– Udział w szkoleniach z aktualnych przepisów prawnych. – śledzenie bieżących zmian w prawie.
P12	– Konsultowanie projektu/sprawdzanie przez projektanta z dużym doświadczeniem. – Dopasowanie liczby przyjmowanych zleceń do możliwości wykonawczych projektanta.

Źródło: opracowanie własne

Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że skuteczne zarządzanie ryzykiem wymaga nie tylko kompetencji technicznych, ale również umiejętności podejmowania trafnych decyzji w warunkach niepewności, co zdaniem autora uzasadnia potrzebę poszukiwania rozwiązań integrujących ocenę ryzyka z metodami analizy wielokryterialnej.

4. PRZYKŁAD OCENY WARIANTÓW – BADANIE WŁASNE

W celu zilustrowania możliwości integracji oceny ryzyka z metodami analizy wielokryterialnej, w niniejszym rozdziale podjęto się oceny wariantów przebiegu odcinka drogi. Zaproponowane podejście polega na połączeniu elementów analizy wielokryterialnej z oceną ryzyka. Rozpatrzono inwestycję, dla której zostały opracowane trzy warianty realizacyjne:

- **W1** – lepszy od strony komunikacyjnej, tańszy, ale wymaga zmian w środowisku naturalnym i społecznym,
- **W2** – nie najlepszy od strony komunikacyjnej, koszty przeciętne, ale nie wymaga zmian w otoczeniu społecznym,
- **W3** – przyjazny dla środowiska naturalnego i społecznego, najdroższy i niekorzystny komunikacyjnie.

Wyboru najbardziej korzystnego wariantu dokonano na podstawie badań ankietowych. Na początku ustalono kryteria oraz podkryteria oceny, a następnie dokonano oceny w dwóch etapach, co zostanie omówione w dalszej części pracy.

4.1 Ustalenie kryteriów oceny

Zgodnie z zaproponowaną w niniejszej pracy procedurą (rozdział 2.1), w pierwszym etapie badań, we współpracy z ekspertami, zdefiniowano kryteria oceny wariantów. Opracowano zestaw czterech kryteriów głównych: transportowe i komunikacyjne, ekonomiczne, środowiskowe oraz społeczno-planistyczne, w ramach których wyszczególniono najistotniejsze podkryteria (kryteria cząstkowe) (tab.4.1). Grupa ekspertów obejmowała przedstawicieli różnych środowisk, co zapewniło wieloaspektowy charakter oceny:

- inspektorzy ochrony środowiska – 11 osób,
- urzędnicy administracji architektoniczno-budowlanej i nadzoru budowlanego – 9 osób,
- inżynierowie budowlani – wykonawcy, projektanci, inspektorzy – 16 osób,
- społeczność lokalna i inni beneficjenci – 21 osób.

Po konsultacjach ustalono również główną ocenę każdego kryterium głównego, czyli jego ważność w kontekście oceny danych wariantów inwestycji drogowej.

Tabela 4.1 Zestawienie kryteriów głównych i podkryteriów.

Oceny główne	Lp.	Kryteria oceny	Symbol kryterium
2		Kryterium transportowe i komunikacyjne	A
	1	Praca przewozowa	A1
	2	Czas przewozów	A2
	3	Długość drogi w km	A3
	4	Eksploatacja pojazdów	A4
4		Kryterium ekonomiczne	B
	5	Koszt budowy drogi	B1
	6	Koszt wykupu terenu	B2
	7	Koszty odszkodowań	B3
5		Kryterium środowiskowe	C
	8	Naruszenie obszarów chronionych	C1
	9	Długość przebiegu tras przez obszary leśne	C2
	10	Ilość drzew do wycięcia	C3
	11	Przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	C4
	12	Przecięcie cieków wodnych	C5
4		Kryterium społeczno-planistyczne	D
	13	Liczba budynków do wyburzenia	D1
	14	Liczba budynków w odległości 0-50m	D2
	15	Liczba budynków w odległości 50-100m	D3
	16	Powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	D4
	17	Kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	D5

Źródło: opracowanie własne

4.2 Przygotowanie danych do dalszej analizy

Właściwe przygotowanie danych do dalszej analizy determinuje wiarygodność i poprawność uzyskiwanych wyników. W przypadku badań ankietowych przygotowywanie to powinno uwzględniać: weryfikację konstrukcji kwestionariusza ankiety pod kątem zdefiniowanych pytań (czy zapewnią jednoznaczność interpretacyjną odpowiedzi?), dobór próby badawczej (czy zagwarantuje reprezentatywność i adekwatność pozyskiwanych opinii w odniesieniu do analizowanego problemu?), kodowanie odpowiedzi poprzez przypisanie wartości liczbowych odpowiedziom jakościowym w celu umożliwienia ich dalszego przetwarzania analitycznego, weryfikację kompletności i spójności danych, obejmującą identyfikację braków i/lub błędów logicznych oraz odpowiedzi odstających, normalizację i standaryzację danych, umożliwiającą ich porównywalność w ramach analiz wielokryterialnych.

Na początku 57 osób oceniło w skali 1-5 ważność każdego podkryterium w odniesieniu do budowy drogi, gdzie 1 – oznaczało, że dane kryterium jest mało istotne, a 5 – bardzo ważne. Następnie te same osoby dokonały oceny każdego z trzech wariantów przydzielając punkty od 0 do 5 do każdego podkryterium, gdzie 0 – wskazywało na brak oddziaływania czynnika na dany wariant, a 5 – jego istotne znaczenie (załącznik 3). Z odpowiedzi otrzymanych na podstawie pytań metryczkowych wynikało, że aż 37 osób posiadało wykształcenie wyższe techniczne, a 25 osób zdobyło uprawnienia budowlane, co wskazywało na wysoki poziom kompetencji respondentów. Dokładne wyniki z części B tych badań zostały zawarte w załączniku 4 – ocena kryteriów, a z części C – w załączniku 5 (ocena wariantów).

W pierwszej kolejności dokonano podsumowania i zestawienia wyników otrzymanych z części B kwestionariusza ankiety z załącznika 4 (tab.4.2).

Tabela 4.2 Zestawienie ocen ekspertów.

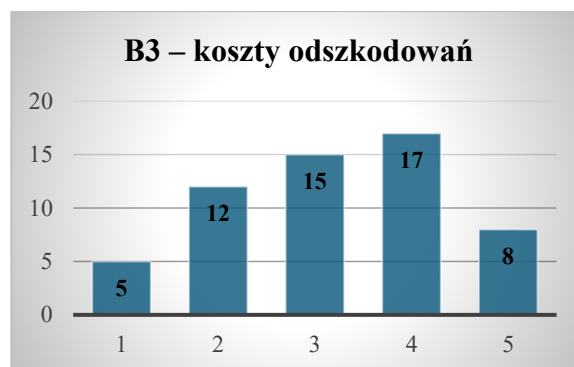
Lp.	Kryteria oceny	(1p) mało ważne	(2p) ważne	(3p) istotne	(4p) bardzo istotne	(5p) kluczowe	Suma odpowiedzi
1	A1 – praca przewozowa	9	22	16	8	2	57
2	A2 – czas przewozów	2	13	22	16	4	57
3	A3 – długość drogi w km	0	16	17	21	3	57
4	A4 – eksploatacja pojazdów	5	13	27	11	1	57
5	B1 – koszt budowy drogi	7	20	17	9	4	57
6	B2 – koszt wykupu terenu	4	13	17	17	6	57
7	B3 – koszty odszkodowań	5	12	15	17	8	57
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych	3	16	25	9	4	57
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	7	19	21	7	3	57
10	C3 – ilość drzew do wycięcia	1	12	20	18	6	57
11	C4 – przecięcie szlaków wędrowek zwierząt	9	28	14	3	3	57
12	C5 – przecięcie cieków wodnych	20	26	6	4	1	57
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia	2	9	18	15	13	57
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	4	19	17	15	2	57
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	14	21	11	9	2	57
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	10	14	12	12	9	57
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	1	19	21	13	3	57

Źródło: opracowanie własne

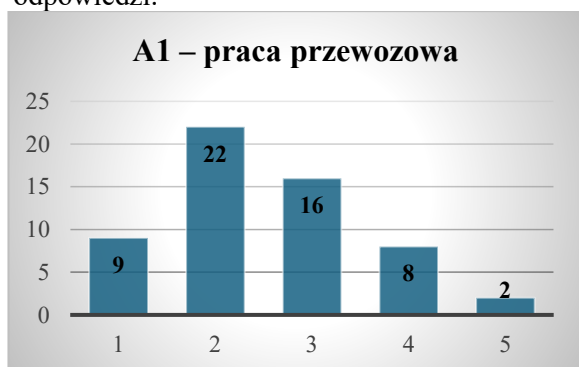
Odpowiedzi uzyskane z ankiet wykazywały różny charakter. Były kryteria, w których wyraźnie dominowała jedna odpowiedź (rys.4.1a), z tendencją wzrostową (rys.4.1b) lub spadkową (rys.4.1c) czy też układające się według krzywej Gaussa (4.1d).



a) Rozkład z wyraźną dominacją jednej odpowiedzi.



b) Rozkład z wyraźną tendencją rosnącą.



c) Rozkład z wyraźną tendencją malejącą.



d) Rozkład o charakterze klasycznej krzywej Gaussa.

Rysunek 4.1 Przykładowe rozkłady odpowiedzi w analizowanych ankietach.

Źródło: opracowanie własne

Wyniki ankiet poddano dalszej ocenie w celu uporządkowania ważności czynników na podstawie średniej arytmetycznej. W tabeli 4.3 przedstawiono również znormalizowane wartości ocen, tworzące tzn. wektor preferencji, który odzwierciedla względne wagi poszczególnych podkryteriów. Według ekspertów najważniejszymi kryteriami była konieczność wyburzania budynków w związku z budową odcinka drogi oraz wycinka drzew. Najmniej istotne w opinii ekspertów okazało się przecięcie cieków wodnych, szlaków wędrowek zwierząt i zabudowa w odległości 50-100m od planowanej inwestycji. Dokonując podziału na grupy ankietowanych zauważono, że urzędnicy organów administracji architektoniczno-budowlanej i nadzoru budowlanego oraz społeczność przypisywali większe znaczenie analizowanym kryteriom niż pozostali uczestnicy badania. Po odrzuceniu 10% skrajnych odpowiedzi ważność kryteriów układała się w rankingu podobnie jak we wstępnej analizie (tab.4.4).

Tabela 4.3 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Średnia punktów	Ocena po normalizacji
1	D1 – liczba budynków do wyburzenia	3,491	0,072
2	C3 – ilość drzew do wycięcia	3,281	0,068
3	A3 – długość drogi w km	3,193	0,066
4	B3 – koszty odszkodowań	3,193	0,066
5	B2 – koszt wykupu terenu	3,140	0,065
6	A2 – czas przewozów	3,123	0,064
7	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	2,965	0,061
8	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	2,930	0,060
9	C1 – naruszenie obszarów chronionych	2,912	0,060
10	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	2,860	0,059
11	A4 - eksploatacja pojazdów	2,825	0,058
12	B1 – koszt budowy drogi	2,702	0,056
13	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	2,649	0,055
14	A1 – praca przewozowa	2,509	0,052
15	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	2,351	0,049
16	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	2,368	0,049
17	C5 – przecięcie cieków wodnych	1,947	0,040

*Źródło: opracowanie własne***Tabela 4.4** Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów po odrzuceniu 10% wartości skrajnych odpowiedzi.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Średnia punktów	Ocena po normalizacji
1	D1 – liczba budynków do wyburzenia	3,528	0,073
2	C3 – ilość drzew do wycięcia	3,283	0,068
3	B3 – koszty odszkodowań	3,208	0,067
4	A3 – długość drogi w km	3,170	0,066
5	B2 – koszt wykupu terenu	3,151	0,065
6	A2 – czas przewozów	3,132	0,065
7	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	2,943	0,061
8	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	2,925	0,061
9	C1 – naruszenie obszarów chronionych	2,906	0,060
10	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	2,849	0,059
11	A4 - eksploatacja pojazdów	2,830	0,059
12	B1 – koszt budowy drogi	2,679	0,056
13	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	2,623	0,054
14	A1 – praca przewozowa	2,472	0,051
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	2,321	0,048
16	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	2,302	0,048
17	C5 – przecięcie cieków wodnych	1,887	0,039

Źródło: opracowanie własne

Innym sposobem weryfikacji wyników badań ankietowych jest obliczenie mediany i dominanty, co zestawiono w tabeli 4.5. Na podstawie mediany można zauważyć, że najwyższą wartość osiągnęło podkryterium D1 – liczba budynków do wyburzenia i ten sam czynnik był najważniejszy w rankingu ze względu na średnią arytmetyczną. Analizując wartości dominanty zaobserwowano, że podkryteriom A3 oraz B3 najczęściej przypisywano bardzo wysokie oceny (równe 4), a mimo to poprzednie zestawienia nie wskazywały na ważność tych czynników. Zaobserwowano, że grupa inspektorów ochrony środowiska oraz urzędników administracji architektoniczno-budowlanej i nadzoru budowlanego niżej oceniła czynnik związany z długością drogi w kilometrach niż pozostali respondenci, natomiast koszty odszkodowań okazały się mniej istotne dla grupy inspektorów oraz społeczności.

Tabela 4.5 Mediana i dominanta dla analizowanych podkryteriów.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Mediana	Dominanta
1	A1 – praca przewozowa	2	2
2	A2 – czas przewozów	3	3
3	A3 – długość drogi w km	3	4
4	A4 - eksploatacja pojazdów	3	3
5	B1 – koszt budowy drogi	3	2
6	B2 – koszt wykupu terenu	3	3
7	B3 – koszty odszkodowań	3	4
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych	3	3
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	3	3
10	C3 – ilość drzew do wycięcia	3	3
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	2	2
12	C5 – przecięcie cieków wodnych	2	2
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia	3,5	3
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	3	2
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	2	2
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	3	2
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	3	3

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzona analiza pozwoliła na wyodrębnienie podkryteriów o największym znaczeniu w procesie oceny wariantów inwestycji. W opinii ekspertów kluczowe okazały się czynniki związane z oddziaływaniem społecznym i środowiskowym, zaś za najmniej istotne uznano aspekty hydrologiczne. Zróżnicowanie ocen wskazuje na konieczność stosowania metod umożliwiających integrację danych o różnym charakterze oraz uwzględnianie priorytetów decydentów w dalszych etapach analizy.

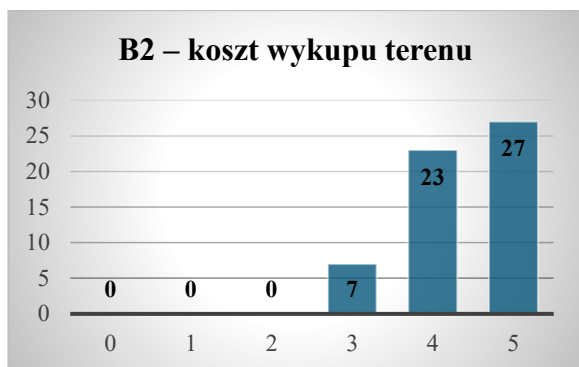
W drugim kroku dokonano analizy ocen trzech wariantów planowanej inwestycji w aspekcie spełnienia wcześniej analizowanych kryteriów. Wyniki oceny dla wariantu W1 zestawiono w tabeli 4.6.

Tabela 4.6 Zestawienie ocen ekspertów – wariant 1.

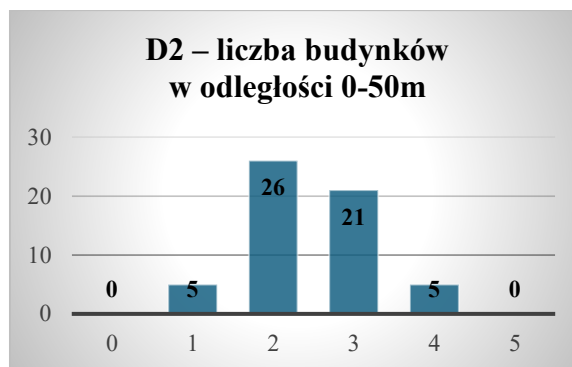
Lp.	Kryteria oceny	(0p) nie istotne	(1p) mało ważne	(2p) ważne	(3p) istotne	(4p) bardzo istotne	(5p) kluczowe	Suma odpowiedzi
1	A1 – praca przewozowa	0	1	3	17	31	5	57
2	A2 – czas przewozów	0	0	1	7	32	17	57
3	A3 – długość drogi w km	0	0	1	12	25	19	57
4	A4 - eksploatacja pojazdów	0	0	1	12	27	17	57
5	B1 – koszt budowy drogi	0	0	1	14	32	10	57
6	B2 – koszt wykupu terenu	0	0	0	7	23	27	57
7	B3 – koszty odszkodowań	0	0	2	9	21	25	57
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych	1	5	7	22	20	2	57
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	0	3	13	25	15	1	57
10	C3 – ilość drzew do wycięcia	0	10	30	15	2	0	57
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	0	0	13	22	19	3	57
12	C5 – przecięcie cieków wodnych	0	0	8	28	19	2	57
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia	4	11	23	15	4	0	57
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	0	5	26	21	5	0	57
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	0	2	11	25	18	1	57
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	1	12	18	15	9	2	57
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	0	0	19	28	10	0	57

Źródło: opracowanie własne

Wyniki badań potwierdzają, że wariant 1 jest korzystny pod względem ekonomicznym i komunikacyjnym. Na rysunku 4.2a widać wyraźną przewagę wysokich ocen dla kryterium B2, podczas gdy na rysunku 4.2b (kryterium D2) widać przewagę ocen niskich i średnich, układających się w krzywą Gaussa.



a) Rozkład z wyraźną tendencją rosnącą.



b) Rozkład o charakterze klasycznej krzywej Gaussa.

Rysunek 4.2 Przykładowe rozkłady odpowiedzi w analizowanych ankietach dla wariantu W1.

Źródło: opracowanie własne

Aby sprawdzić w jakim stopniu wariant 1 spełnia dane podkryteria obliczono średnią arytmetyczną oraz wektory preferencji (tab.4.7).

Tabela 4.7 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów dla wariantu W1.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Średnia punktów	Ocena po normalizacji
1	B2 – koszt wykupu terenu	4,351	0,078
2	B3 – koszty odszkodowań	4,211	0,075
3	A2 – czas przewozów	4,140	0,074
4	A3 – długość drogi w km	4,088	0,073
5	A4 - eksploatacja pojazdów	4,053	0,072
6	B1 – koszt budowy drogi	3,895	0,070
7	A1 – praca przewozowa	3,632	0,065
8	C5 – przecięcie cieków wodnych	3,263	0,058
9	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	3,211	0,057
10	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	3,088	0,055
11	C1 – naruszenie obszarów chronionych	3,070	0,055
12	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	2,965	0,053
13	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	2,842	0,051
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	2,456	0,044
15	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	2,439	0,044
16	C3 – ilość drzew do wycięcia	2,158	0,039
17	D1 – liczba budynków do wyburzenia	2,070	0,037

Źródło: opracowanie własne

Wyniki w tabeli 4.7 wskazują, że przy wariacie 1 kryteria ekonomiczne oraz komunikacyjne są spełnione w wyższym stopniu niż pozostałe. Bardzo ciekawe jest to, że nawet po odrzuceniu 10% skrajnych odpowiedzi kolejność spełnienia każdego kryterium jest dokładnie taka sama (tab.4.8), jak wówczas gdy uwzględnimy wszystkie odpowiedzi (tab.4.7). Również wartości mediany i dominanty wskazywały na tendencję przewyższania kryteriów komunikacyjnych i związanych z kosztami nad pozostałymi, co pokazano w tabeli 4.9.

Tabela 4.8 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów po odrzuceniu 10% wartości skrajnych odpowiedzi dla wariantu 1.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Średnia punktów	Ocena po normalizacji
1	B2 – koszt wykupu terenu	4,377	0,078
2	B3 – koszty odszkodowań	4,264	0,076
3	A2 – czas przewozów	4,170	0,074
4	A3 – długość drogi w km	4,113	0,073
5	A4 - eksploatacja pojazdów	4,075	0,073
6	B1 – koszt budowy drogi	3,906	0,070
7	A1 – praca przewozowa	3,660	0,065
8	C5 – przecięcie cieków wodnych	3,245	0,058
9	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	3,189	0,057
10	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	3,113	0,055
11	C1 – naruszenie obszarów chronionych	3,094	0,055
12	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	2,981	0,053
13	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	2,830	0,050
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	2,453	0,044
15	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	2,415	0,043
16	C3 – ilość drzew do wycięcia	2,132	0,038
17	D1 – liczba budynków do wyburzenia	2,075	0,037

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.9 Mediana i dominanta dla analizowanych podkryteriów dla wariantu 1.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Mediana	Dominanta
1	A1 – praca przewozowa	4	5
2	A2 – czas przewozów	4	5
3	A3 – długość drogi w km	4	4
4	A4 - eksploatacja pojazdów	4	4
5	B1 – koszt budowy drogi	4	4
6	B2 – koszt wykupu terenu	4	4
7	B3 – koszty odszkodowań	4	4
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych	3	3
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	3	3
10	C3 – ilość drzew do wycięcia	3	3
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	3	3
12	C5 – przecięcie cieków wodnych	3	3
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia	3	3
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	2	2
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	2	2
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	2	2
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	2	2

Źródło: opracowanie własne

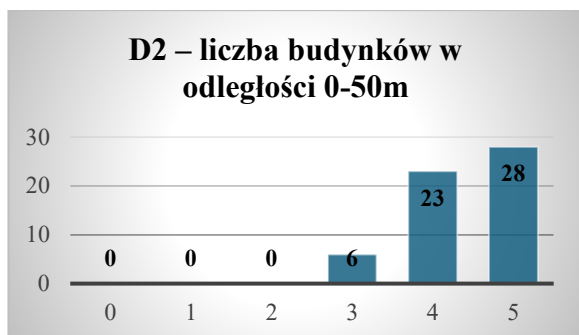
Wyniki oceny wariantu W2 zestawiono w tabeli 4.10.

Tabela 4.10 Zestawienie ocen ekspertów – wariant 2.

Lp.	Kryteria oceny	(0p) nie istotne	(1p) mało ważne	(2p) ważne	(3p) istotne	(4p) bardzo istotne	(5p) kluczowe	Suma odpowiedzi
1	A1 – praca przewozowa	1	11	23	19	3	0	57
2	A2 – czas przewozów	0	21	23	12	1	0	57
3	A3 – długość drogi w km	3	20	21	11	2	0	57
4	A4 - eksploatacja pojazdów	0	10	28	15	3	0	56
5	B1 – koszt budowy drogi	0	4	11	31	8	3	57
6	B2 – koszt wykupu terenu	0	5	27	22	3	0	57
7	B3 – koszty odszkodowań	0	2	26	26	3	0	57
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych	0	0	8	27	17	5	57
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	0	1	13	29	13	1	57
10	C3 – ilość drzew do wycięcia	0	1	18	28	10	0	57
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	0	0	14	28	15	0	57
12	C5 – przecięcie cieków wodnych	0	0	5	34	18	0	57
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia	0	0	1	16	31	9	57
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	0	0	0	6	23	28	57
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	0	0	0	11	20	26	57
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	0	0	2	17	29	9	57
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	0	0	0	4	24	29	57

Źródło: opracowanie własne

Rozpatrywany wariant nie wymagał większych zmian w otoczeniu społecznym, ale nie był korzystny ze względów transportowych i komunikacyjnych przy przeciętnych kosztach, co miało odzwierciedlenie w wynikach. Na rysunku 4.3a pokazano przykład wykresu z przewagą wysokich ocen, a przeciętne oceny w kryterium B2 przedstawiono na rysunku 4.3b.



a) Rozkład z wyraźną tendencją rosnącą.

b) Rozkład o charakterze klasycznej krzywej Gaussa.

