Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
Wydział Informatyki

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Zbigniew Piotrowski

Algorytm doboru metod wielokryterialnych w środowisku niedoprecyzowania informacji preferencyjnej

Promotor rozprawy
prof. dr hab. inż. Ryszard Budziński

Szczecin 2009

Spis treści

Wprowadzenie . . . 3

1. Wielodziedzinowe złożone problemy wyboru . . . 6

1.1. Sytuacje decyzyjne o złożonej i wielodziedzinowej charakterystyce . . . 8

1.2. Stan badań w zakresie rozwiązywania złożonych problemów wyboru . . . 11

1.3. Dane lingwistyczne w formułowaniu kryteriów i w wartościach atrybutów . . . 15

1.4. Złożony charakter problemu wyboru lokalizacji dla przedsiębiorstwa . . . 17

1.5. Nakreślenie problemu . . . 19

2. Wielokryterialne wspomaganie decyzji . . . 20

2.1. Przegląd definicji i zastosowań metod MCDA . . . 23

2.2. Wytyczne dla selekcji metody odpowiedniej do danej sytuacji decyzyjnej . . . 26

2.2.1. Metody oparte o relację przewyższania — szkoła europejska . . . 27

2.2.2. Metody oparte o funkcję użyteczności . . . 29

2.3. Badania nad stosowaniem wielu metod w jednym modelu decyzyjnym . . . 31

3. Nieostra informacja decyzyjna . . . 33

3.1. Teoria zbiorów rozmytych . . . 34

3.2. Rozwinięcie teorii zbiorów rozmytych przy pomocy zbiorów lingwistycznych . . . 38

3.3. Wspomaganie decyzji z danymi lingwistycznymi . . . 40

3.3.1. Metoda Fuzzy PROMETHEE . . . 42

3.3.2. Metoda Fuzzy TOPSIS . . . 44

3.3.3. Metoda rozmyta Kuo . . . 47

4. Budowa algorytmu do wspomagania problemów wyboru . . . 53

4.1. Definicja problemu decyzyjnego . . . 55

4.2. Kolekcja metod wielokryterialnych . . . 57

4.3. Dane lingwistyczne w preferencjach i opisie sytuacji decyzyjnej . . . 59

4.4. Konstrukcja problemu wyboru na podstawie opisu sytuacji decyzyjnej . . . 62

4.4.1. Kolekcja metod wielokryterialnych . . . 64

4.4.2. Wybór podejścia data mining . . . 66

4.4.3. Wyznaczenie kryteriów problemu decyzyjnego . . . 68

4.5. Dokonanie oceny typu problemu bazując na opisie pozyskanym od decydenta . . . 72

4.5.1. Charakterystyki zbioru C . . . 72

4.5.2. Charakterystyki zbioru Φ . . . 74

4.5.3. Charakterystyki zbioru K . . . 74
4.6. Dobór metody wielokryterialnej do rozwiązania problemu wyboru . . . 76
4.6.1. Analiza wejść metod wielokryterialnych . . . 76
4.6.2. Analiza kontekstu sytuacji decyzyjnej . . . 81
4.6.3. Odkrywanie reguł decyzyjnych . . . 83
4.6.4. Weryfikacja reguł decyzyjnych . . . 86
4.7. Konstrukcja algorytmu rozwiązującego model decyzyjny . . . 89
4.8. Rozwiązanie złożonego problemu wyboru przy pomocy utworzonego algorytmu 94
4.9. Interpretacja rozwiązania . . . 96
5. Implementacja zaproponowanego algorytmu . . . 99
5.1. Paradygmat agenta programowego . . . 100
5.2. Agentowe systemy szkieletowe . . . 103
5.3. Implementacja algorytmu za pomocą agentowego systemu szkieletowego . . . 105
5.3.1. Obrane podejście implementacji . . . 106
5.3.2. Opis funkcjonalny agenta . . . 108
5.3.3. Cele użytkowe implementacji . . . 113
5.4. Metodyka przeprowadzonych doświadczeń . . . 114
5.5. Dyskusja wyników doświadczeń . . . 116
5.5.1. Przykład 1: Outsourcing systemu informatycznego . . . 116
5.5.2. Przykład 2: Wybór materiału do wykonania produktu . . . 118
5.5.3. Przykład 3: Wybór maszyny produkcyjnej . . . 120
5.5.4. Przykład 4: Wybór lokalizacji dla siedziby przedsiębiorstwa . . . 122
5.5.5. Przykład 5: Wybór systemu informatycznego Business Intelligence . . . 127
5.6. Zastosowania dla zaproponowanego rozwiązania . . . 133
Zakończenie . . . 136
Bibliografia . . . 140
Spis rysunków . . . 147
Spis tabel . . . 149
A. Tabela zastosowań metod MCDA . . . 150
B. Wykresy drzew decyzyjnych . . . 152
C. Reguły bazy wiedzy skonstruowane na bazie drzew decyzyjnych . . . 164
D. Implementacja agenta programowego . . . 167