Rysunek 4.3 Przykładowe rozkłady odpowiedzi w analizowanych ankietach dla wariantu W2.

Źródło: opracowanie własne

Aby sprawdzić w jakim stopniu wariant 2 spełnił dane podkryteria obliczono średnią arytmetyczną oraz wektory preferencji (tab.4.11).

Tabela 4.11 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów dla wariantu W2.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Średnia punktów	Ocena po normalizacji
1	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	4,439	0,085
2	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	4,386	0,084
3	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	4,263	0,082
4	D1 – liczba budynków do wyburzenia	3,842	0,074
5	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	3,789	0,073
6	C1 – naruszenie obszarów chronionych	3,333	0,064
7	C5 – przecięcie cieków wodnych	3,228	0,062
8	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	3,018	0,058
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	3,000	0,058
10	B1 – koszt budowy drogi	2,912	0,056
11	C3 – ilość drzew do wycięcia	2,825	0,054
12	B3 – koszty odszkodowań	2,526	0,049
13	B2 – koszt wykupu terenu	2,404	0,046
14	A1 – praca przewozowa	2,211	0,042
15	A4 - eksploatacja pojazdów	2,196	0,042
16	A2 – czas przewozów	1,877	0,036
17	A3 – długość drogi w km	1,807	0,035

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie wyników z tabeli 4.11 można stwierdzić, że przy wariacie 2 kryteria społeczne oraz środowiskowe były spełnione w wyższym stopniu niż pozostałe. Bardzo ciekawe jest to, że nawet po odrzuceniu 10% skrajnych odpowiedzi kolejność spełnienia każdego kryterium była dokładnie taka sama (tab.4.12), jak wówczas gdy uwzględniono wszystkie odpowiedzi (tab.4.11).

Tabela 4.12 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów po odrzuceniu 10% wartości skrajnych odpowiedzi dla wariantu 2.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Średnia punktów	Ocena po normalizacji
1	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	4,472	0,086
2	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	4,415	0,085
3	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	4,283	0,082
4	D1 – liczba budynków do wyburzenia	3,849	0,074
5	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	3,811	0,073
6	C1 – naruszenie obszarów chronionych	3,321	0,064
7	C5 – przecięcie cieków wodnych	3,245	0,062
8	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	3,019	0,058
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	3,000	0,058
10	B1 – koszt budowy drogi	2,906	0,056
11	C3 – ilość drzew do wycięcia	2,830	0,054
12	B3 – koszty odszkodowań	2,528	0,049
13	B2 – koszt wykupu terenu	2,396	0,046
14	A1 – praca przewozowa	2,208	0,042
15	A4 - eksploatacja pojazdów	2,173	0,042
16	A2 – czas przewozów	1,849	0,035
17	A3 – długość drogi w km	1,792	0,034

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.13 Mediana i dominanta dla analizowanych podkryteriów dla wariantu 2.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Mediana	Dominanta
1	A1 – praca przewozowa	2	2
2	A2 – czas przewozów	2	2
3	A3 – długość drogi w km	2	2
4	A4 - eksploatacja pojazdów	2	2
5	B1 – koszt budowy drogi	3	3
6	B2 – koszt wykupu terenu	2	2
7	B3 – koszty odszkodowań	3	2
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych	3	3
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	3	3
10	C3 – ilość drzew do wycięcia	3	3
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	3	3
12	C5 – przecięcie cieków wodnych	3	3
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia	4	4
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	4	5
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	4	5
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	4	4
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	5	5

Źródło: opracowanie własne

Również wartości mediany i dominanty wskazywały na tendencję przewyższania kryteriów społecznych i środowiskowych nad pozostałymi, co pokazano w tabeli 4.13.

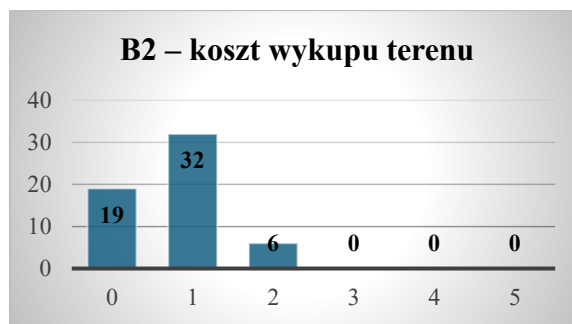
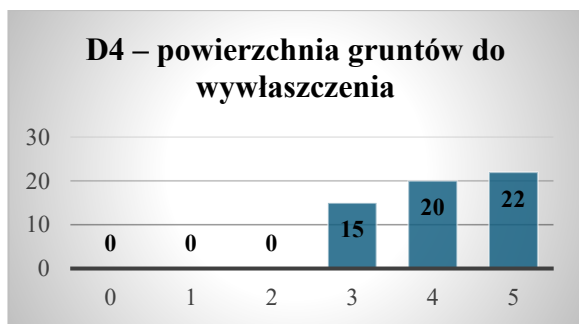
Wyniki oceny wariantu W3 zestawiono w tabeli 4.14.

Tabela 4.14 Zestawienie ocen ekspertów – wariant 3.

Lp.	Kryteria oceny	(0p) nie istotne	(1p) mało ważne	(2p) ważne	(3p) istotne	(4p) bardzo istotne	(5p) kluczowe	Suma odpowiedzi
1	A1 – praca przewozowa	9	33	14	1	0	0	57
2	A2 – czas przewozów	7	32	18	0	0	0	57
3	A3 – długość drogi w km	7	29	18	3	0	0	57
4	A4 - eksploatacja pojazdów	12	28	17	0	0	0	57
5	B1 – koszt budowy drogi	9	36	12	0	0	0	57
6	B2 – koszt wykupu terenu	19	32	6	0	0	0	57
7	B3 – koszty odszkodowań	6	38	13	0	0	0	57
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych	0	3	6	9	32	7	57
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	0	0	3	9	25	20	57
10	C3 – ilość drzew do wycięcia	0	0	3	3	37	14	57
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	0	0	0	3	42	12	57
12	C5 – przecięcie cieków wodnych	0	0	0	11	31	15	57
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia	0	0	5	10	22	20	57
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	0	0	5	0	36	16	57
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	0	0	0	6	45	6	57
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	0	0	0	15	20	22	57
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	0	0	0	9	26	22	57

Źródło: opracowanie własne

Wariant 3 cechował się wysoką zgodnością z kryteriami środowiskowymi i społecznymi, co przedstawiono na rysunku 4.4a. Jednak był najmniej korzystny pod względem kosztów oraz dostępności komunikacyjnej spośród zaproponowanych wariantów, co ilustruje rysunek 4.4b.



a) Rozkład z wyraźną tendencją rosnącą.

b) Rozkład z wyraźną tendencją malejącą.

Rysunek 4.4 Przykładowe rozkłady odpowiedzi w analizowanych ankietach dla wariantu W3.

Źródło: opracowanie własne

Aby sprawdzić w jakim stopniu wariant 3 spełniał dane podkryteria obliczono średnią arytmetyczną oraz wektory preferencji (tab.4.15).

Tabela 4.15 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów dla wariantu W3.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Średnia punktów	Ocena po normalizacji
1	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	4,228	0,088
2	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	4,158	0,086
3	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	4,123	0,086
4	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	4,105	0,085
5	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	4,088	0,085
6	C3 – ilość drzew do wycięcia	4,088	0,085
7	C5 – przecięcie cieków wodnych	4,070	0,085
8	D1 – liczba budynków do wyburzenia	4,000	0,083
9	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	4,000	0,083
10	C1 – naruszenie obszarów chronionych	3,596	0,075
11	A3 – długość drogi w km	1,298	0,027
12	A2 – czas przewozów	1,193	0,025
13	A1 – praca przewozowa	1,123	0,023
14	B3 – koszty odszkodowań	1,123	0,023
15	A4 - eksploatacja pojazdów	1,088	0,023
16	B1 – koszt budowy drogi	1,053	0,022
17	B2 – koszt wykupu terenu	0,772	0,016

Źródło: opracowanie własne

Wariant ten wykazał najwyższy poziom spełnienia kryteriów społecznych i środowiskowych w porównaniu z pozostałymi analizowanymi rozwiązaniami, co było widoczne już na etapie wstępnej oceny. Po wyeliminowaniu 10% skrajnych odpowiedzi, zaobserwowano niewielką

zmianę w kolejności spełnienia poszczególnych kryteriów (tab.4.16) względem wyników uzyskanych przy uwzględnieniu pełnego zbioru danych (tab.4.15).

Tabela 4.16 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów po odrzuceniu 10% wartości skrajnych odpowiedzi dla wariantu 3.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Średnia punktów	Ocena po normalizacji
1	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	4,245	0,088
2	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	4,170	0,086
3	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	4,151	0,086
4	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	4,132	0,085
5	C3 – ilość drzew do wycięcia	4,132	0,085
6	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	4,132	0,085
7	C5 – przecięcie cieków wodnych	4,075	0,084
8	D1 – liczba budynków do wyburzenia	4,038	0,083
9	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	4,000	0,083
10	C1 – naruszenie obszarów chronionych	3,642	0,075
11	A3 – długość drogi w km	1,283	0,027
12	A2 – czas przewozów	1,208	0,025
13	B3 – koszty odszkodowań	1,132	0,023
14	A1 – praca przewozowa	1,113	0,023
15	A4 - eksploatacja pojazdów	1,094	0,023
16	B1 – koszt budowy drogi	1,057	0,022
17	B2 – koszt wykupu terenu	0,755	0,016

Źródło: opracowanie własne

Również wartości mediany i dominanty wskazały na tendencję przewyższania kryteriów społecznych i środowiskowych nad pozostałymi, co pokazano w tabeli 4.17.

Tabela 4.17 Mediana i dominanta dla analizowanych podkryteriów dla wariantu 3.

Miejsce w rankingu	Kryterium	Mediana	Dominanta
1	A1 – praca przewozowa	1	1
2	A2 – czas przewozów	1	1
3	A3 – długość drogi w km	1	1
4	A4 - eksploatacja pojazdów	1	1
5	B1 – koszt budowy drogi	1	1
6	B2 – koszt wykupu terenu	1	1
7	B3 – koszty odszkodowań	1	1
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych	4	4
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	4	4
10	C3 – ilość drzew do wycięcia	4	4
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	4	4
12	C5 – przecięcie cieków wodnych	4	4

c.d. Tabeli 4.17

Miejsce w rankingu	Kryterium	Mediana	Dominanta
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia	4	4
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	4	4
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	4	4
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	4	5
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	4	4

Źródło: opracowanie własne

Przedstawiony proces przygotowania danych do dalszej analizy jest praco- i czasochłonny, a otrzymane wyniki mogą budzić wątpliwości. Ich jakość i spójność mają bezpośredni wpływ na wiarygodność wyników. Różnorodność ocen ekspertów wymaga zastosowania metod statystycznych, aby zminimalizować wpływ subiektywnych i skrajnych odpowiedzi. W przedstawionym badaniu wzięło udział 57 osób, a często w praktyce bywa ich znacznie więcej, z czym wiąże się też większa rozbieżność danych. Różnice w podejściu ekspertów, ich doświadczeniu i rozumieniu kryteriów powodują, że dane wymagają dodatkowego przetwarzania i weryfikacji przed użyciem ich w modelu decyzyjnym.

4.3 Dobór metody analizy wielokryterialnej

Ze względu na dużą liczbę metod wielokryterialnych istnieje możliwość wyboru takiej, która będzie odpowiednia w danej sytuacji. Podczas porównywania wariantów nie ma konieczności stosowania oceny binarnej, lecz nadrzędne staje się określenie stopnia spełnienia danego kryterium. Stąd też ważne jest dobranie metody o stosunkowo prostym aparacie matematycznym oraz możliwości przedstawienia wyników w czytelny, najlepiej graficzny sposób. W (Szafranko, 2019) dokonano zestawienia najczęściej stosowanych metod do oceny wariantów inwestycji na terenie województwa warmińsko-mazurskiego w latach 2014-2017 (tab.4.18).

Tabela 4.18 Zestawienie metod najczęściej stosowanych do oceny wariantów inwestycji na terenie województwa warmińsko-mazurskiego w latach 2014-2017.

Metoda oceny wariantów	2014	2015	2016	2017
Metoda oceny punktowej i wagowo-punktowej	25	23	20	21
Metoda średniej arytmetycznej	16	16	12	10
Metoda średniej ważonej	8	10	11	10
Metoda analizy hierarchicznej AHP	2	6	7	5

Źródło: (Szafranko, 2019)

Zdecydowanie przeważały metody oceny punktowej i wagowo-punktowej ze względu na łatwość ich stosowania. W zestawieniu znalazła się również metoda AHP jako jedna z bardziej zaawansowanych matematycznie metod analizy wielokryterialnej. Jej popularność wynika z możliwości pokazania struktury wewnętrznej procesu decyzyjnego w formie graficznej. Metoda ta umożliwia uporządkowane i przejrzyste porównywanie wariantów inwestycyjnych w sytuacji, gdy kryteria oceny mają zróżnicowany charakter oraz nie zawsze poddają się jednoznacznej kwantyfikacji. Pozwala również na weryfikację spójności ocen, co ma istotne znaczenie w analizach obciążonych ryzykiem subiektywizmu.

W celu pokazania rozbieżności wyników ocen dokonanych różnymi metodami wielokryterialnymi przeprowadzono również ocenę metodą MCE.

O wyborze tych dwóch metod zadecydował również ich odmienny charakter. AHP to metoda bardziej teoretyczna, wykorzystująca bardziej zaawansowane narzędzia matematyczne, a MCE – metoda bardziej praktyczna, o podejściu aplikacyjnym.

4.3.1 Metoda analizy wielokryterialnej MCE

Metoda MCE to narzędzie umożliwiające ocenę wariantów inwestycyjnych poprzez jednoczesne uwzględnienie wielu kryteriów o zróżnicowanym charakterze i znaczeniu, co odpowiada specyfice decyzji podejmowanych w procesie planowania i realizacji przedsięwzięć drogowych.

Ustalono kryteria oraz stopień ich spełnienia w trzech planowanych wariantach budowy odcinka drogi. Przyjęto wagi kryteriów głównych uwzględniając specyfikę inwestycji. Ich wartość zawierała się w przedziale 0-1. Dla każdego podkryterium eksperci przydzielali oceny w skali 0-5, gdzie 0 oznaczało niespełnienie danego czynnika, a 5 – jego pełne spełnienie. Uwzględniono po 57 odpowiedzi do każdego podkryterium dla wszystkich trzech wariantów. Zsumowano oceny dla poszczególnych podkryteriów, a następnie przemnożono je przez odpowiednie wagi kryteriów głównych. W rezultacie obliczono syntetyczny wynik dla każdego z wariantów, pozwalający na ich porównanie. Szczegółowe dane oraz zestawienie wyników przedstawiono w tabelach 4.19, 4.20, 4.21.

Tabela 4.19 Analiza wielokryterialna MCE dla wariantu 1.

Lp.	Waga kryterium głównego	Kryterium	Suma ocen	Suma ocen po uwzględnieniu wag
1	0,19	A1 – praca przewozowa	207	39,33
2		A2 – czas przewozów	236	44,84
3		A3 – długość drogi w km	233	44,27
4		A4 - eksploatacja pojazdów	231	43,89

c.d. Tabeli 4.19

Lp.	Waga kryterium głównego	Kryterium	Suma ocen	Suma ocen po uwzględnieniu wag
5	0,25	B1 – koszt budowy drogi	222	55,50
6		B2 – koszt wykupu terenu	248	62,00
7		B3 – koszty odszkodowań	240	60,00
8	0,31	C1 – naruszenie obszarów chronionych	175	54,25
9		C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	169	52,39
10		C3 – ilość drzew do wycięcia	123	38,13
11		C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	183	56,73
12		C5 – przecięcie cieków wodnych	186	57,66
13	0,25	D1 – liczba budynków do wyburzenia	118	29,50
14		D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	140	35,00
15		D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	176	44,00
16		D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	139	34,75
17		D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	162	40,50
Suma	1,00			792,74

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.20 Analiza wielokryterialna MCE dla wariantu 2.

Lp.	Waga kryterium głównego	Kryterium	Suma ocen	Suma ocen po uwzględnieniu wag
1	0,19	A1 – praca przewozowa	126	23,94
2		A2 – czas przewozów	107	20,33
3		A3 – długość drogi w km	103	19,57
4		A4 - eksploatacja pojazdów	123	23,37
5	0,25	B1 – koszt budowy drogi	166	41,50
6		B2 – koszt wykupu terenu	137	34,25
7		B3 – koszty odszkodowań	144	36,00
8	0,31	C1 – naruszenie obszarów chronionych	190	58,90
9		C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	171	53,01
10		C3 – ilość drzew do wycięcia	161	49,91
11		C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	172	53,32
12		C5 – przecięcie cieków wodnych	184	57,04
13	0,25	D1 – liczba budynków do wyburzenia	219	54,75
14		D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	250	62,50
15		D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	243	60,75
16		D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	216	54,00
17		D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	253	63,25
Suma	1,00			766,39

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.21 Analiza wielokryterialna MCE dla wariantu 3.

Lp.	Waga kryterium głównego	Kryterium	Suma ocen	Suma ocen po uwzględnieniu wag
1	0,19	A1 – praca przewozowa	64	12,16
2		A2 – czas przewozów	68	12,92
3		A3 – długość drogi w km	74	14,06
4		A4 - eksploatacja pojazdów	62	11,78
5	0,25	B1 – koszt budowy drogi	60	15
6		B2 – koszt wykupu terenu	44	11
7		B3 – koszty odszkodowań	64	16
8	0,31	C1 – naruszenie obszarów chronionych	205	63,55
9		C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne	233	72,23
10		C3 – ilość drzew do wycięcia	233	72,23
11		C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	237	73,47
12		C5 – przecięcie cieków wodnych	232	71,92
13	0,25	D1 – liczba budynków do wyburzenia	228	57
14		D2 – liczba budynków w odległości 0-50m	234	58,5
15		D3 – liczba budynków w odległości 50-100m	228	57
16		D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	235	58,75
17		D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	241	60,25
Suma	1,00			737,82

Źródło: opracowanie własne

Metoda MCE umożliwiła porównanie wszystkich zaproponowanych wariantów inwestycji pod kątem każdego z podkryteriów. Podsumowanie wyników uzyskanych z tej metody pokazano w tabeli 4.22.

Tabela 4.22 Wyniki metody MCE dla trzech wariantów inwestycji – podsumowanie.

	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Suma ocen po uwzględnieniu wag	792,74	766,39	737,82

Źródło: opracowanie własne

Z obliczeń wynika, że najbardziej korzystny okazał się wariant nr 1, ponieważ w najwyższym stopniu spełnił analizowane kryteria.

Metoda MCE okazała się skuteczna w integracji zróżnicowanych danych eksperckich, a zastosowanie wag kryteriów pozwoliło na uwzględnienie zróżnicowanej istotności poszczególnych parametrów decyzyjnych. Proces normalizacji wag był niezbędny, aby zapewnić porównywalność ocen. Należy jednak podkreślić, że skuteczność metody w dużej

mierze zależy od jakości danych wejściowych, co potwierdza kluczowe znaczenie etapu przygotowania zebranych odpowiedzi. W celu weryfikacji metody i zwiększenia wiarygodności rekomendacji decyzyjnych w podrozdziale 4.3.2 przeprowadzono analizę wielokryterialną drugą z wybranych metod, czyli AHP.

4.3.2 Metoda analizy wielokryterialnej AHP

Metoda AHP daje możliwość hierarchicznego porządkowania złożonych problemów decyzyjnych w budownictwie przy jednoczesnej kontroli spójności podejmowanych porównań.

Podobnie jak w poprzedniej metodzie proces oceny rozpoczyna się współpracą z ekspertami. Przeprowadzono badania ankietowe wśród reprezentatywnej grupy interesariuszy, którzy uczestniczyli już w poprzednim badaniu ankietowym (inspektorzy ochrony środowiska, urzędnicy administracji architektoniczno-budowlanej i nadzoru, inżynierowie budowlani oraz przedstawiciele społeczności lokalnej – łącznie 57 osób). Na potrzeby niniejszej analizy opracowano kwestionariusz, składający się z trzech części (załącznik 6). W I części respondenci dokonywali porównania kryteriów głównych A-D. Część II dotyczyła porównania podkryteriów w obrębie każdej grupy, natomiast III – porównań wariantów W1-W3 względem kryteriów głównych. Do oceny zastosowano 9-stopniową skalę Saaty-ego, w której:

- a) pierwszy i drugi element są równie ważne (ocena: 1),
- b) pierwszy element jest ważniejszy od drugiego (ocena: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9),
- c) drugi element jest ważniejszy od pierwszego (ocena: 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9).

W pierwszej kolejności były porównywane kryteria główne. Dane i obliczenia zostały przedstawione w tabeli 4.23 oraz 4.24. Z obliczeń wynika (tab 4.23), że kryterium A było najmniej istotne. Następnie stwierdzono, że kryterium B było ważniejsze od A (ocena 5), mniej istotne niż kryterium C (ocena 0,33) oraz równorzędne z D. Kryterium C okazało się najistotniejsze. Kryterium D z kolei przewyższało A (ocena 5), lecz było mniej istotne niż C (ocena 0,33).

Tabela 4.23 Macierz porównań dla kryteriów głównych.

Kryteria nadrzędne	A	B	C	D
A	1,00	0,20	0,14	0,20
B	5,00	1,00	0,33	1,00
C	7,00	3,00	1,00	3,00
D	5,00	1,00	0,33	1,00

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.24 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla kryteriów nadrzędnych.

Kryteria nadrzędne	A	B	C	D	Suma w_{ij}	Wektor priorytetów
A	0,0625	0,0354	0,0838	0,0442	0,2259	0,0565
B	0,1875	0,1072	0,1198	0,0728	0,4873	0,1218
C	0,4375	0,5359	0,5988	0,6623	2,2345	0,5586
D	0,3125	0,3215	0,1976	0,2208	1,0524	0,2631

Źródło: opracowanie własne

Następnie obliczono maksymalną wartość macierzy własnej:

$$\lambda \frac{1}{w_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j = 0,9514 + 1,1006 + 0,9479 + 1,1006 = 4,1005$$

Wyznaczono wartość współczynnika niespójności:

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max}}{n-1} = 0,03350$$

oraz wskaźnik niespójności:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} = \frac{0,03350}{0,9} = 3,72\% \quad (C.R. \text{ powinno osiągnąć wartość } < 10\%),$$

gdzie R.I. (indeks losowej zgodności) dla $n = 4$ (n – liczba porównywanych elementów)

wynosi 0,9. Wskaźnik C.R. jest mniejszy niż 10%, co oznacza, że dokonane oceny porównań parami są spójne (zbliżone) ze średnią wartością odpowiedzi ekspertów.

Następnie dokonano porównania podkryteriów w obrębie każdej grupy kryteriów głównych, w celu ustalenia ważności każdego czynnika z danego obszaru na tle pozostałych. Obliczenia przeprowadzono według przedstawionej wyżej procedury. Kolejne wyniki obliczeń zostały zestawione w tabelach 4.25-4.32.

Tabela 4.25 Macierz porównań podkryteriów z grupy A.

Podkryteria	A1	A2	A3	A4
A1	1,00	0,20	0,17	0,33
A2	5,00	1,00	0,50	3,00
A3	6,00	2,00	1,00	3,00
A4	3,00	0,33	0,33	1,00

*Źródło: opracowanie własne***Tabela 4.26** Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla podkryteriów z grupy A.

	A1	A2	A3	A4	Suma w_{ij}	Wektor priorytetu
A1	0,0667	0,0566	0,0833	0,0455	0,2521	0,0630
A2	0,3333	0,2830	0,2500	0,4091	1,2754	0,3189
A3	0,4000	0,5660	0,5000	0,4091	1,8751	0,4688
A4	0,2000	0,0943	0,1667	0,1364	0,5974	0,1493

Źródło: opracowanie własne

$\lambda = 4,1046$, C. I. = 0,03487, C. R. = 3,87% < 10%

R.I. dla $n = 4$ wynosi 0,9.

Tabela 4.27 Macierz porównań podkryteriów z grupy B.

Podkryteria	B1	B2	B3
B1	1,00	0,33	0,20
B2	3,00	1,00	0,50
B3	5,00	2,00	1,00

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.28 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla podkryteriów z grupy B.

	B1	B2	B3	Suma wij	Wektor priorytetu
B1	0,1111	0,1000	0,1176	0,3288	0,1096
B2	0,3333	0,3000	0,2941	0,9275	0,3092
B3	0,5556	0,6000	0,5882	1,7438	0,5813

Źródło: opracowanie własne

$\lambda = 3,0049$, C. I. = 0,00246, C. R. = 0,42% < 10%

R.I. dla $n = 3$ wynosi 0,58.

Tabela 4.29 Macierz porównań podkryteriów z grupy C.

Podkryteria	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1,00	2,00	0,33	3,00	5,00
C2	0,50	1,00	0,33	3,00	4,00
C3	3,00	3,00	1,00	5,00	7,00
C4	0,33	0,33	0,20	1,00	3,00
C5	0,20	0,25	0,14	0,33	1,00

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.30 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla podkryteriów z grupy C.

	C1	C2	C3	C4	C5	Suma wij	Wektor priorytetu
C1	0,1987	0,3038	0,1659	0,2432	0,2500	1,1616	0,2323
C2	0,0993	0,1519	0,1659	0,2432	0,2000	0,8604	0,1721
C3	0,5960	0,4557	0,4976	0,4054	0,3500	2,3048	0,4610
C4	0,0662	0,0506	0,0995	0,0811	0,1500	0,4475	0,0895
C5	0,0397	0,0380	0,0711	0,0270	0,0500	0,2258	0,0452

Źródło: opracowanie własne

$\lambda = 5,2355$, C. I. = 0,05887, C. R. = 5,26% < 10%

R.I. dla $n = 5$ wynosi 1,12.

Tabela 4.31 Macierz porównań podkryteriów z grupy D.

Podkryteria	D1	D2	D3	D4	D5
D1	1,00	5,00	7,00	3,00	2,00
D2	0,20	1,00	5,00	0,50	0,50
D3	0,14	0,20	1,00	0,20	0,20
D4	0,33	2,00	5,00	1,00	0,50
D5	0,50	2,00	5,00	2,00	1,00

*Źródło: opracowanie własne***Tabela 4.32** Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla podkryteriów z grupy D.

	D1	D2	D3	D4	D5	Suma wj	Wektor priorytetu
D1	0,4595	0,4902	0,3043	0,4478	0,4762	2,1780	0,4356
D2	0,0919	0,0980	0,2174	0,0746	0,1190	0,6010	0,1202
D3	0,0656	0,0196	0,0435	0,0299	0,0476	0,2062	0,0412
D4	0,1532	0,1961	0,2174	0,1493	0,1190	0,8349	0,1670
D5	0,2298	0,1961	0,2174	0,2985	0,2381	1,1798	0,2360

Źródło: opracowanie własne
 $\lambda = 5,2324$, C.I. = 0,05811, C.R. = 5,19% < 10%
R.I. dla $n = 5$ wynosi 1,12.

Podsumowanie powyższych obliczeń zestawiono w tabeli 4.33, przedstawiając wektor priorytetu dla każdego podkryterium w poszczególnych grupach. Im wyższa wartość wektora priorytetu, tym ważniejszy jest dany czynnik.

Tabela 4.33 Wektor priorytetu dla podkryteriów w poszczególnych grupach.

Podkryteria	Waga kryteriów głównych	Wektor priorytetów dla podkryteriów w poszczególnych grupach	Ocena końcowa
A1	0,0565	0,0630	0,0036
A2		0,3189	0,0180
A3		0,4688	0,0265
A4		0,1493	0,0084
B1	0,1218	0,1096	0,0133
B2		0,3092	0,0377
B3		0,5813	0,0708
C1	0,5586	0,2323	0,1298
C2		0,1721	0,0961
C3		0,4610	0,2575
C4		0,0895	0,0500
C5		0,0452	0,0252
D1	0,2631	0,4356	0,1146
D2		0,1202	0,0316
D3		0,0412	0,0108
D4		0,1670	0,0439
D5		0,2360	0,0621

Źródło: opracowanie własne

W dalszym postępowaniu dokonano oceny wszystkich trzech wariantów realizacji inwestycji drogowej W1, W2, W3, ponieważ każdy z nich w różnym stopniu spełniał dany warunek. W celu dokonania kompleksowej analizy wariantów, przeprowadzono porównanie parami w aspekcie kryteriów głównych. W pierwszej kolejności przeanalizowano wpływ kryteriów transportowych i komunikacyjnych na poszczególne warianty. Wyniki zestawiono w tabelach 4.34, 4.35.

Tabela 4.34 Macierz porównań dla wariantów w aspekcie kryterium A.

Warianty	W1	W2	W3
W1	1,00	5,00	7,00
W2	0,20	1,00	3,00
W3	0,14	0,33	1,00

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.35 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla wariantów porównywanych w aspekcie kryteriów grupy A.

w_{ij}	W1	W2	W3	Suma w_{ij}	Wektor priorytetu wariantów
W1	0,1250	0,0769	0,1803	0,3823	0,1274
W2	0,5000	0,3077	0,2732	1,0809	0,3603
W3	0,3750	0,6154	0,5464	1,5368	0,5123

Źródło: opracowanie własne

$\lambda = 3,1115$, C. I. = 0,05573, C. R. = 9,61% < 10%

R.I. dla $n = 3$ wynosi 0,58.

W tabelach 4.36, 4.37 podano wyniki oddziaływań kryteriów ekonomicznych, na każdy wariant.

Tabela 4.36 Macierz porównań dla wariantów w aspekcie kryterium B.

Warianty	W1	W2	W3
W1	1,00	3,00	7,00
W2	0,33	1,00	5,00
W3	0,14	0,20	1,00

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.37 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla wariantów porównywanych w aspekcie kryteriów grupy B.

w_{ij}	W1	W2	W3	Suma w_{ij}	Wektor priorytetu wariantów
W1	0,6774	0,7143	0,5385	1,9302	0,6434
W2	0,2258	0,2381	0,3846	0,8485	0,2828
W3	0,0968	0,0476	0,0769	0,2213	0,0738

Źródło: opracowanie własne

$\lambda = 3,0967$, C.I. = 0,04836, C.R. = 8,34% < 10%

Takie same analizy wykonano w odniesieniu do kryteriów środowiskowych (tabele 4.38 i 4.39) oraz do kryteriów społeczno-planistycznych (tabele 4.40 i 4.41).

Tabela 4.38 Macierz porównań dla wariantów w aspekcie kryterium C.

Warianty	W1	W2	W3
W1	1,00	0,33	0,11
W2	3,00	1,00	0,17
W3	9,00	6,00	1,00

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.39 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla wariantów porównywanych w aspekcie kryteriów grupy C.

w_{ij}	W1	W2	W3	Suma w_{ij}	Wektor priorytetu wariantów
W1	0,0769	0,0455	0,0870	0,2093	0,0698
W2	0,2308	0,1364	0,1304	0,4976	0,1659
W3	0,6923	0,8182	0,7826	2,2931	0,7644

Źródło: opracowanie własne

$\lambda = 3,1001$, C.I. = 0,05004, C.R. = 8,63% < 10%

Tabela 4.40 Macierz porównań dla wariantów w aspekcie kryterium D.

Warianty	W1	W2	W3
W1	1,00	0,17	0,20
W2	6,00	1,00	2,00
W3	5,00	0,50	1,00

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4.41 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla wariantów porównywanych w aspekcie kryteriów grupy D.

w_{ij}	W1	W2	W3	Suma w_{ij}	Wektor priorytetu wariantów
W1	0,0833	0,1000	0,0625	0,2458	0,0819
W2	0,5000	0,6000	0,6250	1,7250	0,5750
W3	0,4167	0,3000	0,3125	1,0292	0,3431

Źródło: opracowanie własne

$\lambda = 3,0394$, C.I. = 0,01972, C.R. = 3,40% < 10%

Na podstawie otrzymanych wartości wektora priorytetów dla analizowanych wariantów, w zależności od danego kryterium, można wysnuć wniosek, który wariant w wyższym stopniu spełnia poszczególne kryteria. Jednak pozostaje pytanie, który z wariantów w globalnym podejściu najlepiej spełnia wszystkie kryteria. W tym celu przeprowadzono obliczenia

wektora wypadkowego ocen jako suma iloczynów priorytetów dla kryteriów głównych i wag kryteriów podrzędnych:

$$w_i^A = \sum \overline{w_i^K} w_i^w$$

gdzie:

w_i^A – wektor wypadkowy oceny

$\overline{w_i^K}$ – wektor priorytetów dla kryteriów głównych

w_i^w – wektor priorytetów dla wariantów

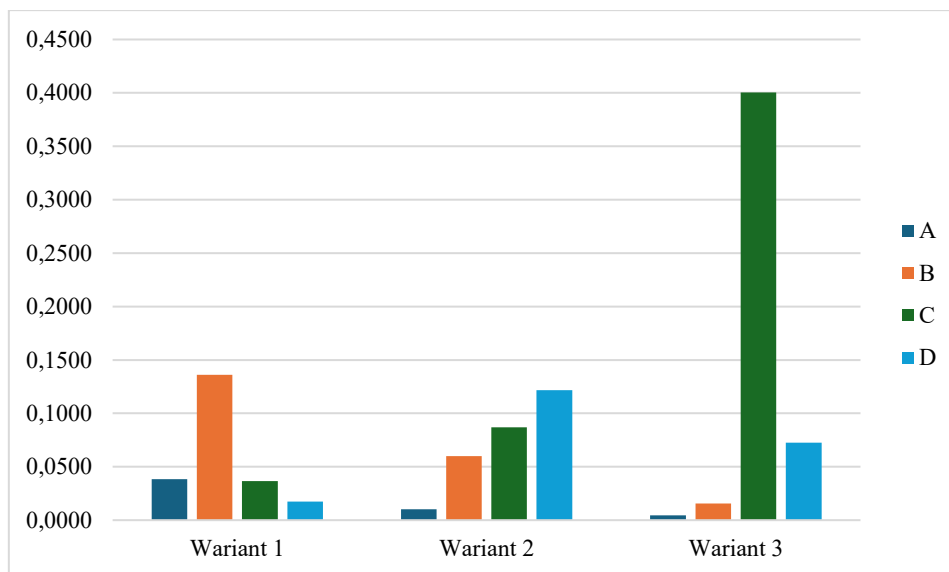
Obliczenie wektora wypadkowego priorytetów dla rozpatrywanych wariantów zestawiono w tabeli 4.42.

Tabela 4.42 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla wariantów.

Kryteria	Wektor priorytetów dla kryteriów głównych	Wektory priorytetów dla wariantów	Wektor wypadkowy oceny
Wariant 1			
A	0,0529	0,7235	0,0382
B	0,2117	0,6434	0,1362
C	0,5238	0,0698	0,0366
D	0,2117	0,0819	0,0173
		suma	0,2283
Wariant 2			
A	0,0529	0,1932	0,0102
B	0,2117	0,2828	0,0599
C	0,5238	0,1659	0,0869
D	0,2117	0,5750	0,1217
		suma	0,2787
Wariant 3			
A	0,0529	0,0833	0,0044
B	0,2117	0,0738	0,0156
C	0,5238	0,7644	0,4004
D	0,2117	0,3431	0,0726
		suma	0,4930

Źródło: opracowanie własne

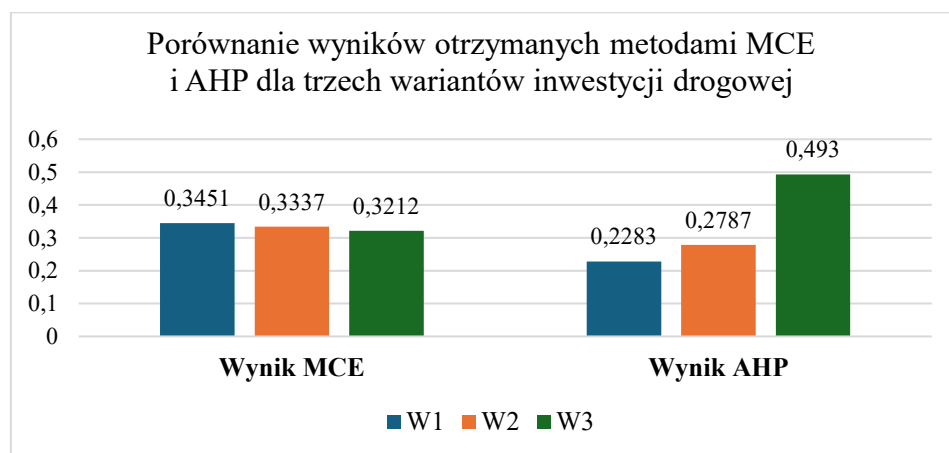
Rozkład ocenianych wartości pokazano na rys. 4.5.



Rysunek 4.5 Rozkład ocen uzyskanych w wyniku analizy metodą AHP.
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że zgodnie z zastosowaną metodą AHP wariant W3 uzyskał najwyższą ocenę, co wskazuje na jego przewagę nad pozostałymi rozwiązaniami. Warto podkreślić, że wariant ten w najwyższym stopniu spełniał kryteria środowiskowe – C, które stanowiły priorytet w kontekście analizowanej inwestycji i to właśnie te czynniki zadecydowały o wygranej wariantu nr 3.

Porównanie wyników uzyskanych za pomocą metod MCE i AHP wykazało istotne rozbieżności. W celu przedstawienia obrazowo wyników z obydwu metod, znormalizowano rezultaty z metody MCE i podsumowanie zaprezentowano na wykresie 4.6.



Rysunek 4.6 Porównanie wyników otrzymanych metodami MCE i AHP dla trzech wariantów inwestycji drogowej.
Źródło: opracowanie własne

W pierwszej z wymienionych metod wariant nr1 okazał się najlepszy, a w drugiej zdecydowaną przewagę uzyskał wariant nr3. W przypadku metody MCE różnice pomiędzy

wariantami były niewielkie, co utrudniało jednoznaczne wskazanie najlepszego rozwiązania. Metoda AHP umożliwiła bardziej szczegółową analizę relacji pomiędzy kryteriami, a zastosowane kryteria spójności (C.R., C.I.) pozwoliły ocenić czy eksperci dokonywali ocen w sposób konsekwentny i logiczny. Należy jednak zauważyć, że porównania parami wymagają wysokiej rzetelności i koncentracji, co może prowadzić do błędów, zwłaszcza przy większej liczby kryteriów.

Otrzymane wyniki, a także czasochłonność oraz pracochłonność związana z zastosowaniem metod MCE i AHP skłoniły autora do pogłębienia analizy problemu decyzyjnego w kontekście wyboru wariantu inwestycyjnego. Proces ten wiąże się z ryzykiem decyzyjnym, które nie jest w pełni uwzględniane przez klasyczne metody wielokryterialne. W związku z tym, przy podejmowaniu decyzji należy uwzględniać nie tylko ocenę wariantów pod kątem spełnienia określonych kryteriów, lecz również możliwość wystąpienia negatywnych skutków oraz ich potencjalną skalę, zarówno w wymiarze technicznym, ekonomicznym i społecznym. W szczególności istotne stało się pytanie: jakie ryzyko wiąże się z dokonywanym wyborem oraz jakie mogą być konsekwencje takiej decyzji dla interesariuszy? W tym kontekście zasadne jest rozważenie, czy możliwe jest ograniczenie ryzyka poprzez zastosowanie zintegrowanych metod oceny, uwzględniające zarówno preferencje decydentów, jak i potencjalne negatywne skutki decyzji. Powyższe rozważania stanowią uzasadnienie dla dalszych analiz nad możliwościami wzbogacenia procesu decyzyjnego o komponent oceny ryzyka. W kolejnych częściach pracy podjęto próbę identyfikacji i klasyfikacji ryzyk, a także oceny ich wpływu na trafność podejmowanych decyzji.

5. RYZYKA TOWARZYSZĄCE WYBOROWI WARIANTÓW INWESTYCYJNYCH

Proces oceny wariantów inwestycji budowlanych z wykorzystaniem metod wielokryterialnych niesie ze sobą szereg ryzyk, które mogą znacząco wpłynąć na trafność podejmowanych decyzji. Ryzyko dokonania nieoptymalnego wyboru wariantu inwestycyjnego może wynikać z ograniczeń samych metod, przede wszystkim ze stosowania ich w warunkach rzeczywistych, gdzie występuje złożoność danych, subiektywność ocen oraz zmienność otoczenia decyzyjnego. Rzetelność analizy mogą zakłócić nieprecyzyjnie zdefiniowane cele, niekompletność danych czy też presja społeczna.

Analiza wielokryterialna jest powszechnie stosowana w ocenach wariantów inwestycji budowlanych. Daje możliwość uwzględnienia różnorodnych kryteriów jakościowych oraz ilościowych. Jednak, jak udowodniono w podrozdziałach 4.3.1 i 4.3.2 na przykładach, otrzymane wyniki mogą być niejednoznaczne i obarczone pewnego rodzaju ryzykiem. Skutki niewłaściwych decyzji w procesie inwestycyjnym w budownictwie mogą być bardzo poważne i wielowymiarowe zarówno dla inwestora, jak i dla innych uczestników. Z tego względu ważne jest świadome i krytyczne podejście do metod wielokryterialnych. Autor niniejszej pracy zdecydował się na rozszerzenie klasycznych metod MCDA o komponent ryzyka. Każdy etap procesu decyzyjnego – od ustalenia kryteriów, przez ich wartościowanie, aż po wybór – może być podatny na zakłócenia wynikające z czynników wewnętrznych i zewnętrznych. Ryzyko nie wynika tylko ze specyfiki danej inwestycji, ale jest powiązane z ograniczeniami i niedoskonałościami procesu analitycznego.

W celu uporządkowania i pogłębienia analizy ryzyk towarzyszących procesowi decyzyjnemu, w dalszej części rozdziału dokonano ich identyfikacji z uwzględnieniem klasyfikacji oraz przypisania do poszczególnych etapów procesu wyboru wariantu inwestycyjnego.

5.1 Klasyfikacja ryzyk

W podrozdziale 3.1 przedstawiono różne klasyfikacje ryzyka, a wśród nich podział na zewnętrzne i wewnętrzne. Ryzyka zewnętrzne wynikają z otoczenia inwestycji, uwarunkowań społecznych, prawnych, środowiskowych, natomiast ryzyka wewnętrzne mogą dotyczyć organizacji procesu decyzyjnego, metodyki, kompetencji zespołu. W celu głębszego zrozumienia źródeł ryzyk stosowania analizy wielokryterialnej w ocenach wariantów

inwestycji budowlanych dokonano ich podziału na te dwie kategorie i przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Ryzyka związane z wyborem wariantu inwestycyjnego.

Lp.	Ryzyka wewnętrzne	Lp.	Ryzyka zewnętrzne
W1	Wrażliwość metody na dane wejściowe.	Z1	Zmiany regulacji prawnych i warunków kontraktowych.
W2	Złożoność obliczeniowa i operacyjna metody.	Z2	Zmiany koniunktury budowlanej.
W3	Subiektywność ocen.	Z3	Presja czasu, konieczność szybkiego podejmowania decyzji.
W4	Trudności w interpretacji wyników.	Z4	Niewłaściwy dobór ekspertów.
W5	Rozbieżność wyników uzyskanych różnymi metodami MCDM.	Z5	Słaba komunikacja między uczestnikami procesu oceny.

Źródło: opracowanie własne

Podział na ryzyka wewnętrzne i zewnętrzne pozwala na skuteczniejsze zarządzanie ryzykiem, umożliwiając dobór odpowiednich działań naprawczych i prewencyjnych. Na tej podstawie łatwiej jest zrozumieć, które problemy wynikają z samej metodyki, a które z otoczenia decyzyjnego. Ryzyka wewnętrzne wskazują na potrzebę doskonalenia narzędzi analitycznych, standaryzacji procedur oraz zwiększenia odporności modeli na niepewność. Natomiast ryzyka zewnętrzne obejmują uwarunkowania prawne, rynkowe, organizacyjne i komunikacyjne. Wymagają one działań ukierunkowanych na poprawę zarządzania informacją, współpracy zespołowej, jakości doboru ekspertów oraz dostosowania procesu decyzyjnego do zmiennych warunków realizacyjnych. Takie rozróżnienie pozwala na pełniejsze zrozumienie, że trafność wyboru wariantu zależy nie tylko od właściwego doboru metody MCDM, lecz również od jakości środowiska, w którym przeprowadzana jest analiza, co jest zgodne z ujęciem ryzyka i procesu decyzyjnego przedstawionym we wcześniejszych rozdziałach pracy.

Jednak, aby skutecznie zarządzać ryzykiem, niezbędne jest również zrozumienie na jakim etapie procesu decyzyjnego mogą one występować. W tabeli 5.2 podjęto próbę identyfikacji ryzyk związanych ze stosowaniem analizy wielokryterialnej w procesie inwestycyjnym wraz z pogrupowaniem według etapu procesu oceny wariantu. To syntetyczne zestawienie zostało opracowane na podstawie doświadczenia i badań własnych autora oraz przeglądu literatury.

Tabela 5.2 Ryzyka stosowania analizy wielokryterialnej w procesie inwestycyjnym – etap procesu decyzyjnego.

Etap procesu decyzyjnego	Zidentyfikowane ryzyka
Identyfikacja problemu	– Brak kompletnych danych dotyczących zidentyfikowanego problemu. – Subiektywność ocen – eksperci mogą przedstawić różne podejście do oceny. – Ryzyko źle rozpoznanych preferencji interesariuszy. – Zmiany regulacji prawnych i warunków kontraktowych. – Sformułowane cele mogą być niejasne lub nieprecyzyjne, co utrudni ich realizację. – Możliwość wystąpienia konfliktów przy ustalaniu celów.
Ocena dostępnych wariantów	– Proces zbierania danych, ich analizy oraz interpretacji wyników może być czasochłonny. – Nieodpowiedni wybór kryteriów oceny. – Nadmierna liczba kryteriów utrudniająca przejrzystość oceny i mogąca prowadzić do rozmycia istotnych różnic między wariantami. – Subiektywne przypisanie wag poszczególnym kryteriom. – Złożoność analizy – analiza wielokryterialna może wymagać zaawansowanych metod matematycznych i statystycznych. – Niedostateczne doświadczenie osoby przeprowadzającej analizę. – Próba uproszczenia wyników może mieć wpływ na trafność decyzji. – Wysokie koszty przeprowadzenia analizy wielokryterialnej, zwłaszcza gdy wymaga specjalistycznego oprogramowania i ekspertów. – Różne poglądy zaangażowanych stron mogą prowadzić do konfliktów przy dokonywaniu wyboru.
Podjęcie decyzji	– Zmiana preferencji inwestora na końcowym etapie. – Opóźnienia w podjęciu decyzji, w wyniku rozbieżności opinii interesariuszy lub konfliktów. – Zmiany przepisów, mogą wpłynąć na ostateczną ocenę wybranego wariantu. – Decyzje mogą być podejmowane pod wpływem opinii publicznej, lokalnych grup interesu, co może zaburzyć racjonalność wyboru.

Źródło: opracowanie własne

Ryzyka związane ze stosowaniem analizy wielokryterialnej mogą wynikać zarówno z błędów metodycznych, jak i czynników ludzkich, organizacyjnych czy technicznych. Przedstawiona klasyfikacja pozwala na lepsze zrozumienie, w którym momencie procesu decyzyjnego mogą pojawić się zakłócenia oraz skłania do rozważań na temat możliwości podjęcia działań w celu ich minimalizacji.