Wprowadzenie

Złożoność wkracza w kolejne obszary funkcjonowanie jednostek i organizacji. Następujące jedna po drugiej sytuacje decyzyjne sprawiają, że dokładna analiza sytuacji decyzyjnej jest coraz trudniejsza. Przy masowości podejmowanych decyzji człowiek staje przed dylematem podjęcia decyzji na podstawie niepełnej informacji lub nie podjęcia jej na czas. Sytuacje decyzyjne dotyczą zarówno czynności codziennych, takich jak dokonanie zakupów lub wybór środka transportu. Dotyczą również czynności związanych z zarządzaniem złożonymi systemami zależności, takimi jak organizacje lub systemy informacyjne. Wielu autorów wskazuje, iż decyzje zarządcze charakteryzują się koniecznością uwzględnienia nie tylko celów decydenta, ale też celów cząstkowych osób uczestniczących w procesie. Wielość celów cząstkowych uwypukla potrzebę działań na wielu płaszczyznach [88].

Istnieje zatem potrzeba opracowania systemowego ujęcia dla wyróżnionej kategorii **Złożonych Wielokryterialnych Problemów Wyboru (ZWPW)**, zgodnie z klasą „problematyk wyboru" $P.\alpha$ B. Roya [126, s. 68]. Wymieniona kategoria sytuacji decyzyjnych charakteryzuje się przede wszystkim wielokryterialnością, wielością źródeł opisu kryteriów i wariantów decyzyjnych. Specyficzną cechą problemów zarządczych jest znaczna elastyczność niektórych parametrów a także wysoka elastyczność relacji „wartość kryterium–skutki implementacji".

Można zatem zidentyfikować pewne wyróżniki rozważanych tutaj problemów decyzyjnych, które stanowią o niemożności zastosowania metod optymalizacji matematycznej do wspomagania decydentów stawianych przed problemami klasy ZWPW.

Pierwszym istotnym aspektem złożonych sytuacji decyzyjnych jest **nieprzewidziany wpływ otoczenia** na przebieg implementacji. Wynika stąd potrzeba uwzględnienia niepewności we wspomaganiu, co wskazują autorzy w pracach [87, 153, 51].

Równie istotnym utrudnieniem w analizie decyzyjnej jest **dostępność niedokładnych, a często jedynie słownych opisów** dla wielu parametrów. Wspomaganie w takich warunkach wymaga poszukiwania nowych podejść dla zastosowania obliczeń komputerowych opartych na arytmetyce liczb do modelowania zjawisk ciągłych i subiektywnych [153, 152]. Autorzy prac [153, 87, 51] przedstawiają kierunki i motywacje dla takich poszukiwań.

Informacja niewyrażona jawnie w postaci kryteriów decyzyjnych wynika z kontekstu sytuacji decyzyjnej i jest niezwykle trudna do modelowania i uwzględnienia w obliczeniach metod wielokryterialnych. Czynniki te jednakże są uwzględniane przy ocenie rezultatów wspomagania, w szczególności przy implementacji rekomendowanego scenariusza. Wynika to z tego, że samo dopasowania procesu decyzyjnego do zewnętrznych uwarunkowań społecznych, politycznych oraz technicznych również wpływa na jakość procesu wielokry-

terialnego [98]. Co więcej, otoczenie organizacyjne może wymagać od decydenta, żeby umotywował podjętą decyzje poprzez sformalizowany algorytm postępowania [35].