5.2 Wpływ zidentyfikowanych ryzyk na wynik procesu decyzyjnego

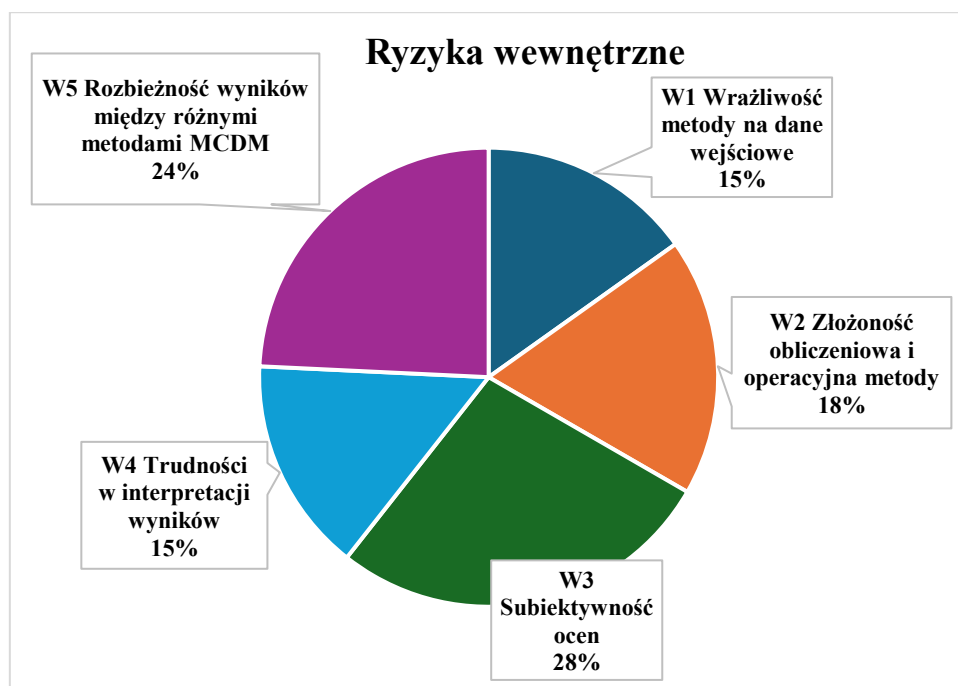
Ryzyka stanowią nieodłączny element procesu decyzyjnego w budownictwie, a ich obecność wpływa zarówno na sposób prowadzenia analizy, jak i na ostateczny wybór wariantu inwestycyjnego. W podrozdziale 5.1 zidentyfikowano i sklasyfikowano czynniki ryzyka towarzyszące ocenie wariantów, które mogą zakłócać przebieg analizy wielokryterialnej oraz zniekształcać interpretację jej wyników. Decyzja o wskazaniu konkretnego wariantu sprowadza się do przyjęcia rozwiązania charakteryzującego się akceptowalnym poziomem ryzyka przy założonym efekcie. Z tego względu konieczne jest określenie, w jakim stopniu poszczególne ryzyka wpływają na trafność i wiarygodność procesu decyzyjnego. Niniejszy podrozdział przedstawia analizę tego oddziaływania.

Ryzyka wewnętrzne, takie jak rozbieżności wyników uzyskiwanych różnymi metodami MCDA, subiektywność ocen eksperckich oraz trudności interpretacyjne wyników, oddziałują bezpośrednio na jakość procesu decyzyjnego. Ich wystąpienie może prowadzić do sytuacji, w której wariant wskazany jako najkorzystniejszy w analizie wielokryterialnej okazuje się w praktyce rozwiązaniem kosztownym, trudnym w realizacji lub niespójnym z rzeczywistymi celami inwestora. Złożoność obliczeniowa i operacyjna metod MCDA sprzyja pomijaniu niektórych etapów analizy, stosowaniu nadmiernych uproszczeń lub skracaniu procedury, co obniża stabilność i wiarygodność otrzymanych wyników. Dodatkowo wysoka wrażliwość metod wielokryterialnych na dane wejściowe zwiększa ryzyko uzyskania rekomendacji zależnych bardziej od spójności danych niż od faktycznych właściwości wariantów.

Ryzyka zewnętrzne, takie jak zmiany regulacji prawnych, wahania cen materiałów czy ograniczenia techniczne i organizacyjne oddziałują na proces decyzyjny z poziomu otoczenia. Oznacza to, że nawet trafnie oceniony wariant może utracić swoją użyteczność, jeśli w trakcie realizacji nastąpią zmiany warunków rynkowych lub prawnych. Presja czasu może dodatkowo zwiększyć prawdopodobieństwo skrócenia procedury analitycznej, pominięcia istotnych kryteriów lub uproszczenia oceny. Ponadto niewystarczająca komunikacja pomiędzy uczestnikami procesu oceny sprzyja powstawaniu nieporozumień, błędnych interpretacji informacji oraz rozbieżności w ustalaniu priorytetów, co znacząco obniża trafność i spójność podejmowanej decyzji.

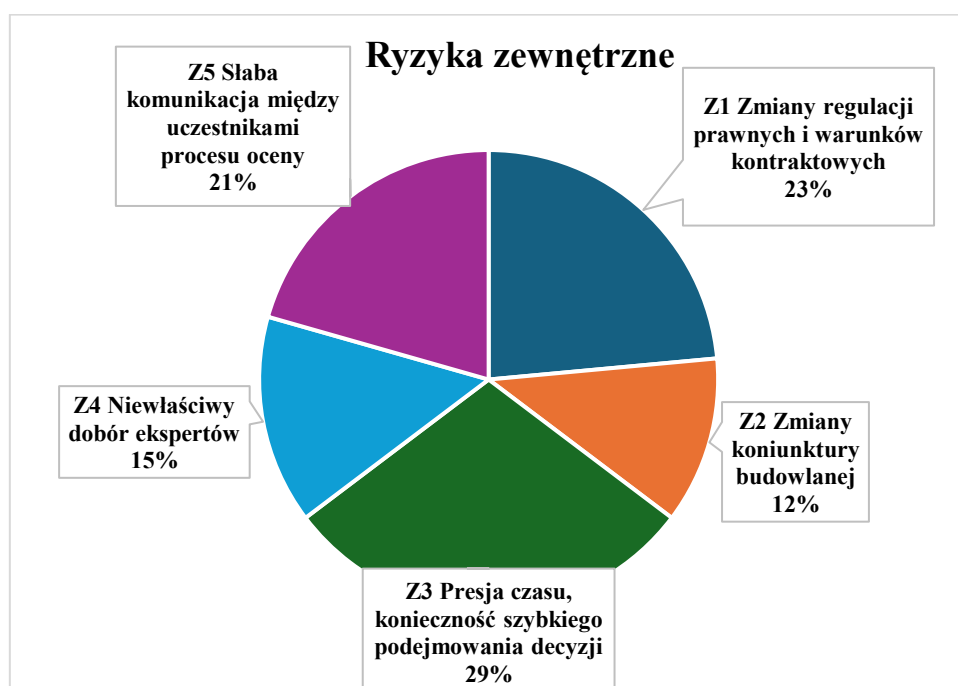
W celu zobrazowania względnej istotności poszczególnych ryzyk wewnętrznych i zewnętrznych zestawionych w tabeli 5.1, opracowano wykresy kołowe przedstawiające ich procentowy udział w ogólnej strukturze zagrożeń wpływających na jakość procesu decyzyjnego (rys. 5.1, 5.2). Wartości te zostały przypisane na podstawie analizy literatury

przedmiotu oraz intuicyjnej oceny autora wynikającej z doświadczeń w projektowaniu i realizacji inwestycji budowlanych. Ten etap miał charakter pogładowy i służył zilustrowaniu relatywnego znaczenia poszczególnych ryzyk w kontekście trafności wyboru wariantu inwestycyjnego. Ze względu na brak jednoznacznych danych empirycznych, wartości należy traktować jako orientacyjne, a ich interpretacja powinna uwzględniać kontekst badania.



Rysunek 5.1 Procentowy wpływ ryzyk wewnętrznych na efektywność decyzji inwestycyjnych.

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 5.2 Procentowy wpływ ryzyk zewnętrznych na efektywność decyzji inwestycyjnych.

Źródło: opracowanie własne

Z danych przedstawionych na wykresie 5.1 wynika, że największy wpływ na rzetelność procesu decyzyjnego mają czynniki związane z subiektywnością ocen (W3) oraz rozbieżnością wyników pomiędzy różnymi metodami MCDM (W5). Na wykresie 5.2 pokazano, że w grupie ryzyk zewnętrznych dominującym czynnikiem jest presja czasu, konieczności szybkiego podejmowania decyzji (Z3). Wysoki udział mają również zmiany regulacji prawnych i warunków kontraktowych (Z1), co podkreśla podatność procesu decyzyjnego na zmienne warunki otoczenia. Wyniki te jednoznacznie wskazują, że zarówno czynniki metodyczne, jak i środowiskowe mogą w istotny sposób zakłócać przebieg analiz wielokryterialnych. Ilustracja procentowych udziałów ryzyk potwierdza zatem potrzebę krytycznego podejścia do metod MCDA oraz konieczność uwzględniania komponentu ryzyka na każdym etapie procesu decyzyjnego.

Metody MCDA oferują ustrukturyzowane podejście do oceny wariantów inwestycji budowlanych, ale wiążą się z różnymi rodzajami ryzyka. Podejmując decyzje należy starannie planować cały proces, zaangażować właściwych ekspertów, zastosować odpowiednie metody. Wszystkie te rozważania, analizy i otrzymane wyniki, skłoniły autora dysertacji do podjęcia próby opracowania nowej metodyki szacowania ryzyka stosowania analizy wielokryterialnej w ocenach wariantów inwestycji budowlanych.

6. AUTORSKA METODA OCENY RYZYKA STOSOWANIA MCDM W OCENACH WARIANTÓW INWESTYCJI BUDOWLANYCH

Metody wielokryterialne mogą stanowić istotne wsparcie procesów decyzyjnych, jednak ich stosowanie nie jest pozbawione ryzyka. Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie autorskiego podejścia do oceny ryzyka stosowania metod MCDA w procesie wyboru wariantu inwestycji budowlanej. Zaproponowana metodyka, opracowana w ramach niniejszej rozprawy, stanowi próbę odpowiedzi na zidentyfikowaną lukę badawczą i może być wykorzystana jako narzędzie wspierające podejmowanie decyzji w warunkach niepewności.

6.1 Metodyka oceny ryzyka decyzyjnego w MCDA „RiskEval-MCDA”

Analizy i badania dotyczące procesu podejmowania decyzji w budownictwie metodami wielokryterialnymi, jak i zgłębienie tematu ryzyka stały się dla autora inspiracją do zaproponowania nowatorskiego podejścia „RiskEval-MCDA” (ang. *Risk Evaluation in Multi-Criteria Decision Analysis*), polegającego na ich komplementarnym połączeniu w jeden spójny model decyzyjny. Celem tej metody jest kompleksowa ocena wariantów inwestycji budowlanych z uwzględnieniem zarówno efektywności decyzyjnej (MCDA), jak i poziomu ryzyka (Risk Assessment). W ten sposób dąży się do zwiększenia odporności procesu decyzyjnego na niepewność i potencjalne skutki wyboru, który – mimo wysokiej oceny – może generować istotne zagrożenia. Kolejne etapy metody przedstawiono na rys. 6.1.

Pierwszy etap to dokonanie wyboru na podstawie przeprowadzonej analizy wielokryterialnej – została przedstawiona w rozdziale 4. Następnie dla każdego wariantu należy wykonać analizę ryzyka, w wyniku której uzyskuje się ranking ryzyka (potencjalne ryzyka, które mogą wystąpić w przypadku realizacji danego wariantu). Mając obydwa rezultaty dokonuje się ich integracji, tworząc macierz decyzyjną – połączenie wyniku MCDA (efektywność) z poziomem ryzyka (bezpieczeństwo). Na podstawie wyników można zastosować jedną z trzech strategii:

- a) wariant kompromisowy – wybór wariantu, który ma wysoki wynik w metodzie MCDA i akceptowalne ryzyko,
- b) korekta wag – jeśli wariant z najlepszym wynikiem MCDA ma zbyt wysokie ryzyko można dokonać zmian wag, np. zwiększyć wagność kryteriów z mniejszym ryzykiem,

- c) wyznaczenie wskaźnika zintegrowanej oceny wariantu inwestycji $IVEI_i$ (ang. *Integrated Variant Evaluation Index*) dla każdego wariantu (wzór 6):

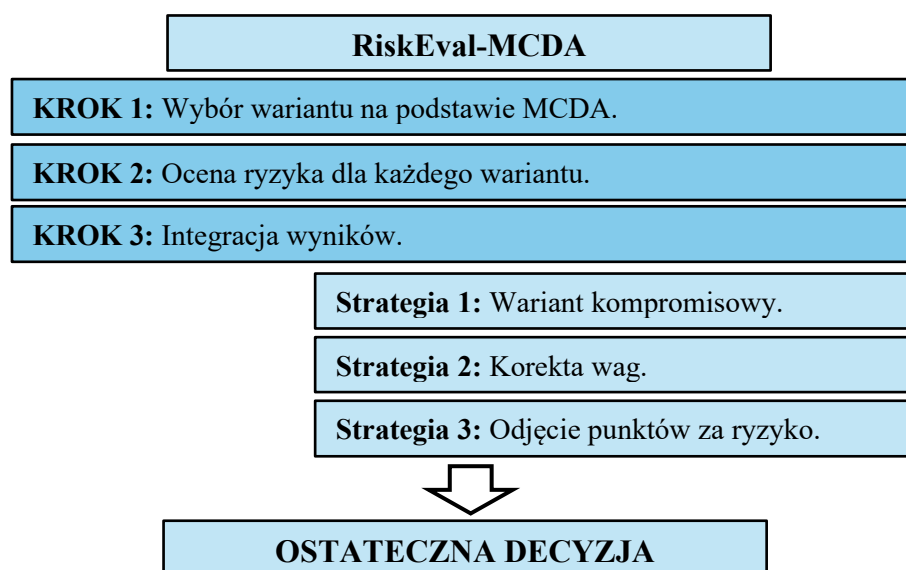
$$IVEI_i = W_1 \cdot MCDA_{norm,i} - W_2 \cdot R_{norm,i} \quad (6)$$

gdzie:

$MCDA_{norm,i}$ – znormalizowana wartość z metody wielokryterialnej (np. MCE, AHP),

$R_{norm,i}$ – znormalizowana średnia wartość ryzyka dla wariantu i ,

W_1, W_2 – wagi przypisane odpowiednio wynikowi z metody wielokryterialnej i ryzyka (przy czym $W_1 + W_2 = 1$) – wagi przypisywane są przez ekspertów/inwestora



Rysunek 6.1 Etapy autorskiej metody „RiskEval-MCDA”.

Źródło: opracowanie własne

W celu lepszego zrozumienia tej metody zdecydowano się zastosować ją do przykładu z rozdziału 4.

6.2 Przykład oceny ryzyka decyzyjnego w MCDA metodą „RiskEval-MCDA”

W rozdziale 4 podjęto próbę wyboru jednej z trzech wariantów przetargowych dla inwestycji drogowej metodą MCE oraz AHP. Wyniki, otrzymane tymi metodami różnią się. W analizie metodą MCE najwyższą ocenę uzyskał wariant 1, zaś w AHP wariant 3. Ostateczne oceny dla MCE oraz AHP zestawiono w tabeli 6.1. W przypadku metody MCE dokonano również normalizacji wartości, aby zastosować je do wzoru 6.

Tabela 6.1 Wyniki z przeprowadzonej analizy wielokryterialnej metodą MCE i AHP.

Wariant	Wynik AHP	Wynik MCE	Znormalizowana wartość MCE
W1	0,2283	792,74	0,3451
W2	0,2787	766,39	0,3337
W3	0,4930	737,82	0,3212

Źródło: opracowanie własne

Warianty były oceniane pod kątem czterech kryteriów głównych (transportowe i komunikacyjne, ekonomiczne, środowiskowe oraz społeczno-planistyczne), a następnie ze względu na 17 wyszczególnionych podkryteriów.

W celu zastosowania autorskiej metody przeprowadzono dodatkowo identyfikację ryzyk potencjalnie towarzyszących wyborowi każdego z analizowanych wariantów. Zestawienie tych ryzyk przedstawiono w tabeli 6.2.

Tabela 6.2 Zidentyfikowane ryzyka dla każdego wariantu inwestycji.

Lp.	Opis ryzyka
Wariant 1	
R1.1	Sprzeciw społeczny (wyburzenia, duża ingerencja w otoczenie).
R1.2	Ryzyko środowiskowe (wycinka drzew, naruszenie obszarów chronionych).
R1.3	Ryzyko prawne (odszkodowania, protesty).
Wariant 2	
R2.1	Ryzyko niskiej efektywności komunikacyjnej (wydłużony czas przejazdu).
R2.2	Ryzyko kosztów eksploatacyjnych w przyszłości.
R2.3	Ryzyko braku akceptacji przez inwestora z uwagi na przeciętność rozwiązania.
Wariant 3	
R3.1	Ryzyko przekroczenia budżetu i braku zgody na finansowanie ze strony inwestora (zbyt wysoki koszt).
R3.2	Ryzyko niskiej efektywności transportowej.
R3.3	Ryzyko opóźnień realizacyjnych (skomplikowana logistyka).

Źródło: opracowanie własne

Następnie dla każdego wariantu i zdefiniowanego ryzyka oceniono prawdopodobieństwo jego wystąpienia i skutek, jaki może przynieść. Zastosowano skalę od 1 do 5 zarówno dla prawdopodobieństwa jak i efektów (1 – oznaczało małe prawdopodobieństwo i mało dotkliwe skutki). Wyniki zestawiono w tabeli 6.3. Zarówno identyfikację jak i ocenę ryzyka dokonano na podstawie konsultacji z ekspertami, jak też kierując się doświadczeniem autora.

Tabela 6.3 Ocena ryzyka dla każdego z trzech wariantów.

Ryzyko	Prawdopodobieństwo (P)	Skutek (S)	Ocena ryzyka ($R = P \times S$)	Średnia ryzyka dla każdego wariantu	Znormalizowana wartość ryzyka
R1.1	4	5	20	20,3333	0,4326
R1.2	5	5	25		
R1.3	4	4	16		
R2.1	4	3	12	9,0000	0,1915
R2.2	3	3	9		
R2.3	2	3	6		
R3.1	5	5	25	17,6667	0,3759
R3.2	4	4	16		
R3.3	3	4	12		

Źródło: opracowanie własne

Z powyższego podsumowania wynika, że największe ryzyko zostało zidentyfikowane dla wariantu 1, który wymaga dużo zmian w środowisku naturalnym i społecznym, zaś najmniejsze dla drugiego rozwiązania, niewymagającego dużych ingerencji w otoczeniu społecznym.

Dysponując wynikami zarówno z analizy wielokryterialnej, jak i oceny ryzyk, konieczne jest dokonanie integracji tych informacji w celu wyboru ostatecznego wariantu inwestycji budowlanej. W przypadku metody AHP najwyższą wartość syntetyczną uzyskał wariant 3, jednak charakteryzuje się on jednocześnie relatywnie wysokim poziomem ryzyka w porównaniu z wariantem 2, który w klasycznej analizie MCDA zajmował pozycję drugą. Z kolei wyniki metody MCE wskazują na przewagę wariantu 1, lecz cechuje się on najwyższym poziomem ryzyka. Taka rozbieżność pomiędzy wynikami MCDA a oceną ryzyka potwierdza konieczność ich łącznego rozpatrywania. W związku z tym zastosowano wzór (6) autorskiej metody dla każdego wariantu. W celu przedstawienia, jak zmieniają się wyniki w zależności od przyjętych współczynników W_1, W_2 przeprowadzono analizę wrażliwości. Wyniki zestawiono w tabeli 6.4 oraz tabeli 6.5, prezentując wpływ różnych kombinacji wag na hierarchię wariantów inwestycyjnych.

Tabela 6.4 Wyniki IVEI dla metody AHP w zależności od współczynników W_1, W_2 .

	Wariant W1	Wariant W2	Wariant W3
Wyniki IVEI dla metody AHP w zależności od współczynników W_1, W_2			
$W_1 = 0,1; W_2 = 0,9$	-0,3665	-0,1445	-0,2890
$W_1 = 0,2; W_2 = 0,8$	-0,3004	-0,0975	-0,2021
$W_1 = 0,3; W_2 = 0,7$	-0,2343	-0,0504	-0,1152
$W_1 = 0,4; W_2 = 0,6$	-0,1683	-0,0034	-0,0283
$W_1 = 0,5; W_2 = 0,5$	-0,1022	0,0436	0,0586
$W_1 = 0,6; W_2 = 0,4$	-0,0361	0,0906	0,1454

c.d Tabeli 6.4

	Wariant W1	Wariant W2	Wariant W3
Wyniki IVEI dla metody AHP w zależności od współczynników W_1, W_2			
$W_1 = 0,1; W_2 = 0,9$	-0,3665	-0,1445	-0,2890
$W_1 = 0,7; W_2 = 0,3$	0,0300	0,1376	0,2323
$W_1 = 0,8; W_2 = 0,2$	0,0961	0,1847	0,3192
$W_1 = 0,9; W_2 = 0,1$	0,1622	0,2317	0,4061
$W_1 = 1,0; W_2 = 0,0$	0,2283	0,2787	0,4930

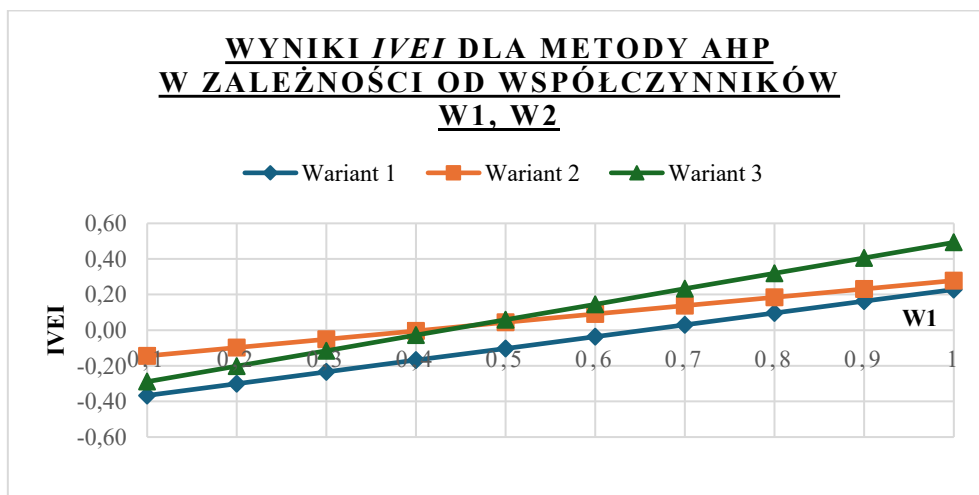
Źródło: opracowanie własne

Tabela 6.5 Wyniki IVEI dla metody MCE w zależności od współczynników W_1, W_2 .

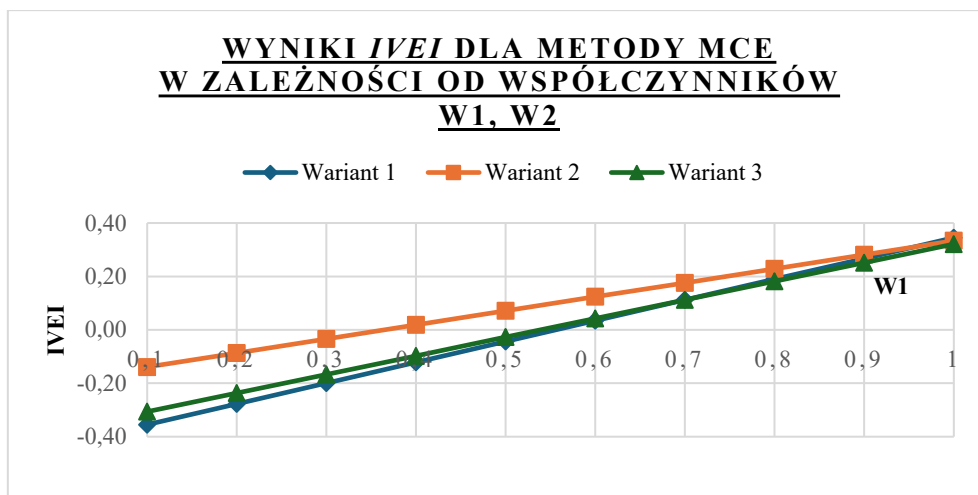
	Wariant W1	Wariant W2	Wariant W3
Wyniki IVEI dla metody MCE w zależności od współczynników W_1, W_2			
$W_1 = 0,1; W_2 = 0,9$	-0,3548	-0,1390	-0,3062
$W_1 = 0,2; W_2 = 0,8$	-0,2771	-0,0865	-0,2365
$W_1 = 0,3; W_2 = 0,7$	-0,1993	-0,0339	-0,1668
$W_1 = 0,4; W_2 = 0,6$	-0,1215	0,0186	-0,0970
$W_1 = 0,5; W_2 = 0,5$	-0,0437	0,0711	-0,0273
$W_1 = 0,6; W_2 = 0,4$	0,0340	0,1236	0,0424
$W_1 = 0,7; W_2 = 0,3$	0,1118	0,1761	0,1121
$W_1 = 0,8; W_2 = 0,2$	0,1896	0,2286	0,1818
$W_1 = 0,9; W_2 = 0,1$	0,2674	0,2811	0,2515
$W_1 = 1,0; W_2 = 0,0$	0,3451	0,3337	0,3212

Źródło: opracowanie własne

W celu zobrazowania jak przedstawiają się wyniki pokazano je na wykresach 6.2, 6.3.

**Rysunek 6.2** Wyniki IVEI dla metody AHP w zależności od współczynników W_1, W_2 .

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 6.3 Wyniki IVEI dla metody MCE w zależności od współczynników W_1, W_2 .

Źródło: opracowanie własne

Patrząc na powyższe wykresy widać, że dla niskich wartości współczynnika W_1 , (bardzo duży nacisk na ryzyko) wszystkie warianty inwestycji osiągają ujemne wartości IVEI. Wraz ze wzrostem W_1 , wartości IVEI również rosną. W przypadku analizy metodą AHP wariant 3 zaczyna dominować dla $W_1 > 0,5$. Natomiast wariant 2 osiąga wartości dodatnie już przy $W_1 \approx 0,4$, co czyni go kompromisowym wyborem. Natomiast dla metody MCE ciekawym spostrzeżeniem jest to, że wariant W1 (najlepszy w MCE) dominuje przy $W_1 > 0,6$ – jego wysoki poziom ryzyka powoduje, że jest opłacalny tylko przy dużym nacisku na efektywność (wysokie W_1). Wariant W2 ponownie okazuje się najbardziej stabilny – jego IVEI rośnie równomiernie i osiąga dodatnie wartości już przy $W_1 \approx 0,4$. Wariant W3 ma tu najniższe wartości IVEI w całym zakresie, co wynika z niskiej oceny MCE i umiarkowanego ryzyka.

6.2.1 Wnioski dotyczące zastosowanej metody

Przeprowadzona analiza metodą „RiskEval-MCDA” pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- połączenie klasycznej analizy wielokryterialnej (MCDA) z oceną ryzyka decyzyjnego daje możliwość bardziej kompleksowego i realistycznego podejścia do podejmowania decyzji inwestycyjnych,
- dzięki uwzględnieniu ryzyka, autorska metoda pozwala zminimalizować skutki wyboru wariantu, który mimo wysokiej oceny może być obciążony dużym ryzykiem,
- przeprowadzona analiza wrażliwości pokazała, że zmiana wag W_1, W_2 wpływa również na wybór wariantu, co umożliwia dostosowanie decyzji do preferencji inwestora lub kontekstu inwestycji,

- wariant 2 okazał się najbardziej stabilny – osiągał dodatnie wartości IVEI już przy umiarkowanych wagach, co czyni go dobrym wyborem kompromisowym,
- wykresy IVEI pozwoliły na czytelne przedstawienie wpływu ryzyka na wartość decyzyjną i ułatwiły interpretację wyników.

Powyższa autorska metoda może znaleźć praktyczne zastosowanie w rzeczywistych procesach inwestycyjnych. Z przeprowadzonych analiz wynika, że klasyczne metody MCDA nie zawsze są wystarczające do uzyskania stabilnych i w pełni wiarygodnych wyników. W wielu przypadkach nieuwzględnienie komponentu ryzyka prowadzi do zniekształcenia wyników analizy oraz może skutkować wyborem wariantu pozornie korzystnego, lecz obciążonego wysokim prawdopodobieństwem wystąpienia niepożądanych konsekwencji.

6.3 Rozszerzenie opracowanej metody

W ramach walidacji metody „RiskEval-MCDA” wykazano, że jest ona przydatna w ocenie ryzyka decyzyjnego przy wyborze wariantu inwestycji budowlanej. Jednak po głębszej analizie zauważono, że może ona podlegać dalszym udoskonaleniom. Dotychczasowa wersja koncentruje się na ilościowej i jakościowej ocenie poszczególnych ryzyk, jednak nie uwzględnia liczby ryzyk przypisanych do danego wariantu. Z każdą opcją wyboru wiąże się indywidualna analiza ryzyka, różna liczba możliwych zagrożeń. W praktyce inwestycyjnej może okazać się, że wariant o pozornie niskim jego poziomie R ($R = P \times S$), jest obciążony dużą liczbą ryzyk, które w dłuższej perspektywie mogą mieć wpływ na powodzenie projektu. Zatem liczba ryzyk, częstość ich występowania, stały się inspiracją do zaproponowania rozszerzenia metody „RiskEval-MCDA” o wskaźnik liczby ryzyk, który określono jako RCI (ang. *Risk Count Index*). Wyrażono go za pomocą wzoru 7:

$$RCI_i = \frac{n_r}{n_{max}} \quad (7)$$

gdzie:

n_r – liczba ryzyk przypisanych do danego wariantu,

n_{max} – maksymalna liczba ryzyk spośród wszystkich dostępnych opcji wyboru.

Zgodnie z powyższym wzorem wskaźnik RCI może przyjmować wartości z przedziału od 0 do 1, przy czym 1 oznacza wariant o największej liczbie ryzyk, a wyniki bliższe 0 – rozwiązania mniej obciążone zagrożeniami (pod względem liczby). Wskaźnik RCI zastosowano jako współczynnik korygujący końcowy wynik metody „RiskEval-MCDA” – $IVEI$ – w sposób opisany wzorem 8:

$$IVEI_{iA} = IVEI_i - \alpha \cdot RCI_i \quad (8)$$

gdzie:

$IVEI_{iA}$ – skorygowany wynik metody „RiskEval-MCDA”,

$IVEI_i$ – początkowy wskaźnik zintegrowanej oceny wariantu inwestycji (z metody „RiskEval-MCDA”),

α – współczynnik ważności równy 0,3 (wartość przyjęta eksperymentalnie).

W powyższym wzorze współczynnik ważności α odgrywa rolę regulatora liczby ryzyk. Jego wielkość dobrano empirycznie po przeprowadzeniu kolejnych prób obliczeniowych, testowaniu wpływu jego zmian na ranking wyników końcowych.

W podrozdziale 6.2 autor zidentyfikował jedynie po 3 ryzyka dla każdego wariantu – było to działanie zamierzone, gdyż skupiono się na wstępnym porównaniu wariantów pod kątem ryzyka oraz na pokazaniu samej istoty metody w celu szybkiej oceny. W dalszej części pracy dokonano szczegółowej identyfikacji ryzyk. Została ona przeprowadzona podczas zorganizowanego spotkania z ekspertami – 57 osób, którzy byli respondentami w ocenie wariantów (rozdział 4). Zestawienie tej rozszerzonej listy ryzyk przedstawiono w tabeli 6.6.

Tabela 6.6 Zidentyfikowane ryzyka dla każdego wariantu inwestycji.

Lp.	Opis ryzyka
Wariant 1	
R1.1	Ryzyko protestów społecznych (np. odwołania od decyzji administracyjnych).
R1.2	Ryzyko pogorszenia jakości życia mieszkańców.
R1.3	Ryzyko naruszenia obszarów chronionych.
R1.4	Ryzyko wycinki drzew i ingerencji w siedliska zwierząt.
R1.5	Ryzyko zanieczyszczenia wód gruntowych podczas budowy.
R1.6	Ryzyko zwiększenia hałasu i emisji zanieczyszczeń na etapie eksploatacji.
R1.7	Ryzyko błędów projektowych z uwagi na ograniczenia środowiskowe, terenowe (projektanci powinni uwzględniać wiele ograniczeń ze względu na tereny chronione).
Wariant 2	
R2.1	Ryzyko niskiej efektywności komunikacyjnej (wydłużony czas przejazdu).
R2.2	Ryzyko przeciętnej jakości wykonania (np. brak innowacyjnych rozwiązań).
R2.3	Ryzyko dodatkowych kosztów eksploatacyjnych w przyszłości.
R2.4	Ryzyko konieczności kompensacji przyrodniczej mimo neutralności (np. ingerencja w tereny zielone).
R2.5	Ryzyko nieefektywnego wykorzystania przestrzeni.
R2.6	Ryzyko braku akceptacji przez inwestora z uwagi na przeciętność rozwiązania.
R2.7	Ryzyko trudności w uzyskaniu dofinansowania z funduszy zewnętrznych (jeśli wariant nie spełnia kryteriów innowacyjności).

c.d Tabeli 6.4

Lp.	Opis ryzyka
Wariant 2	
R2.7	Ryzyko trudności w uzyskaniu dofinansowania z funduszy zewnętrznych (jeśli wariant nie spełnia kryteriów innowacyjności).
R2.8	Ryzyko braku akceptacji społecznej ze względu na „przeciętność” efektów.
R2.9	Ryzyko braku poprawy jakości życia mieszkańców.
Wariant 3	
R3.1	Ryzyko przekroczenia budżetu (zbyt wysoki koszt).
R3.2	Ryzyko braku finansowania ze środków publicznych.
R3.3	Ryzyko niskiej efektywności transportowej.
R3.4	Ryzyko niezadowolenia przyszłych użytkowników z funkcjonalności rozwiązania (np. dłuższy czas przejazdu, brak bezpośrednich połączeń).
R3.5	Ryzyko opóźnień realizacyjnych (skomplikowana logistyka, procedury wykonawcze).
R3.6	Ryzyko złożoności technologicznej (np. zastosowanie nowoczesnych, trudnodostępnych rozwiązań).

Źródło: opracowanie własne

Jak widać w powyższej tabeli dla każdego z wariantów W1, W2 oraz W3 zidentyfikowano inną liczbę ryzyk – odpowiednio 7, 9 i 6 ryzyk. Z punktu widzenia praktyki inżynierskiej oraz zarządzania projektami budowlanymi, liczba ryzyk jest równie istotna jak ich intensywność. Wariant inwestycyjny obciążony wieloma ryzykami – nawet jeśli każde z nich ma relatywnie niską wartość – może w dłuższej perspektywie generować poważne trudności organizacyjne, finansowe, środowiskowe czy społeczne. W związku z powyższym takie rozszerzone podejście zostanie uwzględnione w dalszym opracowaniu.

Najpierw 57 ekspertów oceniło prawdopodobieństwo wystąpienia każdego ryzyka i skutek, jaki może przynieść. Zastosowano skalę od 1 do 5 zarówno dla prawdopodobieństwa jak i efektów (1 – oznacza małe prawdopodobieństwo i mało dotkliwe skutki). Na tej podstawie autor dokonał podsumowania poprzez obliczenie średniej arytmetycznej każdej wartości oraz finalnie – znormalizowanej wartości ryzyka. Wyniki zestawiono w tabeli 6.7.

Tabela 6.7 Ocena ryzyka dla każdego z trzech wariantów.

Ryzyko	Prawdopodobieństwo (P)	Skutek (S)	Ocena ryzyka ($R = P \times S$)	Średnia ryzyka dla każdego wariantu	Znormalizowana wartość ryzyka
R1.1	4	5	20	14,8571	0,4432
R1.2	2	4	8		
R1.3	4	4	16		
R1.4	5	4	20		
R1.5	4	4	16		
R1.6	4	4	16		
R1.7	2	4	8		
R2.1	4	3	12	7,6667	0,2287
R2.2	2	4	8		
R2.3	3	3	9		
R2.4	1	2	2		
R2.5	2	2	4		
R2.6	2	2	4		
R2.7	4	3	12		
R2.8	4	3	12		
R2.9	2	3	6		
R3.1	4	4	16	11,0000	0,3281
R3.2	2	3	6		
R3.3	4	3	12		
R3.4	4	2	8		
R3.5	3	3	9		
R3.6	5	3	15		

Źródło: opracowanie własne

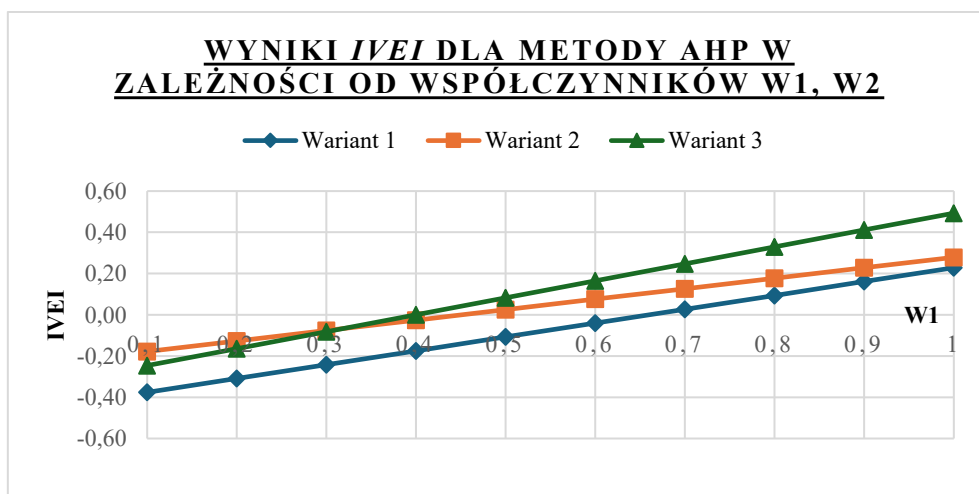
W tym zestawieniu, podobnie jak w poprzednim przykładzie w tabeli 6.3, największy poziom ryzyka jest powiązany z pierwszym wariantem, zaś najmniejszy z drugim wariantem.

W dalszym postępowaniu ponownie obliczono wartości IVEI dla metody AHP i MCE w zależności od współczynników W_1 , W_2 , tym razem uwzględniając znormalizowane wartości ryzyka z tabeli 6.6. Różnice w obydwu przykładach są niewielkie, jednak zdecydowano się dokonać pełnej analizy również dla tego zestawienia, aby dokładnie prześledzić zmiany, jakie zachodzą przy zastosowaniu metody pierwotnej „RiskEval-MCDA” oraz zmodyfikowanej przy zastosowaniu wskaźnika RCI . Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 6.8 oraz zobrazowano na rysunkach 6.4, 6.5.

Tabela 6.8 Wyniki *IVEI* dla metody AHP i MCE w zależności od współczynników W_1, W_2 .

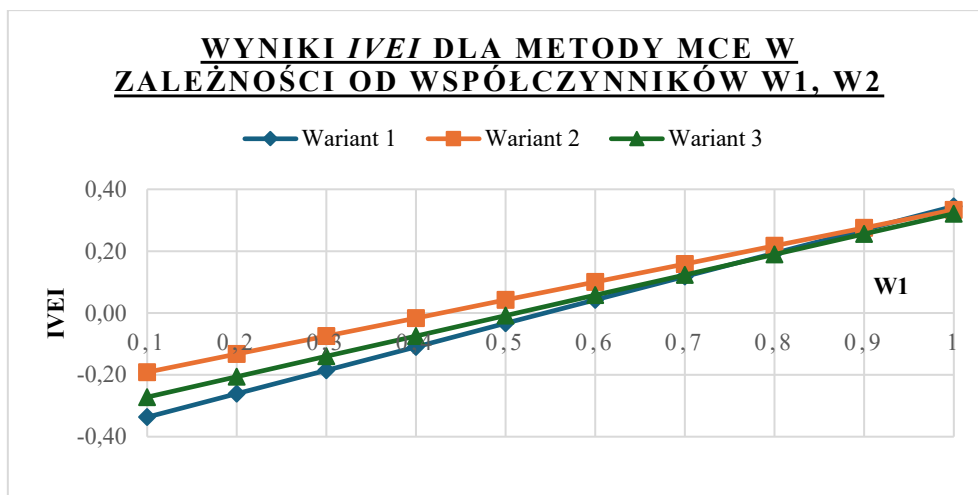
	Wariant W1	Wariant W2	Wariant W3
Wyniki <i>IVEI</i> dla metody AHP w zależności od współczynników W_1, W_2			
$W_1 = 0,1; W_2 = 0,9$	-0,3761	-0,1780	-0,2460
$W_1 = 0,2; W_2 = 0,8$	-0,3089	-0,1272	-0,1639
$W_1 = 0,3; W_2 = 0,7$	-0,2418	-0,0765	-0,0818
$W_1 = 0,4; W_2 = 0,6$	-0,1746	-0,0257	0,0003
$W_1 = 0,5; W_2 = 0,5$	-0,1075	0,0250	0,0825
$W_1 = 0,6; W_2 = 0,4$	-0,0403	0,0757	0,1646
$W_1 = 0,7; W_2 = 0,3$	0,0269	0,1265	0,2467
$W_1 = 0,8; W_2 = 0,2$	0,0940	0,1772	0,3288
$W_1 = 0,9; W_2 = 0,1$	0,1612	0,2280	0,4109
$W_1 = 1,0; W_2 = 0,0$	0,2283	0,2787	0,4930
Wyniki <i>IVEI</i> dla metody MCE w zależności od współczynników W_1, W_2			
$W_1 = 0,1; W_2 = 0,9$	-0,3644	-0,1725	-0,2632
$W_1 = 0,2; W_2 = 0,8$	-0,2855	-0,1162	-0,1982
$W_1 = 0,3; W_2 = 0,7$	-0,2067	-0,0600	-0,1333
$W_1 = 0,4; W_2 = 0,6$	-0,1279	-0,0037	-0,0684
$W_1 = 0,5; W_2 = 0,5$	-0,0491	0,0525	-0,0035
$W_1 = 0,6; W_2 = 0,4$	0,0298	0,1087	0,0615
$W_1 = 0,7; W_2 = 0,3$	0,1086	0,1650	0,1264
$W_1 = 0,8; W_2 = 0,2$	0,1874	0,2212	0,1913
$W_1 = 0,9; W_2 = 0,1$	0,2663	0,2775	0,2563
$W_1 = 1,0; W_2 = 0,0$	0,3451	0,3337	0,3212

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 6.4 Wyniki *IVEI* dla metody AHP w zależności od współczynników W_1, W_2 .

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 6.5 Wyniki $IVEI$ dla metody MCE w zależności od współczynników W_1, W_2 .
Źródło: opracowanie własne

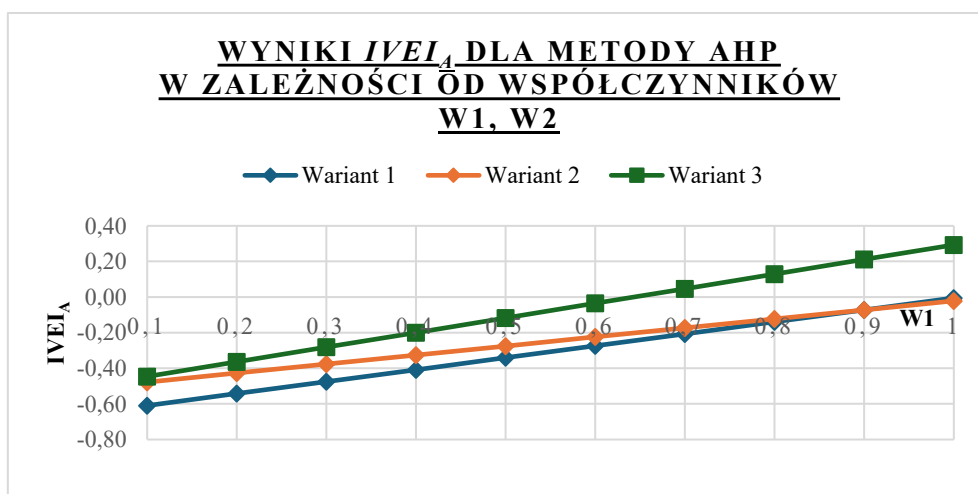
Charakter obydwu wykresów pozostał bardzo zbliżony do tych z poprzedniego rozdziału.

W kolejnym kroku zastosowano rozszerzone podejście. Najpierw wyznaczono wskaźnik RCI dla każdego wariantu (tabela 6.9), a następnie wyznaczono $IVEI_{IA}$. Wyniki zaprezentowano w tabeli 6.10 oraz na rysunkach 6.6, 6.7.

Tabela 6.9 Wskaźnik liczby ryzyk RCI .

Wskaźnik liczby ryzyk RCI			
	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
n_r	7	9	6
n_{max}	9	9	9
RCI	0,78	1,00	0,67

Źródło: opracowanie własne

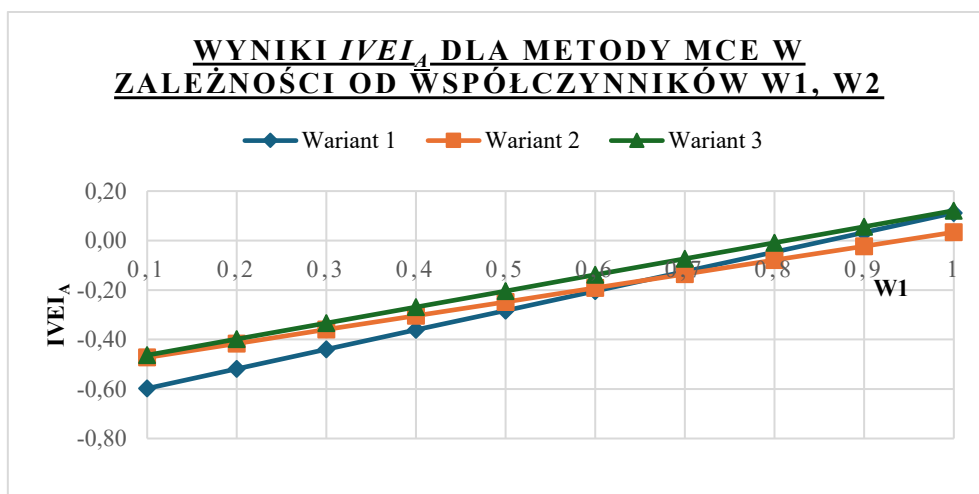


Rysunek 6.6 Wyniki $IVEI_A$ dla metody AHP w zależności od współczynników W_1, W_2 .
Źródło: opracowanie własne

Tabela 6.10 Wyniki $IVEI_A$ dla metody AHP i MCE w zależności od współczynników W_1, W_2 .