Istnieje zatem potrzeba opracowania sformalizowanego podejścia do autonomicznego wspomagania decyzji w środowisku rozproszonym, które może zostać zastosowane do złożonych sytuacji decyzyjnych, gdzie w sposób jawny zostaną uwzględnione elementy otoczenia wpływające na niejawną specyfikację sytuacji decyzyjnej. W świetle przedstawionej argumentacji sformułowano następujący **cel pracy**:

Konstrukcja algorytmu *umożliwiającego dobór decyzyjnych metod wielokryterialnych (operujących również na danych rozmytych i lingwistycznych) na potrzeby pracy w środowisku internetowym agentów programowych. Problem wyboru oparto na architekturze drzew decyzyjnych.*

Postawiono następującą **tezę pracy**:

Teza pracy stanowi, że **wspomaganie decyzji z zastosowaniem danych lingwistycznych i zestawu metod wielokryterialnych** *będzie miało formę bliższą językowi naturalnemu, a wynik będzie lepiej dopasowany do przebiegu rzeczywistego procesu decyzyjnego..*

Wykazanie zaprezentowanej tezy i osiągnięcie postawionego celu pracy wymagało przeprowadzenia dokładnej analizy obecnego stanu wiedzy. Przytoczono także podstawy naukowe wielokryterialnego wspomagania decyzji, a następnie opracowano autorską notację pozwalającą na zapis sytuacji decyzyjnej na poziomie meta-opisu uwzględniającego kontekst sytuacji decyzyjnej i przypisanie metody wielokryterialnej do problemu decyzyjnego. Kolejnym istotnym elementem wywodu jest przedstawienie sposobu implementacji algorytmu w rozwiązanie programowe. Wykorzystanie opracowanego algorytmu wyboru **w architekturze agentowej** pozwala na autonomiczne wyszukiwanie **wariantów decyzyjnych w środowisku rozproszonym**.

W rozdziale pierwszym przedstawiona została istota podejmowania złożonych decyzji w wielodziedzinowym środowisku. Przybliżony został także stan literatury światowej na temat wielokryterialnych sytuacji decyzyjnych, których opis zawiera elementy niepewności i subiektywizmu.

W drugim rozdziale dokonano przeglądu teorii i zastosowań teorii wielokryterialnego wspomagania decyzji (**MCDA** – MultiCriteria Decision Analysis), a następnie wprowadzono podstawowe definicje wykorzystywane w dalszej części pracy. Rozdział zawiera także klasyfikację metod MCDA i przegląd badań nad doborem konkretnej metody do zadanego problemu decyzyjnego.

Rozdział trzeci poświęcony jest problemowi niedoprecyzowania informacji decyzyjnej, co obejmuje zarówno rozmytość informacji, jak i wartości wyrażone w sposób lingwistyczny. Przedstawione zostały podstawowe pojęcia związane z obliczeniami na danych rozmytych, a następnie dokonany został przegląd literatury związanej z uwzględnieniem nieprecyzyjnych danych we wspomaganiu decyzji. Rozdział zakończony jest podsumowaniem obecnego stanu wspomagania decyzji z uwzględnieniem danych nieostrych.

Czwarty rozdział otwiera część badawczą rozprawy i zawiera szczegółowy opis algorytmu opracowanego na potrzeby niniejszej rozprawy. Zgodnie z zasadą kompletności rozprawy doktorskiej, w rozdziale dokonano formalizacji pojęć na potrzeby algorytmu, dokonano budowy kolekcji metod wielokryterialnych, przeanalizowano przesłanki doboru metody do problemu decyzyjnego na podstawie wybranych czynników kontekstu sytuacji decyzyjnej. Rozdział zawiera także **zasadniczy wkład naukowy** rozprawy w postaci odkrytych reguł decyzyjnych dla **doboru metody wielokryterialnej najlepiej dopasowanej do sytuacji decyzyjnych opisanych informacją środowiskową**. Przedstawiony algorytm obejmuje zarówno proces budowy bazy wiedzy, jak i rozwiązywanie sytuacji decyzyjnych w sposób autonomiczny (możliwy do implementacji w formie agenta programowego).