	Wariant W1	Wariant W2	Wariant W3
Wyniki $IVEI_A$ dla metody AHP w zależności od współczynników W_1, W_2			
$W_1 = 0,1; W_2 = 0,9$	-0,6094	-0,4780	-0,4460
$W_1 = 0,2; W_2 = 0,8$	-0,5422	-0,4272	-0,3639
$W_1 = 0,3; W_2 = 0,7$	-0,4751	-0,3765	-0,2818
$W_1 = 0,4; W_2 = 0,6$	-0,4079	-0,3257	-0,1997
$W_1 = 0,5; W_2 = 0,5$	-0,3408	-0,2750	-0,1176
$W_1 = 0,6; W_2 = 0,4$	-0,2736	-0,2243	-0,0354
$W_1 = 0,7; W_2 = 0,3$	-0,2065	-0,1735	0,0467
$W_1 = 0,8; W_2 = 0,2$	-0,1393	-0,1228	0,1288
$W_1 = 0,9; W_2 = 0,1$	-0,0722	-0,0720	0,2109
$W_1 = 1,0; W_2 = 0,0$	-0,0050	-0,0213	0,2930
Wyniki $IVEI_A$ dla metody MCE w zależności od współczynników W_1, W_2			
$W_1 = 0,1; W_2 = 0,9$	-0,5977	-0,4725	-0,4632
$W_1 = 0,2; W_2 = 0,8$	-0,5189	-0,4162	-0,3982
$W_1 = 0,3; W_2 = 0,7$	-0,4400	-0,3600	-0,3333
$W_1 = 0,4; W_2 = 0,6$	-0,3612	-0,3037	-0,2684
$W_1 = 0,5; W_2 = 0,5$	-0,2824	-0,2475	-0,2035
$W_1 = 0,6; W_2 = 0,4$	-0,2036	-0,1913	-0,1385
$W_1 = 0,7; W_2 = 0,3$	-0,1247	-0,1350	-0,0736
$W_1 = 0,8; W_2 = 0,2$	-0,0459	-0,0788	-0,0087
$W_1 = 0,9; W_2 = 0,1$	0,0329	-0,0225	0,0563
$W_1 = 1,0; W_2 = 0,0$	0,1118	0,0337	0,1212

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 6.7 Wyniki $IVEI_A$ dla metody MCE w zależności od współczynników W_1, W_2 .

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie wyników w tabeli 6.10 oraz jej reprezentacji graficznej – rysunek 6.6 oraz rysunek 6.7, warto zauważyć, że bez względu na wartość przyjętych współczynników W_1, W_2

oraz dla obydwu metod analizy wielokryterialnej – AHP i MCE – zwycięski okazuje się wariant 3. Jest to bardzo ciekawe spostrzeżenie, gdyż w ten sposób ewidentnie klaruje się sytuacja wyboru wariantu projektu budowy odcinka drogi.

6.3.1 Wnioski dotyczące rozszerzonej metody

W wyniku przeprowadzonych analiz wykazano, że klasyczne podejście do oceny ryzyka, oparte na iloczynie prawdopodobieństwa i skutków ($P \cdot S$), nie uwzględnia liczby ryzyk, co może prowadzić do niedoszacowania zagrożeń w przypadku bardziej złożonych wariantów inwestycyjnych. Według autora wprowadzenie wskaźnika *RCI* umożliwiło uwzględnienie złożoności i podatności inwestycji na kumulację ryzyk, co wpłynęło na końcową ocenę wariantów. Ta metoda może ułatwić planowanie działań prewencyjnych oraz opracowanie scenariuszy awaryjnych. Na podstawie przykładu z podrozdziału 6.3 nasuwa się wniosek, że zastosowanie wskaźnika *RCI* zwiększa transparentność analizy, umożliwia lepsze zarządzanie ryzykiem oraz pozwala na bardziej realistyczną ocenę wariantów inwestycyjnych. Poprzez zastosowanie dodatkowego wskaźnika metoda autorska staje się narzędziem bardziej kompleksowym, uwzględniającym zarówno efektywność decyzyjną, jak i szerze spektrum zagrożeń.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Nawiązując do postawionego celu dysertacji, który obejmował włączenie oceny ryzyka do procesu analizy wielokryterialnej w ocenach wariantów inwestycji budowlanych, można stwierdzić, że został on osiągnięty.

Na podstawie przeprowadzonych rozważań, analiz oraz badań empirycznych zawartych w niniejszej pracy można uznać, że stosowane powszechnie metody wspomagające wybór wariantu projektu budowlanego mogą prowadzić do błędnych decyzji, a zaproponowana metodyka uwzględnienia ryzyka towarzyszącego temu działaniu może poprawić efektywność procesu decyzyjnego. Klasyczne metody MCDA, mimo skuteczności w porządkowaniu wariantów według wielu kryteriów, nie uwzględniają ryzyka w sposób kompleksowy. W rezultacie mogą prowadzić do wyboru wariantu, który – mimo wysokiej oceny wielokryterialnej – jest obciążony wysokim ryzykiem. Praca ukazuje złożoność procesu decyzyjnego w budownictwie.

Poniżej przedstawiono najważniejsze rezultaty niniejszej pracy:

1. Przeprowadzono analizę ryzyka, związanego z projektowaniem konstrukcji budowlanych, z uwzględnieniem poszczególnych etapów (od identyfikacji ryzyk, poprzez ich ocenę, aż do działań naprawczych). Zidentyfikowano i sklasyfikowano ryzyka występujące w procesie projektowania konstrukcji budowlanych, dzieląc je na ryzyka organizacyjne i projektowe. Przeprowadzono badania ankietowe wśród projektantów konstrukcji, co pozwoliło na ocenę istotności poszczególnych ryzyk oraz ich wpływu na jakość i bezpieczeństwo decyzji projektowych. Stało się to inspiracją do dalszych rozważań nad integracją ryzyka z metodami wielokryterialnymi.
2. Wykonano badanie własne metodami wielokryterialnymi dotyczące wyboru wariantu budowy odcinka drogi. Szczególną uwagę zwrócono na proces przygotowania danych wejściowych do dalszej analizy. Stwierdzono, że etap przygotowania badań, dobór wag, metod opracowania danych i różnice w podejściu ekspertów mają znaczny wpływ na dalsze wyniki. W praktyce występuje bardzo dużo metod, którymi można przeprowadzać analizy wielokryterialne, ale pojawia się pytanie, która z nich jest najskuteczniejsza? W pracy poddano ocenie warianty inwestycji drogowej metodami AHP i MCE. Okazało się, że każda z nich dała różne rezultaty, a same analizy były złożone, czasochłonne i pracochłonne. To skłoniło autora do wniosku, że wybór wariantu wiąże się z ryzykiem decyzyjnym, które nie jest w pełni uwzględnione przez metody wielokryterialne. Przy podejmowaniu decyzji należy zatem uwzględniać nie tylko ocenę wariantów, ale również

możliwość wystąpienia negatywnych skutków, co stanowi potwierdzenie postawionej tezy.

3. Rozszerzono klasyczną analizę wielokryterialną o komponent ryzyka, przedstawiając autorską metodę „RiskEval-MCDA”, łączącą te dwa aspekty w jeden spójny model decyzyjny. Zastosowano ją w praktycznym przykładzie oceny trzech wariantów inwestycji drogowej. Wyniki wykazały, że warianty uznawane za korzystne w klasycznej analizie MCDA mogą być jednocześnie obarczone wysokim ryzykiem.
4. Jednym z elementów metody autorskiej jest graficzne przedstawienie wyników, co pozwala na czytelną interpretację wpływu ryzyka na wartość decyzyjną.
5. Wprowadzono modyfikację metody autorskiej poprzez zastosowanie dodatkowego wskaźnika *RCI*, uwzględniającego liczbę ryzyk. Dzięki temu możliwe było bardziej kompleksowe podejście do oceny ryzyka decyzyjnego, co wpłynęło na zmianę hierarchii ocenianych wariantów i pozwoliło na wskazanie rozwiązania najbezpieczniejszego.

Zastosowanie opracowanej metodyki może przyczynić się do poprawy jakości decyzji inwestycyjnych, zwiększenia bezpieczeństwa realizacji projektów oraz optymalizacji procesów planistycznych. Może być ona z powodzeniem stosowana w praktyce projektowej, przetargowej i planistycznej, szczególnie w projektach o podwyższonym poziomie ryzyka.

8. Kierunki dalszych prac

W oparciu o przeprowadzone analizy, wdrożenie autorskiej metody oraz jej rozszerzenie o wskaźnik *RCI*, wskazuje się następujące kierunki prac:

1. Dotychczasowe badania metodami autorskimi koncentrowały się na drogowych inwestycjach budowlanych. Zdaniem autora warto rozszerzyć je do innych obiektów: kubaturowych, budowli ochronnych (szczególnie istotne w obecnych czasach – duży nacisk kładzie się na ich rozwój, a charakteryzują się wysokim poziomem złożoności decyzyjnej oraz szczególnym profilem ryzyka).
2. Autorską metodę można dalej modyfikować, uwzględnić w niej również inne czynniki. Warto rozważyć, czy wszystkie ryzyka brać pod uwagę przy ocenie, a może jedynie te o największej istotności, przekraczające określony próg.
3. W celu zwiększenia dostępności metody w praktyce inżynierskiej warto opracować nowe narzędzia obliczeniowe, algorytmy, które przyspieszą i zautomatyzują proces podejmowania decyzji i oceny ryzyka.
4. Zaproponowana metoda powinna zostać dodatkowo walidowana na większej liczbie przykładów, co powinno objąć różnorodne typy inwestycji. Również dobrze byłoby podjąć współpracę z otoczeniem gospodarczym i przeprowadzić takie badania kompleksowo na wielu praktycznych obiektach, które następnie zostaną poddane weryfikacji.
5. W dalszych planach badawczych jest stworzenie nowoczesnego narzędzia – bazy danych, która pomoże ocenić ryzyko związane z różnymi wariantami inwestycji budowlanych i tym samym wspierać podejmowanie trafnych decyzji. Taka baza danych może stać się praktycznym narzędziem dla inwestorów, deweloperów i administracji publicznej.
6. Opracowanie intuicyjnej aplikacji komputerowej, integrującej moduły analizy wielokryterialnej i oceny ryzyka. Takie narzędzie ułatwiłoby praktyczne wdrażanie metody „RiskEval-MCDA”, automatyzując obliczenia, wspomagając interpretację wyników oraz zapewniając przejrzystą prezentację rekomendacji decyzyjnych.

Powyższe zagadnienia będą przedmiotem dalszych prac badawczych autora, co świadczy o potencjale rozwojowym poruszonych zagadnień i ich dużym znaczeniu w praktyce budowlanej.

LITERATURA

- [1] Adedokun, O. A., Ogunsemi, D. R., Aje, I. O., Awodele, O. A., & Dairo, D. O. (2013). Evaluation of qualitative risk analysis techniques in selected large construction companies in Nigeria. *Journal of Facilities Management*, 11(2), 123–135.
<https://doi.org/10.1108/14725961311314615>.
- [2] Akadiri, P. O., Olomolaiye, P. O., & Chinyio, E. A. (2013). Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects. *Automation in Construction*, 30, 113–125. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2012.10.004>.
- [3] Arrow, K. J. (1951). *Social Choice and Individual Values*. Yale University Press.
- [4] Assaf, M., Hussein, M., Abdelkhalek, S., & Zayed, T. (2023). A Multi-Criteria Decision-Making Model for Selecting the Best Project Delivery Systems for Offsite Construction Projects. *Buildings*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/buildings13020571>.
- [5] Baloi, D., & Price, A. D. F. (2003). Modelling global risk factors affecting construction cost performance. *International Journal of Project Management*, 21(4), 261–269.
[https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00017-0).
- [6] Banaitiene, N., & Banaitis, A. (2012). Risk Management in Construction Projects. W N. Banaitiene (Red.), *Risk Management* (19). IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/51460>.
- [7] Beliakov, G., & Warren, J. (2001). Appropriate choice of aggregation operators in fuzzy decision support systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(6), 773–784.
<https://doi.org/10.1109/91.971696>.
- [8] Bodin L., & Gass S.I. (2003). On teaching the analytic hierarchy process. W *Computers & Operations Research* (T. 30). www.sciencedirect.comwww.elsevier.com/locate/dsw.
- [9] Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). W *Science* (T. 31, Nr 6).
<https://www.jstor.org/stable/2631441>.
- [10] Broniewicz, E., & Dziurdzikowska, E. (2017). Metody wielokryterialne w równoważeniu procesów społeczno-gospodarczych. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, 491, 53–62.
- [11] Broniewicz, E., & Ogrodnik, K. (2021). A comparative evaluation of multi-criteria analysis methods for sustainable transport. *Energies*, 14(16).
<https://doi.org/10.3390/en14165100>.

- [12] Bucoń, R., & Sobotka, A. (2015). Decision-making model for choosing residential building repair variants. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(7), 893–901. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.895411>.
- [13] Bucoń, R., & Tomczak, M. (2018). Decision-making model supporting the process of planning expenditures for residential building renovation. *Technological and Economic Development of Economy*, 24(3), 1200–1214. <https://doi.org/10.3846/20294913.2016.1213208>.
- [14] Budescu, D. V., & Rantilla, A. K. (2000). Confidence in aggregation of expert opinions. *Acta Psychologica*, 104(3), 371–398. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(00\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(00)00037-8).
- [15] Chen, C. H. (2021). A hybrid multi-criteria decision-making approach based on anp-entropy topsis for building materials supplier selection. *Entropy*, 23(12). <https://doi.org/10.3390/e23121597>.
- [16] Cheng, W., Hu, M., & Wu, C. (2025). Enhancing green building decision-making with a hybrid fuzzy AHP-TOPSIS model for material selection. *Applied Water Science*, 15(6). <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02481-7>.
- [17] Dean, M. (2022). *A Practical Guide to Multi-Criteria Analysis*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15007.02722>.
- [18] del Caño Gochi, A., & Cruz, M. (2002). Integrated Methodology for Project Risk Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:6\(473\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:6(473)).
- [19] Destercke, S., Dubois, D., & Chojnacki, E. (2009). Possibilistic information fusion using maximal coherent subsets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17(1), 79–92. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2008.2005731>.
- [20] Deszcz, J. (2019). *Przedsięwzięcia budowlane: Uczestnicy i ich decyzje*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [21] Dytczak, M. (2010). *Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych*. Oficyna Wydawnicza Politechnika Opolska.
- [22] Dytczak, M., & Ginda, G. (2015). Miejsce metody DEMATEL w rozwiązywaniu złożonych zadań decyzyjnych. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Bankowej we Wrocławiu*, 15(5), 631–644.
- [23] Dytczak, M., Ginda, G., Gotowała, B., & Szklennik, N. (2011). Potencjał aplikacyjny metody DEMATEL i jej rozszerzeń w budownictwie. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, (2), 235–240.

- [24] Dytczak, M., Ginda, G., & Jastrząbek, B. (2010). Rozmyte programowanie liniowe we wspomaganiu decyzji w budownictwie, gospodarce przestrzennej i komunalnej. *Komputerowo zintegrowane zarządzanie, I*, 377–386.
- [25] Dytczak, M., Ginda, G., & Kwiesielewicz, M. (2010). Wybrane narzędzia grupowego wspomagania decyzji w zarządzaniu miastem. *Materiały z konferencji KZZ*.
- [26] Dziadosz, A. (2008). Ocena i selekcja inwestycji budowlanych z wykorzystaniem analitycznego procesu hierarchicznego (AHP). *Czasopismo Techniczne. Budownictwo*, 41–51. <https://www.researchgate.net/publication/27646788>.
- [27] Dziadosz, A. (2010a). *Przegląd wybranych metod wspomagających analizę ryzyka przedsięwzięć budowlanych*. <https://www.researchgate.net/publication/321748860>.
- [28] Dziadosz, A. (2010b). Przegląd wybranych metod wspomagających analizę ryzyka przedsięwzięć budowlanych. *Przegląd Budowlany*, 81, 76–80.
- [29] El-Abbasy, A. A. A. (2025). Artificial intelligence-driven predictive modeling in civil engineering: a comprehensive review. W *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00166-5>.
- [30] *Eurokod 0 - PN-EN 1990 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji*. (2004).
- [31] Finan, J. S., & Hurley, W. J. (1997). The analytic hierarchy process: Does adjusting a pairwise comparison matrix to improve the consistency ratio help? *Computers & Operations Research*, 24(8), 749–755. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(96\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(96)00090-1).
- [32] Flanagan, R., & Norman, G. (1993). *Risk Management and Construction*. Wiley-Blackwell.
- [33] Florek-Paszkowska A., & Cymanow P. (2012). Zarządzanie produkcją z wykorzystania metod AHP/ANP. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13, 1–35.
- [34] Frank, H. F. (2006). Project risk management. W *OCLC Systems and Services* (T. 22, Nr 4, s. 256–262). <https://doi.org/10.1108/10650750610706970>.
- [35] Gajzler, M., Dziadosz, A., & Szymański, P. (2010). Problemy wyboru metody wspomagającej podejmowanie decyzji w budownictwie. *Budownictwo. Czasopismo techniczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, 2, 71–84.
- [36] Gawin D., & Woźniak P. (2017). Wielokryterialna optymalizacja zużycia energii na chłodzenie w budynkach wielkopowierzchniowych. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. <https://doi.org/10.7862/rb.2017.1>.

- [37] Gicala, M., & Sobotka, A. (2017). The analysis of construction and material solutions, taking into account the requirements of sustainable development. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 26(2), 159–170.
<https://doi.org/10.22630/PNIKS.2017.26.2.14>.
- [38] Gładysz, B., Skorupka, D., Kuchta, D., & Duchaczek, A. (2015). Project Risk time Management - A Proposed Model and a Case Study in the Construction Industry. *Procedia Computer Science*, 64, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.459>.
- [39] Górecki, J. (2018). *Big Data as a Project Risk Management Tool*.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.79182>.
- [40] Górecki, J. (2024). *Analiza teoretyczna i badanie ryzyka transformacji branży budowlanej w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym*. Politechnika Bydgoska Wydawnictwo Uczelniane.
- [41] Górecki, J., & Bizon-Górecka, J. (2017). Risk Management in Construction Project: Taking Fairness into Account. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(7), 72024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/7/072024>.
- [42] Górecki, J., & Núñez-Cacho, P. (2022). Decision-Making Problems in Construction Projects Executed under the Principles of Sustainable Development – Bridge Construction Case. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(12).
<https://doi.org/10.3390/app12126132>.
- [43] Grulkowski, S., & Zariczny, J. (2013). Metodyka oceny ryzyka na etapie budowy i eksploatacji kolejowych nawierzchni bezpodsypekowych. *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne*, 103–110.
- [44] Guitouni, A., & Martel, J. M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501–521. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00073-3).
- [45] Harasymiuk J. (2006). *Zapewnienie jakości w wybranym systemie kierowania realizacją inwestycji budowlanej* [Rozprawa doktorska]. Politechnika Warszawska.
- [46] Harasymiuk, J., & Barski, J. (2016). *Risk management as a determinant of the effectiveness of the quality management system in a building company*.
- [47] Hillson, D. (2002). Extending the risk process to manage opportunities. *International Journal of Project Management*, 20(3), 235–240. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(01\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(01)00074-6).

- [48] Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Methods for Multiple Attribute Decision Making* (T. 186). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.
- [49] Ibadov N., Kulejewski J., & Hrishev L. (2011). Porządkowanie i wartościowanie kryteriów oceny rozwiązań budowlanych. *Logistyka*, (6), 1377–1384.
- [50] ISO-9001: Systemy Zarządzania jakością. Wymagania (2015).
- [51] Jacyna, M., & Turkowski, D. (2014). Wybrane aspekty wielokryterialnej oceny doboru środków transportowych w systemach dystrybucji pojazdów. *Logistyka*, 4, 1937-1946.
- [52] Jalhoom, R. J. K., & Mahjoob, A. M. R. (2024). An MCDM Approach for Evaluating Construction-Related Risks using a Combined Fuzzy Grey DEMATEL Method. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(2), 13572–13577. <https://doi.org/10.48084/etasr.6959>.
- [53] Jangam, P., Sakhare, V., & Ingole, R. (2025). Enhanced building envelope material selection: a BIM-MCDM integrated approach. *Discover Civil Engineering*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00249-1>.
- [54] Jaśkowski, P., Biruk, S., & Bucon, R. (2010). Assessing contractor selection criteria weights with fuzzy AHP method application in group decision environment. *Automation in Construction*, 19(2), 120–126. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2009.12.014>.
- [55] Jurczak, M. A., Harasymiuk, J., & Szafranko, E. (2024). Analysis of a data set in a multi-criteria assessment of variants of a building development. *Archives of Civil Engineering*, 70(4), 291–305. <https://doi.org/10.24425/ace.2024.151893>.
- [56] Kaczorek, M. (2022). *Model wielokryterialnego wspomaganie decyzji w planowaniu rozwoju infrastruktury transportowej z uwzględnieniem aspektów zagospodarowania przestrzennego*. [Doctoral thesis]. <http://repo.pw.edu.pl/>.
- [57] Kanapeckiene, L., Kaklauskas, A., Zavadskas, E. K., & Seniut, M. (2010). Integrated knowledge management model and system for construction projects. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(7), 1200–1215. <https://doi.org/10.1016/J.ENGAPPAI.2010.01.030>.
- [58] Khatib, M. M. E., & Alzoubi, H. M. (2022). BIM as a tool to optimize and manage project risk management. W *Article in Journal of Mechanical Engineering*.
- [59] Knight, F. H. (1921). *Risk, Uncertainty and Profit*. University of Chicago Press.
- [60] Koulinas, G. K., Demesouka, O. E., Marhavidas, P. K., Orfanos, N. I., & Koulouriotis, D. E. (2023). Multicriteria Health and Safety Risk Assessments in Highway Construction Projects. *Sustainability (Switzerland)*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/su15129241>.
- [61] Krawczuk, M., & Wieczorek, J. (2020). *Przewodnik po analizie ryzyka*.

- [62] Książek, M. (2010). *Wielokryterialna ocena rozwiązań projektowych budynków* [Doctoral thesis]. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej.
- [63] Książek, M. (2011). Analiza porównawcza wybranych metod wielokryterialnych oceny przedsięwzięć inwestycyjnych. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2(4), 555–561.
- [64] Książek, M., & Nowak, P. (2011). *Wybrane aspekty procesu podejmowania decyzji*. 6, 1983–1992.
- [65] Książek, M., Nowak, P., Rosłon, J., & Wieczorek, T. (2014). Multicriteria assessment of selected solutions for the building structural walls. *Procedia Engineering*, 91, 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.084>.
- [66] Kuryło, P. (2017). Problematyka wielokryterialnego wyboru kompetencji pracowniczych. *Problemy Profesjologii* 2, 117–131.
- [67] Lai, Y. J., Liu, T. Y., & Hwang, C. L. (1994). TOPSIS for MODM. *European Journal of Operational Research*, 76(3), 486–500. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90282-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90282-8).
- [68] Leśniak A. (2016). Wspomaganie decyzji wykonawcy budowlanego z zastosowaniem sztucznej inteligencji. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 63(16), 189–196.
- [69] Leśniak, A. (2021). Statistical methods in bidding decision support for construction companies. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/app11135973>.
- [70] Leśniak, A., Kubek, D., Plebankiewicz, E., Zima, K., & Belniak, S. (2018). Fuzzy AHP application for supporting contractors' bidding decision. *Symmetry*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/sym10110642>.
- [71] Leśniak, A., & Radziejowska, A. (2017). Supporting bidding decision using multi-criteria analysis methods. *Procedia Engineering*, 208, 76–81. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.11.023>.
- [72] Lindstädt, R., Proksch, S.-O., & Slapin, J. (2018). When Experts Disagree: Response Aggregation and its Consequences in Expert Surveys. *Political Science Research and Methods*, 8, 1–9. <https://doi.org/10.1017/psrm.2018.52>.
- [73] Lv, R., Chen, J., Sun, Q., & Ye, Z. (2023). Design—Construction Phase Safety Risk Analysis of Assembled Buildings. *Buildings*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/buildings13040949>.

- [74] Marwa, M., & Altaie, M. R. (2022). Use Risk Score Method to Identify the Qualitative Risk Analysis Criteria in Tendering Phase in Construction Projects. *Journal of Engineering*, 28(7), 31–42. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2022.07.03>.
- [75] Minasowicz, A., & Kostrzewa, B. (2010). Multi-criteria decision analysis for the selection of bids in procurement proceedings using expert database systems based on fuzzy premises. *10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 461–464.
- [76] Modarres, M., & Groth, K. (2023). *Reliability and Risk Analysis*. <https://doi.org/10.1201/9781003307495>.
- [77] Mustafa, M. A., & Al-Bahar, J. F. (1991). Project risk assessment using the analytic hierarchy process. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 38(1), 46–52. <https://doi.org/10.1109/17.65759>.
- [78] Nadaf, J., Nadaf, M., Jamadar, B., & Thejaswi, K. P. (2008). Qualitative Risk Analysis for Construction Projects. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 1649.
- [79] Newton, P. (2015). *Managing Project Risk. Project Skills*.
- [80] Nowak, A. S. (2007). Analiza ryzyka i ocena niezawodności konstrukcji w praktyce budowlanej. *XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Szczecin-Międzyzdroje „Zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje”*.
- [81] Nowak M. (2008). Interaktywne wielokryterialne wspomaganie decyzji w warunkach ryzyka: metody i zastosowania. *Prace Naukowe, Akademia Ekonomiczna w Katowicach*, 91–97.
- [82] Nowak, P., & Skłodkowski, M. (2016). Multicriteria analysis of selected building thermal insulation solutions. *Archives of Civil Engineering*, 62(3), 137–148.
- [83] Nyqvist, R., Peltokorpi, A., & Seppänen, O. (2024). Uncertainty network modeling method for construction risk management. *Construction Management and Economics*, 42(4), 346–365. <https://doi.org/10.1080/01446193.2023.2266760>.
- [84] Obolewicz, J. (2017). Wykorzystanie analizy wielokryterialnej do diagnozy stanu bezpieczeństwa pracy i ochrony zdrowia na budowie. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, (46), 28–40. <https://doi.org/10.12845/bitp.46.2.2017.2>.
- [85] Ogrodnik, K. (2015). Możliwość zastosowania analizy wielokryterialnej do diagnozy procesu planowania przestrzennego na poziomie lokalnym: przykład teoretyczny. *Architecturae et Artibus*, 7(1), 44–52.

- [86] Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1).
- [87] Piegat A. (2011). *Funkcja $r1(x)$ reprezentatywności hipotez i jej zastosowanie do agregacji ocen eksperckich*.
- [88] Pilarczyk, M., & Ulewicz, R. (2024). Assessment and improvement of safety in the operation of building structures in individual agricultural holdings: Risk analysis, technical standards, and best practices. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 13(2024.13), 152–116. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2024.13.15>.
- [89] PN-EN IEC 31010:2020-01 Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka (2020).
- [90] PN-EN IEC 60812:2018 Techniki analizy niezawodności systemu – procedura analizy przyczyn i skutków awarii (FMEA) (2018).
- [91] PN-ISO 31000:2018 Zarządzanie ryzykiem – Zasady i wytyczne (2018).
- [92] Pritchard, C. L. (2002). *Zarządzanie ryzykiem w projektach. Teoria i praktyka*. MT&DC.
- [93] Project Management Institute. (2003). *Construction Extension to PMBOK® Guide-2000 Edition Provisional A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. Project Management Institute Newtown Square.
- [94] Radziejowska, A., & Sobotka, A. (2020). Comparative analysis of slab formwork of monolithic reinforced concrete buildings. *Archives of Civil Engineering*, 66(1), 127–141. <https://doi.org/10.24425/ace.2020.131779>.
- [95] Radziszewska-Zielina, E. (2010). Methods for selecting the best partner construction enterprise in terms of partnering relations. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(4), 510–520. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.57>.
- [96] Radziszewska-Zielina E. (2014). Zastosowanie metody AHP do wyboru przedsiębiorstwa budowlanego do współpracy partnerskiej. *Budownictwo i Architektura*, 13(4), 399–406.
- [97] Ralph, L., & Howard, R. (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*.
- [98] Roy B. (1990a). *Wielokryterialne wspomaganie decyzji*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [99] Roy B. (1990b). *Wielokryterialne wspomaganie decyzji*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [100] Runkiewicz, L., & Sieczkowski, J. (2019). Najczęściej popełniane błędy w projektowaniu konstrukcji budowlanych. *Przegląd Budowlany*, 90(5), 18–24.

- [101] Rybka, I., & Bondar-Nowakowska, E. (2010). Zastosowanie macierzy reagowania na ryzyko w projektach systemów kanalizacyjnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, (13), 145–155.
- [102] Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
- [103] Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill International Book Company.
- [104] Saaty, T. L. (1988). What is the Analytic Hierarchy Process? W *Mathematical Models for Decision Support* (s. 109–121). Springer.
- [105] Saaty, T. L. (2001). *Decision making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for decisions in a complex world*. University of Pittsburgh, RWS Publications.
- [106] Saaty, T. L. (2004a). Decision making – the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1–35.
- [107] Saaty, T. L. (2004b). Fundamentals of the analytic network process — Dependence and feedback in decision-making with a single network. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(2), 129–157.
- [108] Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2006). *Decision Making with the Analytic Network Process Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*.
- [109] Saaty, T., & Tran, L. (2007). On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7–8), 962–975. <https://doi.org/10.1016/J.MCM.2007.03.022>.
- [110] Singh, D., & Singh, B. (2020). Investigating the impact of data normalization on classification performance. *Applied Soft Computing*, 97, 105524. <https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2019.105524>.
- [111] Skorupka, D. (2008). Zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwach budowlanych. *Zeszyty naukowe WSOWL*, 149(3).
- [112] Soltanikarbaschi, N., & Hammad, A. (2023). An Integrated AHP-TOPSIS Methodology for Selecting Suitable Project Delivery Method for Construction Projects. W M. and N. K. T. W. and S. M. and A. M. S. and el D. A. and L. G. Walbridge Scott and Nik-Bakht (Red.), *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021* (s. 599–609). Springer Nature Singapore.
- [113] Standard zarządzania ryzykiem FERMA (2002).

- [114] Szafranko, E. (2014). Metody analizy wariantów inwestycji drogowych. *Drogownictwo*, Wydawnictwo PIT, Kraków.
- [115] Szafranko, E. (2015). Możliwości zastosowania metod analizy wielokryterialnej przy doborze rozwiązań materiałowo-technologicznych w konstrukcjach budowlanych. *Materiały Budowlane*, 1(5), 51–52. <https://doi.org/10.15199/33.2015.05.17>.
- [116] Szafranko E. (2016a). Evaluation of data obtained from expert opinions in multi-criteria analyses of construction investment variants. *Archives of Civil Engineering*, 62(2), 205–216.
- [117] Szafranko E. (2016b). Możliwości wykorzystania analizy wielokryterialnej w procesie inwestycyjno-budowlanym. *Archives of Civil Engineering*, 7(3), 179–184.
- [118] Szafranko, E. (2016). Zarządzanie bezpieczeństwem w działalności budowlanej a ocena czynników zagrożenia. *Zeszyty Naukowe SGSP / Szkoła Główna Służby Pożarniczej*, 60(4), 111–126.
- [119] Szafranko, E. (2017a). Chosen aspects of multi-criteria analysis applied to support the choice of materials for building structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 227(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/227/1/012127>
- [120] Szafranko, E. (2017b). Localisation of waste thermal treatment plant with multi-criteria analysis. *Journal of Ecological Engineering*, 18(3), 187–194. <https://doi.org/10.12911/22998993/69367>.
- [121] Szafranko, E. (2019). Analiza wielokryterialna w ocenie wariantów organizacyjnych inwestycji budowlanych. *Acta Scientiarum Polonorum - Architectura Budownictwo*, 18(1), 77–82. <https://doi.org/10.22630/aspa.2019.18.1.9>.
- [122] Szafranko E. (2019). *Wariantowanie inwestycji budowlanych: wielokryterialna ocena koncepcji projektowych z wykorzystaniem teorii prawdopodobieństwa*. Polska Akademia Nauk.
- [123] Szymański, P. (2017). Risk management in construction projects. *Procedia Engineering*, 208, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.036>.
- [124] Tabarroki, S., Nazari, A., & Banihashemi, S. (2024). Risk stages and factors in architectural design- A structural equation modelling. *Architectural Engineering and Design Management*, 20(1), 79–101. <https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2267559>.
- [125] Tan, T., Mills, G., Papadonikolaki, E., & Liu, Z. (2021). Combining multi-criteria decision making (MCDM) methods with building information modelling (BIM): A review. *Automation in Construction*, 121, 103451. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2020.103451>.

- [126] Taroun, A. (2014). Towards a better modelling and assessment of construction risk: Insights from a literature review. *International Journal of Project Management*, 32(1), 101–115. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2013.03.004>.
- [127] Teixeira, J. C., Kulejewski, J., Krzemiński, M., & Zawistowski, J. (2011). *Zarządzanie ryzykiem w budownictwie*.
- [128] Teng, X. (2024). *Risk Evaluation Index System in Construction Stage of High-Rise Building Project*.
- [129] The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission. (2004). *Zarządzanie ryzykiem korporacyjnym - zintegrowana struktura ramowa*. Polski Instytut Kontroli Wewnętrznej.
- [130] Trzaskalik T. (2014). Wielokryterialne wspomaganie decyzji. Przegląd metod i zastosowań. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie*, 74, 239–263.
- [131] Wang, R., Feng, Y., & Yang, H. (2019). Construction project risk evaluation based on FMEA. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 330(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/330/2/022041>.
- [132] Waqar, A., Othman, I., Shafiq, N., Deifalla, A., Ragab, A. E., & Khan, M. (2023). Impediments in BIM implementation for the risk management of tall buildings. *Results in Engineering*, 20, 101401. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.101401>.
- [133] Ward, S., & Chapman, C. (2003). Transforming project risk management into project uncertainty management. *International Journal of Project Management*, 21(2), 97–105. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(01\)00080-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(01)00080-1).
- [134] Xia, N., Zou, P. X. W., Griffin, M. A., Wang, X., & Zhong, R. (2018). Towards integrating construction risk management and stakeholder management: A systematic literature review and future research agendas. *International Journal of Project Management*, 36(5), 701–715. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2018.03.006>.
- [135] Yarramsetty, S., Faheem, M., & Siva Kumar, M. V. N. (2023). An Integrated Approach to Building Planning Using the Multi-Criteria Decision Method (MCDM) and BIM. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 14(4), 49–63. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2023.14.04.005>.
- [136] Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Tamosaitiene, J. (2011). Selection of construction enterprises management strategy based on the SWOT and multi-criteria analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4), 1063–1082. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60096-X](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60096-X).

- [137] Zhang, H. (2007). A redefinition of the project risk process: Using vulnerability to open up the event-consequence link. *International Journal of Project Management*, 25(7), 694–701. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2007.02.004>.
- [138] Zhi, H. (1995). Risk management for overseas construction projects. *International Journal of Project Management*, 13(4), 231–237. [https://doi.org/10.1016/0263-7863\(95\)00015-I](https://doi.org/10.1016/0263-7863(95)00015-I).
- [139] Zou, Y., Kiviniemi, A., & Jones, S. W. (2017). A review of risk management through BIM and BIM-related technologies. *Safety Science*, 97, 88–98. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2015.12.027>.
- [140] Żabicki, P., & Gardziejczyk, W. (2014). Zagadnienia normalizacji kryteriów w analizach wielokryterialnych w projektowaniu dróg. *Budownictwo i Architektura*, 13(4), 325–333.
- [141] Żak, J., Redmer, A., & Sawicki, P. (2004). *Wielokryterialne wspomaganie decyzji w transporcie drogowym*.

ZESTAWIENIE RYSUNKÓW

Rysunek 1.1 Schemat ideowy przeprowadzonych badań i analiz w pracy.	11
Rysunek 2.1 Etapy procesu decyzyjnego.	14
Rysunek 2.2 Interpretacja graficzna zbioru rozwiązań Pareto.	15
Rysunek 2.3 Schemat systemu eksperckiego.	15
Rysunek 2.4 Fazy procedury wielokryterialnej wg Żaka.	16
Rysunek 2.5 Struktura hierarchiczna problemu.	20
Rysunek 2.6 Porównanie ogólnej struktury hierarchicznej do sieci decyzyjnej.	23
Rysunek 2.7 Graficzne wyznaczenie poziomów przynależności wartości liczbowych do poszczególnych zbiorów rozmytych.	23
Rysunek 2.8 Etapy początkowe analizy wielokryterialnej.	30
Rysunek 2.9 Przykład zastosowania metody agregacji liniowej dla dwóch spójnych opinii eksperckich.	31
Rysunek 2.10 Wizualizacja ocen punktowych.	31
Rysunek 2.11 Poziom akceptacji rozbieżności analizowanych opinii.	32
Rysunek 3.1 Schemat ryzyk na różnych etapach procesu inwestycyjnego w branży budowlanej.	33
Rysunek 3.2 Ryzyko na różnych etapach procesu inwestycyjnego.	35
Rysunek 3.3 Przykład klasyfikacji ryzyka w działalności inwestycyjno-budowlanej.	35
Rysunek 3.4 Schemat standardu zarządzania ryzykiem FERMA.	36
Rysunek 3.5 Schemat standardu zarządzania ryzykiem COSO II.	37
Rysunek 3.6 Etapy zarządzania ryzykiem wg normy ISO 31000.	38
Rysunek 3.7 Przykładowe obszary ryzyka.	43
Rysunek 3.8 Przykładowa macierz ryzyka.	47
Rysunek 3.9 Techniki kontrolowania ryzyka.	50
Rysunek 4.1 Przykładowe rozkłady odpowiedzi w analizowanych ankietach.	67
Rysunek 4.2 Przykładowe rozkłady odpowiedzi w analizowanych ankietach dla wariantu W1.	71
Rysunek 4.3 Przykładowe rozkłady odpowiedzi w analizowanych ankietach dla wariantu W2.	74
Rysunek 4.4 Przykładowe rozkłady odpowiedzi w analizowanych ankietach dla wariantu W3.	77
Rysunek 4.5 Rozkład ocen uzyskanych w wyniku analizy metodą AHP.	90

Rysunek 4.6 Porównanie wyników otrzymanych metodami MCE i AHP dla trzech wariantów inwestycji drogowej.	90
Rysunek 5.1 Procentowy wpływ ryzyk wewnętrznych na efektywność decyzji inwestycyjnych.....	96
Rysunek 5.2 Procentowy wpływ ryzyk zewnętrznych na efektywność decyzji inwestycyjnych.....	96
Rysunek 6.1 Etapy autorskiej metody „RiskEval-MCDA”.	99
Rysunek 6.2 Wyniki IVEI dla metody AHP w zależności od współczynników $W1, W2$	102
Rysunek 6.3 Wyniki IVEI dla metody MCE w zależności od współczynników $W1, W2$. ..	103
Rysunek 6.4 Wyniki IVEI dla metody AHP w zależności od współczynników $W1, W2$	108
Rysunek 6.5 Wyniki IVEI dla metody MCE w zależności od współczynników $W1, W2$. ..	109
Rysunek 6.6 Wyniki IVEIA dla metody AHP w zależności od współczynników $W1, W2$. ..	109
Rysunek 6.7 Wyniki IVEIA dla metody MCE w zależności od współczynników $W1, W2$. ..	110

ZESTAWIENIE TABEL

Tabela 2.1 Porównanie metod MADA i MODM.....	17
Tabela 2.2 Fundamentalna skala ocen stosowana w metodzie AHP wg Saaty’ego.....	20
Tabela 3.1 Wybrane podejścia do zarządzania ryzykiem.	38
Tabela 3.2 Metody analizy ryzyka.	39
Tabela 3.3 Zidentyfikowane ryzyka, związane z procesem projektowania konstrukcji budowlanych.	54
Tabela 3.4 Wyniki oceny zidentyfikowanych ryzyk – klasyczne ujęcie ryzyka oraz według metody FMEA (współczynnik RPN).	58
Tabela 3.5 Zestawienie zidentyfikowanych ryzyk wg wartości iloczynu $P \cdot S$	59
Tabela 3.6 Zestawienie zidentyfikowanych ryzyk organizacyjnych wg wartości wskaźnika RPN.	60
Tabela 3.7 Zestawienie zidentyfikowanych ryzyk projektowych wg wartości wskaźnika RPN.	61
Tabela 3.8 Przykłady działań naprawczych dla zidentyfikowanych ryzyk.....	62
Tabela 4.1 Zestawienie kryteriów głównych i podkryteriów.....	65
Tabela 4.2 Zestawienie ocen ekspertów.....	66
Tabela 4.3 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów.	68
Tabela 4.4 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów po odrzuceniu 10% wartości skrajnych odpowiedzi.	68
Tabela 4.5 Mediana i dominanta dla analizowanych podkryteriów.....	69
Tabela 4.6 Zestawienie ocen ekspertów – wariant 1.....	70
Tabela 4.7 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów dla wariantu W1.....	71
Tabela 4.8 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów po odrzuceniu 10% wartości skrajnych odpowiedzi dla wariantu 1.	72
Tabela 4.9 Mediana i dominanta dla analizowanych podkryteriów dla wariantu 1.....	72
Tabela 4.10 Zestawienie ocen ekspertów – wariant 2.....	73
Tabela 4.11 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów dla wariantu W2.....	74
Tabela 4.12 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów po odrzuceniu 10% wartości skrajnych odpowiedzi dla wariantu 2.	75

Tabela 4.13 Mediana i dominanta dla analizowanych podkryteriów dla wariantu 2.....	75
Tabela 4.14 Zestawienie ocen ekspertów – wariant 3.....	76
Tabela 4.15 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów dla wariantu W3.....	77
Tabela 4.16 Ranking podkryteriów na podstawie średniej arytmetycznej ocen i wektora priorytetów po odrzuceniu 10% wartości skrajnych odpowiedzi dla wariantu 3.	78
Tabela 4.17 Mediana i dominanta dla analizowanych podkryteriów dla wariantu 3.....	78
Tabela 4.18 Zestawienie metod najczęściej stosowanych do oceny wariantów inwestycji na terenie województwa warmińsko-mazurskiego w latach 2014-2017.	79
Tabela 4.19 Analiza wielokryterialna MCE dla wariantu 1.....	80
Tabela 4.20 Analiza wielokryterialna MCE dla wariantu 2.....	81
Tabela 4.21 Analiza wielokryterialna MCE dla wariantu 3.....	82
Tabela 4.22 Wyniki metody MCE dla trzech wariantów inwestycji – podsumowanie.	82
Tabela 4.23 Macierz porównań dla kryteriów głównych.....	83
Tabela 4.24 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla kryteriów nadrzędnych.	84
Tabela 4.25 Macierz porównań podkryteriów z grupy A.	84
Tabela 4.26 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla podkryteriów z grupy A.....	84
Tabela 4.27 Macierz porównań podkryteriów z grupy B.....	85
Tabela 4.28 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla podkryteriów z grupy B.....	85
Tabela 4.29 Macierz porównań podkryteriów z grupy C.....	85
Tabela 4.30 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla podkryteriów z grupy C.....	85
Tabela 4.31 Macierz porównań podkryteriów z grupy D.	86
Tabela 4.32 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla podkryteriów z grupy D.....	86
Tabela 4.33 Wektor priorytetu dla podkryteriów w poszczególnych grupach.....	86
Tabela 4.34 Macierz porównań dla wariantów w aspekcie kryterium A.	87
Tabela 4.35 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla wariantów porównywanych w aspekcie kryteriów grupy A.....	87
Tabela 4.36 Macierz porównań dla wariantów w aspekcie kryterium B.	87

Tabela 4.37 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla wariantów porównywanych w aspekcie kryteriów grupy B.	87
Tabela 4.38 Macierz porównań dla wariantów w aspekcie kryterium C.	88
Tabela 4.39 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla wariantów porównywanych w aspekcie kryteriów grupy C.	88
Tabela 4.40 Macierz porównań dla wariantów w aspekcie kryterium D.	88
Tabela 4.41 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla wariantów porównywanych w aspekcie kryteriów grupy D.	88
Tabela 4.42 Wartości macierzy znormalizowanej i wektora priorytetu dla wariantów.	89
Tabela 5.1 Ryzyka związane z wyborem wariantu inwestycyjnego.	93
Tabela 5.2 Ryzyka stosowania analizy wielokryterialnej w procesie inwestycyjnym – etap procesu decyzyjnego.	94
Tabela 6.1 Wyniki z przeprowadzonej analizy wielokryterialnej metodą MCE i AHP.	100
Tabela 6.2 Zidentyfikowane ryzyka dla każdego wariantu inwestycji.	100
Tabela 6.3 Ocena ryzyka dla każdego z trzech wariantów.	101
Tabela 6.4 Wyniki IVEI dla metody AHP w zależności od współczynników W_1, W_2	101
Tabela 6.5 Wyniki IVEI dla metody MCE w zależności od współczynników W_1, W_2	102
Tabela 6.6 Zidentyfikowane ryzyka dla każdego wariantu inwestycji.	105
Tabela 6.7 Ocena ryzyka dla każdego z trzech wariantów.	107
Tabela 6.8 Wyniki IVEI dla metody AHP i MCE w zależności od współczynników W_1, W_2	108
Tabela 6.9 Wskaźnik liczby ryzyk RCI	109
Tabela 6.10 Wyniki IVEIA dla metody AHP i MCE w zależności od współczynników W_1, W_2	110

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1

Scenariusz wywiadu eksperckiego – identyfikacja ryzyk w projektowaniu konstrukcji budowlanych

Założenia badawcze

Cel wywiadu:

Identyfikacja kluczowych ryzyk występujących w procesie projektowania konstrukcji budowlanych, ich przyczyn, skutków oraz sposobów ograniczania.

Badana grupa osób:

- projektanci konstrukcji budowlanych (7 osób), kierownicy projektów (4 osób) oraz inspektorzy nadzoru (3 osób),
- minimum 5 lat doświadczenia w projektowaniu konstrukcji budowlanych/kierowaniu budową/kierowaniu projektami,
- posiadanie uprawnień budowlanych,
- udział w projektach inwestycyjnych o różnym stopniu złożoności.

Skala badania: łącznie zostanie przeprowadzonych 14 wywiadów indywidualnych.

Przebieg wywiadu

Wprowadzenie (2-3 minuty)

- przedstawienie się, wyjaśnienie swojej roli oraz roli rozmówcy – „ekspert”,
- zapoznanie uczestnika z celem wywiadu, ustalenie zasad rozmowy:
 - ✓ poinformowanie, że nie chodzi o poddanie ocenie jego wiedzy, umiejętności,
 - ✓ poinformowanie o kwestiach wykorzystania danych – badanie anonimowe, z którego powstanie zbiorcza analiza.

Wywiad właściwy

Część I

1. Czy może Pani/Pan opowiedzieć krótko o swoim doświadczeniu zawodowym w projektowaniu konstrukcji/kierowaniu budową/kierowaniu projektami?
2. Jakie typy obiektów najczęściej Pani/Pan projektuje?

Część II – Identyfikacja ryzyk

3. Jakie ryzyka najczęściej występują w procesie projektowania konstrukcji budowlanych?
4. Czy może Pani/Pan wskazać konkretne przykłady błędów projektowych, które miały istotne skutki techniczne lub finansowe?
5. Czy zauważa Pani/Pan zmiany w charakterze ryzyk na przestrzeni ostatnich lat (np. wpływ cyfryzacji, zmiany przepisów)?

Część III – Przyczyny ryzyk

6. Jakie są najczęstsze przyczyny występowania ryzyk, o których Pani/Pan wspominał/a?

Część IV – Ocena ryzyk w praktyce

7. Jak Pani/Pan ocenia ryzyka pod względem:
 - prawdopodobieństwa wystąpienia,
 - skutków dla inwestycji,
 - trudności w ich wykryciu przed realizacją?
8. Jakie ryzyka mają największy wpływ na:
 - koszty inwestycji?
 - harmonogram realizacji?
 - bezpieczeństwo konstrukcji?
 - relacje z inwestorem?
9. Czy ryzyka są zazwyczaj wykrywane na etapie projektowania, czy dopiero w trakcie realizacji?
10. Czy stosuje Pani/Pana jakiegokolwiek metody formalne oceny ryzyka (np. FMEA, analiza SWOT, matryce ryzyka)? Czy są one dokumentowane w formie raportów, matryc lub innych narzędzi?

Część V – Działania naprawcze i prewencyjne

9. Jakie działania są według Pani/Pana najskuteczniejsze w ograniczaniu ryzyka projektowego?
 - Czy są to działania organizacyjne (np. lepsze procedury, kontrola jakości)?
 - Czy techniczne (np. automatyzacja obliczeń, weryfikacja przez drugiego projektanta)?
 - Czy edukacyjne (np. szkolenia, mentoring)?
10. Czy uważa Pani/Pan, że obecne procedury projektowe w Polsce wystarczająco uwzględniają ryzyko?
11. Jakie mechanizmy kontroli jakości pomagają w wykrywaniu ryzyk projektowych?

12. Czy zdarzyło się Pani/Panu, że ryzyko zostało zignorowane lub zbagatelizowane, a później miało poważne konsekwencje?

Część VI – Uwagi końcowe

11. Czy chciałaby/chciałby Pani/Pan dodać coś od siebie na temat ryzyka w projektowaniu konstrukcji?
12. Czy widzi Pani/Pan potrzebę opracowania nowych narzędzi wspomagających ocenę ryzyka w projektowaniu?

Część C – Uwagi ogólne

9. Jakie są największe wyzwania w podejmowaniu decyzji projektowych w kontekście ryzyka?
10. Czy widzi Pani/Pan potrzebę opracowania nowych narzędzi wspomagających ocenę ryzyka w projektowaniu?

Serdecznie dziękuję za udział w wywiadzie i poświęcony czas. Pani/Pana odpowiedzi są niezwykle cenne i stanowią istotny wkład w badania naukowe dotyczące ryzyka w projektowaniu konstrukcji budowlanych.

Jeszcze raz dziękuję i życzę wielu sukcesów zawodowych.

Załącznik 2

Kwestionariusz ankiety – ocena ryzyk w projektowaniu konstrukcji budowlanych

Szanowni Państwo,

niniejsza ankieta ma na celu ocenę wybranych ryzyk występujących w procesie projektowania konstrukcji budowlanych. Badanie stanowi część pracy doktorskiej pt. „Inkorporacja ryzyka decyzyjnego do procesu oceny wariantów inwestycji budowlanej”. Badanie ma charakter anonimowy, a jego wyniki zostaną wykorzystane wyłącznie w celach naukowych. Udział w ankiecie jest dobrowolny.

Serdecznie dziękuję za udział w badaniu.

Część A – Metryczka Respondenta

1. Płeć: ☐ kobieta ☐ mężczyzna ☐ inna ☐ wolę nie podawać
2. Wiek: ☐ <25 ☐ 25–34 ☐ 35–44 ☐ 45–54 ☐ 55+
3. Doświadczenie zawodowe w projektowaniu konstrukcji:
☐ mniej niż 5 lat ☐ 6–10 lat ☐ >10 lat
4. Posiadane uprawnienia budowlane: ☐ Tak ☐ Nie
5. Typ obiektów najczęściej projektowanych:
☐ Budynki mieszkalne jednorodzinne
☐ Budynki mieszkalne wielorodzinne
☐ Obiekty użyteczności publicznej (np. szkoły, szpitale, urzędy)
☐ Obiekty przemysłowe (np. hale, magazyny, zakłady produkcyjne)
☐ Obiekty handlowe i usługowe (np. galerie, biurowce)
☐ Obiekty infrastrukturalne (np. mosty, wiadukty, przepusty)
☐ Obiekty specjalne (np. budowle ochronne, obiekty militarne)
☐ Inne:

Część B – Ocena ryzyk

Proszę o ocenę **każdego** ryzyka podanego w poniższej tabeli w trzech kategoriach:

- P (prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia): 1 – bardzo niskie, 10 – bardzo wysokie,
- S (dotkliwość skutków): 1 – nieistotne, 10 – katastrofalne,
- D (wykrywalność): 1 – łatwo wykrywalne, 10 – trudne do wykrycia.

Lp. ryzyka	Ryzyko	Ocena ryzyka		
		P (1-10)	S (1-10)	D (1-10)
Ryzyka organizacyjne				
O1	Niewystarczające zaangażowanie inwestora w projekt może doprowadzić do sytuacji, że dopiero w końcowej fazie projektowania zdecyduje on o konieczności wprowadzenia zmian we wcześniejszych fazach, co pociąga za sobą dodatkową pracę projektanta.			
O2	Chaotyczność inwestora w przedstawianiu nowych pomysłów.			
O3	W przypadku zatrudnienia początkujących projektantów – asystentów istnieje ryzyko, że popełnią błędy: a) drobne, które nie pociągną głównego projektanta do odpowiedzialności za wadliwie wykonany projekt, b) rażące, które mogą skutkować katastrofą budowlaną.			
O4	Odejście z pracy pracowników w końcowej fazie procesu projektowego może skutkować niedotrzymaniem terminów, a nawet niewykonaniem prac.			
O5	Przeciążenie pracą projektanta spowodowane: a) nieoczekiwanym napłynięciem nowych projektów, lub b) koniecznością wprowadzenia korekt we wcześniejszych projektach.			
O6	Jakość wykonania projektu nie spełnia oczekiwań klienta.			
O7	Klient kwestionuje wygórowaną (w jego opinii) cenę projektu i nie chce uiścić stosownej opłaty.			
O8	Konieczność rozstrzygnięcia w kwestii zapłaty za zmiany w projekcie, gdyż stan obecny nie jest wystarczający do uzyskania pozwolenia na budowę.			

Lp. ryzyka	Ryzyko	Ocena ryzyka		
		P (1-10)	S (1-10)	D (1-10)
Ryzyka organizacyjne				
O9	Słaba komunikacja między branżystami lub brak skutecznej komunikacji może doprowadzić do sytuacji, że projektant pracuje na nieaktualnej wersji projektu.			
...	...			
Ryzyka projektowe				
P1	Błędne zestawienie, zebranie i niedoszacowanie obciążeń: a) korzystanie z niewłaściwej normy, b) nieuwzględnienie współczynników bezpieczeństwa, c) przyjęcie niewłaściwych ciężarów materiałów, d) nieuwzględnienie właściwej strefy obciążenia śniegiem, wiatrem, ewentualnego obciążenia sejsmicznego, dynamicznego, d) niewłaściwy podział obciążeń ze względu na czas ich trwania.			
P2	Niewłaściwe przyjęcie schematu statycznego elementu do obliczeń, co daje błędne wyniki – jeśli projektant je zaakceptuje może przyjąć niewłaściwe przekroje, materiały itd., nie będą one optymalne, a w najgorszym przypadku doprowadzą do katastrofy budowlanej.			
P3	Niewłaściwy dobór geometrii elementu konstrukcyjnego lub rodzaju materiału, z którego ma zostać on wykonany, może doprowadzić do obniżenia nośności konstrukcji, zwiększenia jej podatności na uszkodzenia; w skrajnych przypadkach tego typu błędy projektowe mogą skutkować wystąpieniem awarii lub katastrofy budowlanej.			
P4	Nieuwzględnienie przy projektowaniu warunków środowiska może spowodować uszkodzenia elementów lub całej konstrukcji w czasie wznoszenia lub eksploatacji obiektu; zbyt mała otulina może doprowadzić do odsłonięcia zbrojenia i dalszej degradacji elementu.			
P5	Błędne rozpoznanie lub nieodpowiednia interpretacja warunków gruntowych oraz gruntowo-wodnych przez konstruktora, czego efektem mogą być niewłaściwie zaprojektowane fundamenty.			

Lp. ryzyka	Ryzyko	Ocena ryzyka		
		P (1-10)	S (1-10)	D (1-10)
Ryzyka projektowe				
P6	Brak odpowiedniego opracowania detali projektowych, w szczególności połączeń konstrukcyjnych (np. brak rysunku detalu połączenia stropu z płytą balkonową, stropu ze ścianą nośną, czy nieprawidłowo zaprojektowane węzły elementów stalowych) może skutkować błędnym wykonaniem, co zwiększa ryzyko wystąpienia awarii konstrukcji.			
P7	Brak uwzględnienia stabilności i ryzyka wyboczenia smukłych elementów może skutkować ich zniekształceniem lub zniszczeniem, mimo spełnienia kryteriów wytrzymałościowych.			
P8	Nieprawidłowe uwzględnienie obciążeń lub osiadania budynku dla danego rodzaju i typu konstrukcji (nowej, rozbudowywanej, nadbudowywanej), mogące prowadzić na etapie budowy lub eksploatacji do pęknięcia ścian.			
P9	Niewłaściwe zaprojektowanie konserwacji elementów konstrukcyjnych może przyczynić się do degradacji budynków (korozja, pęknięcia, zużycie materiałów, nieszczelności w izolacji).			
P10	Błędy obliczeniowe wynikające z nieprawidłowego zastosowania programów komputerowych.			
P11	Zagrożenia, awarie i katastrofy wynikające z niestosowania aktualnych praw, norm, wytycznych.			
P12	Dokumentacja rysunkowa różni się od obliczeniowej.			
...				

Część C – Uwagi końcowe

Jeśli chciał(a)by Pani/Pan podzielić się dodatkowymi uwagami, spostrzeżeniami lub sugestiami dotyczącymi ryzyk w projektowaniu konstrukcji budowlanych, proszę wpisać je poniżej:

.....
.....

Dziękuję za udział w badaniu.

Pani/Pana odpowiedzi są niezwykle cenne i posłużą do celów naukowych.

Załącznik 3

Kwestionariusz ankiety dotyczącej oceny wariantów inwestycji budowlanej

Szanowni Państwo,

niniejsza ankieta została opracowana w ramach pracy doktorskiej pt. „Inkorporacja ryzyka decyzyjnego do procesu oceny wariantów inwestycji budowlanej”. Jej celem jest zebranie opinii różnych grup interesariuszy na temat ważności kryteriów decyzyjnych (Część B) oraz oceny stopnia spełnienia tych kryteriów przez trzy warianty inwestycji drogowej – W1, W2, W3 (Część C):

- **W1** – lepszy od strony komunikacyjnej, tańszy, ale wymaga zmian w środowisku naturalnym i społecznym,
- **W2** – nie najlepszy od strony komunikacyjnej, koszty przeciętne, ale nie wymaga zmian w otoczeniu społecznym,
- **W3** – przyjazny dla środowiska naturalnego i społecznego, najdroższy i niekorzystny komunikacyjnie.

Badanie skierowane jest do następujących grup:

- inspektorów ochrony środowiska,
- urzędników administracji architektoniczno-budowlanej i nadzoru budowlanego,
- inżynierów budowlanych (projektantów, wykonawców, inspektorów),
- przedstawicieli społeczności lokalnej i innych beneficjentów.

W części B proszę o ocenę każdego kryterium w odniesieniu do jego rangi przy inwestycji drogowej w skali od 1 do 5, gdzie:

1 – dane kryterium jest mało istotne,

5 – dane kryterium jest bardzo ważne.

W części C proszę o ocenę każdego wariantu – W1, W2, W3 – względem podanych kryteriów w skali od 0 do 5, gdzie:

0 – brak spełnienia danego kryterium (brak oddziaływania czynnika na dany wariant),

5 – pełne spełnienie danego kryterium (kryterium ma duże znaczenie dla wariantu).

Badanie ma charakter anonimowy, a jego wyniki zostaną wykorzystane wyłącznie w celach naukowych. Serdecznie dziękuję za poświęcony czas.

Część A – Metryczka respondenta

1. Płeć: ☐ kobieta ☐ mężczyzna ☐ inna ☐ wolę nie podawać
2. Wiek: ☐ <25 ☐ 25–34 ☐ 35–44 ☐ 45–54 ☐ 55+
3. Wykształcenie: ☐ średnie ☐ wyższe techniczne ☐ wyższe inne ☐ inne:.....
4. Doświadczenie zawodowe w budownictwie: ☐ brak ☐ mniej niż 5 lat ☐ 6–10 lat
☐ >10 lat
5. Posiadane uprawnienia budowlane: ☐ Tak ☐ Nie
6. Rodzaj reprezentowanej grupy:
- ☐ inspektor ochrony środowiska
- ☐ urzędnik administracji architektoniczno-budowlanej / nadzoru budowlanego
- ☐ inżynier budownictwa (projektant / wykonawca / inspektor)
- ☐ przedstawiciel społeczności lokalnej / beneficjent

Część B – Ocena ważności podkryteriów (skala 1–5)

Proszę ocenić, jak ważne są dla Pani/Pana poniższe podkryteria przy wyborze wariantu inwestycji budowlanej.

Skala: 1 – mało ważne, 5 – bardzo ważne

Lp.	Kryteria oceny	1	2	3	4	5
1	A1 – praca przewozowa					
2	A2 – czas przewozów					
3	A3 – długość drogi w km					
4	A4 - eksploatacja pojazdów					
5	B1 – koszt budowy drogi					
6	B2 – koszt wykupu terenu					
7	B3 – koszty odszkodowań					
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych					
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne					
10	C3 – ilość drzew do wycięcia					
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt					
12	C5 – przecięcie cieków wodnych					
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia					
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m					
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m					
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia					
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym					

Część C – Ocena wariantów inwestycji (skala 0–5)

Proszę ocenić stopień spełnienia każdego podkryterium przez poniższe warianty inwestycji.

Skala: 0 – brak spełnienia, 5 – pełne spełnienie

Wariant 1

Lp.	Kryteria oceny	0	1	2	3	4	5
1	A1 – praca przewozowa						
2	A2 – czas przewozów						
3	A3 – długość drogi w km						
4	A4 - eksploatacja pojazdów						
5	B1 – koszt budowy drogi						
6	B2 – koszt wykupu terenu						
7	B3 – koszty odszkodowań						
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych						
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne						
10	C3 – ilość drzew do wycięcia						
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt						
12	C5 – przecięcie cieków wodnych						
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia						
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m						
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m						
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia						
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym						

Wariant 2

Lp.	Kryteria oceny	0	1	2	3	4	5
1	A1 – praca przewozowa						
2	A2 – czas przewozów						
3	A3 – długość drogi w km						
4	A4 - eksploatacja pojazdów						
5	B1 – koszt budowy drogi						
6	B2 – koszt wykupu terenu						
7	B3 – koszty odszkodowań						
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych						
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne						
10	C3 – ilość drzew do wycięcia						
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt						
12	C5 – przecięcie cieków wodnych						

13	D1 – liczba budynków do wyburzenia						
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m						
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m						
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia						
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym						

Wariant 3

Lp.	Kryteria oceny	0	1	2	3	4	5
1	A1 – praca przewozowa						
2	A2 – czas przewozów						
3	A3 – długość drogi w km						
4	A4 - eksploatacja pojazdów						
5	B1 – koszt budowy drogi						
6	B2 – koszt wykupu terenu						
7	B3 – koszty odszkodowań						
8	C1 – naruszenie obszarów chronionych						
9	C2 – długość przebiegu tras przez obszary leśne						
10	C3 – ilość drzew do wycięcia						
11	C4 – przecięcie szlaków wędrówek zwierząt						
12	C5 – przecięcie cieków wodnych						
13	D1 – liczba budynków do wyburzenia						
14	D2 – liczba budynków w odległości 0-50m						
15	D3 – liczba budynków w odległości 50-100m						
16	D4 – powierzchnia gruntów do wywłaszczenia						
17	D5 – kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym						

Część D – Uwagi końcowe

Jeśli chciał(a)by Pani/Pan podzielić się dodatkowymi uwagami lub sugestiami dotyczącymi oceny wariantów inwestycji budowlanych, proszę wpisać je poniżej:

.....

.....

.....

Dziękuję za udział w badaniu.

Załącznik 6

Kwestionariusz ankiety dotyczącej oceny kryteriów metodą AHP

Szanowni Państwo,

niniejsza ankieta została opracowana w ramach pracy doktorskiej pt. „Inkorporacja ryzyka decyzyjnego do procesu oceny wariantów inwestycji budowlanej”. Jej celem jest zebranie opinii ekspertów dotyczących ważności kryteriów oraz porównań parami zgodnie z metodyką AHP (Analytic Hierarchy Process). W badaniu oceniane są kryteria podane w poniższej tabeli.

Kryteria oceny	Symbol kryterium
Kryterium transportowe i komunikacyjne	A
Praca przewozowa	A1
Czas przewozów	A2
Długość drogi w km	A3
Eksploatacja pojazdów	A4
Kryterium ekonomiczne	B
Koszt budowy drogi	B1
Koszt wykupu terenu	B2
Koszty odszkodowań	B3
Kryterium środowiskowe	C
Naruszenie obszarów chronionych	C1
Długość przebiegu tras przez obszary leśne	C2
Ilość drzew do wycięcia	C3
Przecięcie szlaków wędrówek zwierząt	C4
Przecięcie cieków wodnych	C5
Kryterium społeczno-planistyczne	D
Liczba budynków do wyburzenia	D1
Liczba budynków w odległości 0-50m	D2
Liczba budynków w odległości 50-100m	D3
Powierzchnia gruntów do wywłaszczenia	D4
Kolizje z planowanym zagospodarowaniem przestrzennym	D5

Zebrane odpowiedzi posłużą do budowy macierzy porównań i wyznaczenia wag poszczególnych etapów hierarchii. Badanie ma charakter anonimowy, a wyniki zostaną wykorzystane wyłącznie do celów naukowych.

Część A – Metryczka respondenta

1. Płeć: ☐ kobieta ☐ mężczyzna ☐ inna ☐ wolę nie podawać
2. Wiek: ☐ <25 ☐ 25–34 ☐ 35–44 ☐ 45–54 ☐ 55+
3. Wykształcenie: ☐ średnie ☐ wyższe techniczne ☐ wyższe inne ☐ inne:.....
4. Doświadczenie zawodowe w budownictwie: ☐ brak ☐ mniej niż 5 lat ☐ 6–10 lat
☐ >10 lat
5. Posiadane uprawnienia budowlane: ☐ Tak ☐ Nie
6. Rodzaj reprezentowanej grupy:
☐ inspektor ochrony środowiska
☐ urzędnik administracji architektoniczno-budowlanej / nadzoru budowlanego
☐ inżynier budownictwa (projektant / wykonawca / inspektor)
☐ przedstawiciel społeczności lokalnej / beneficjent

Część B – Porównanie kryteriów głównych

Proszę porównać dwa kryteria, zaznaczając które z nich jest ważniejsze w kontekście wyboru wariantu inwestycji drogowej oraz jak bardzo ono dominuje, korzystając ze skali 1-9:

- 1 – równa ważność (obie cechy równie ważne),
- 3 – umiarkowana przewaga jednego nad drugim,
- 5 – silna przewaga,
- 7 – bardzo silna przewaga,
- 9 – absolutna przewaga.
- 2, 4, 6, 8 – wartości pośrednie.

Ważne: W każdym pytaniu proszę zaznaczyć **tylko jedną odpowiedź**: albo „pierwsze ważniejsze”, albo „drugie ważniejsze” oraz **jedną wartość 1-9**.

Które kryterium jest ważniejsze?

1. A czy B?

☐ A ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

☐ B ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

2. A czy C?

☐ A ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

☐ C ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

3. A czy D?

☐ A ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

☐ D ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

4. B czy C?

☐ B ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

☐ C ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

5. B czy D?

☐ B ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

☐ D ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

6. C czy D?

☐ C ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

☐ D ważniejsze: 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

Część C – Porównanie podkryteriów w obrębie każdej grupy

W każdej tabeli proszę porównać podkryteria w ramach jednego kryterium głównego. Dla każdego wiersza proszę wskazać:

- które podkryterium jest ważniejsze (pierwsze czy drugie),
- jak silna jest przewaga (1-9 wg skali Saaty’ego).

Ważne: W każdym wierszu proszę zaznaczyć **tylko jedną stronę tabeli** (pierwsze lub drugie podkryterium) oraz **jedną wartość 1-9**.

Grupa A – porównanie podkryteriów A1-A4 (kryterium transportowe i komunikacyjne)

Para podkryteriów	Pierwsze podkryterium ważniejsze	Drugie podkryterium ważniejsze
A1 czy A2	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
A1 czy A3	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
A1 czy A4	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
A2 czy A3	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
A2 czy A4	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
A3 czy A4	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

Grupa B – porównanie podkryteriów B1-B3 (kryterium ekonomiczne)

Para podkryteriów	Pierwsze podkryterium ważniejsze	Drugie podkryterium ważniejsze
B1 czy B2	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
B1 czy B3	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
B2 czy B3	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

Grupa C – porównanie podkryteriów C1-C5 (kryterium środowiskowe)

Para podkryteriów	Pierwsze podkryterium ważniejsze	Drugie podkryterium ważniejsze
C1 czy C2	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
C1 czy C3	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
C1 czy C4	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
C1 czy C5	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
C2 czy C3	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
C2 czy C4	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
C2 czy C5	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
C3 czy C4	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
C3 czy C5	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
C4 czy C5	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

Grupa D – porównanie podkryteriów D1-D5 (kryterium społeczno-planistyczne)

Para podkryteriów	Pierwsze podkryterium ważniejsze	Drugie podkryterium ważniejsze
D1 czy D2	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
D1 czy D3	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
D1 czy D4	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
D1 czy D5	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
D2 czy D3	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
D2 czy D4	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
D2 czy D5	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
D3 czy D4	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
D3 czy D5	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
D4 czy D5	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

Część D – Porównanie wariantów względem kryteriów głównych

Dla każdego kryterium (A–D) proszę porównać pary wariantów inwestycyjnych:

- W1 – tańszy, lepszy komunikacyjnie, większe oddziaływanie środowiskowo-społeczne,
- W2 – średnie koszty, najmniejsze oddziaływanie społeczne,
- W3 – najdroższy, najbardziej przyjazny środowisku i społeczeństwu, gorszy komunikacyjnie.

W każdym wierszu proszę zaznaczyć **tylko jeden wariant** jako lepszy (np. W1 lub W2) oraz **jedną wartość 1-9** opisującą siłę przewagi.

Kryterium A – transportowe i komunikacyjne

Para wariantów	Który wariant lepszy?	Siła przewagi (1-9)
W1 czy W2	W1 ☐ W2 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
W1 czy W3	W1 ☐ W3 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
W2 czy W3	W2 ☐ W3 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

Kryterium B – ekonomiczne

Para wariantów	Który wariant lepszy?	Siła przewagi (1-9)
W1 czy W2	W1 ☐ W2 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
W1 czy W3	W1 ☐ W3 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
W2 czy W3	W2 ☐ W3 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

Kryterium C – środowiskowe

Para wariantów	Który wariant lepszy?	Siła przewagi (1-9)
W1 czy W2	W1 ☐ W2 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
W1 czy W3	W1 ☐ W3 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
W2 czy W3	W2 ☐ W3 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

Kryterium D – społeczno-planistyczne

Para wariantów	Który wariant lepszy?	Siła przewagi (1-9)
W1 czy W2	W1 ☐ W2 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
W1 czy W3	W1 ☐ W3 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐
W2 czy W3	W2 ☐ W3 ☐	1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐

Część E – Uwagi końcowe

Jeśli chciał(a)by Pani/Pan podzielić się dodatkowymi uwagami lub sugestiami dotyczącymi oceny wariantów inwestycji budowlanych, proszę wpisać je poniżej:

.....

.....

.....

Dziękuję za udział w badaniu.