Zawartość **rozdziału piątego** obejmuje implementację zaproponowanego algorytmu w formie agenta programowego. Przedstawiono zagadnienia związane z budową agenta programowego wspomagającego decyzje, wprowadzono podstawowe definicję teorii agentów programowych i opisano wykonaną implementację narzędzia. Rozdział kończą opisy przeprowadzonych eksperymentów wykazujących słuszność obranego podejścia i możliwe dalsze kierunki badań nad przedstawionym zagadnieniem.

Przyjęte podejście algorytmizacji zadań analitycznych związanych z wielokryterialnym wspomaganiem decyzji oparte jest na matematycznych podstawach metodologicznych, wiążąc je jednak z silnie aplikacyjnym charakterem zastosowania agentów programowych. Umiejscawia to rozprawę na gruncie **dyscypliny naukowej informatyka** definiowanej przez profesora Węglarza jako „(...) **systematyczne badanie procesów algorytmicznych, które opisują i przetwarzają informację (...)" [146].**

1. Wielodziedzinowe złożone problemy wyboru

Ludzie otoczeni są urządzeniami mechanicznymi i elektronicznymi, które wspomagają wykonywanie różnych czynności. Od prostych dźwigni pozwalających na minimalizację użycia siły fizycznej, poprzez urządzenia wspomagające obliczenia lub organizację czasu i zadań, do narzędzi informatycznych dostarczających różnego rodzaju rekomendacji. Powoduje to przyzwyczajenie człowieka do dostępności wspomagania we wszystkich obszarach jego aktywności. Stąd oczekuje on sprowadzenia swoich działań do zadań kreatywnych, polegających na określeniu problemu, a dostępne narzędzia dostarczą przejrzystych opcji bezpośrednio związanych z jego intencjami, a następnie podającymi sugestię odnośnie wyboru najlepszego wariantu.

Złożoność wkracza w kolejne obszary życia, a człowiek poddawany jest coraz to nowym i coraz bardziej skomplikowanym wyborom. Nawet podróż, która dawniej wiązała się jedynie z prostymi zadaniami, jak wybór środka transportu, a często tylko ze skorzystania z jedynego dostępnego, obecnie wymaga analizy całej serii kryteriów takich jak czas dojazdu, cena, elastyczność, a nawet wygoda. Jest to wynikiem istnienia wielu dostawców usług. Działania podyktowane racjonalnością ekonomiczną nie są jednoznaczne z poszukiwaniem wariantu o najniższym koszcie. Co więcej, dynamika zmian powoduje, że koszt każdej opcji względem pozostałych kształtuje się różnie w zależności od obranego horyzontu czasowego.

Jednym z charakterystycznych obszarów, gdzie decydenci stawiani są przed koniecznością dokonania wyboru opisanego wieloma parametrami, gdzie skutki rozciągają się na wiele wymiarów, jest zarządzanie organizacją. Szczególnym przypadkiem organizacji jest przedsiębiorstwo (organizacja gospodarcza), które określone jest przez szereg celów. Wyróżnić można między innymi [88]: cele rynkowe, cele efektywnościowe, cele finansowe, cele socjalne i cele prestiżowe. Cele nadają kierunek funkcjonowania organizacji. Wydzielić można klasę celów homogenicznych **(cele immanentne)** oraz grupy celów wzajemnie sprzecznych **(cele transcendentne)**, które jednakże muszą być podporządkowane głównemu zadaniu przedsiębiorstwa [88].

Przedstawiona powyżej złożoność codziennych czynności człowieka jest zwielokrotniona w sytuacjach obejmujących wzajemnie powiązane działania grupy (lub grup) osób. Zarządzanie w ujęciu behawioralnym oznacza konieczność takiego ukierunkowania wysiłków wielu osób, aby osiągnięcie celów kierującego uwzględniało aspekt cząstkowych celów indywidualnych osób uczestniczących w procesie [88].

Wielość celów cząstkowych uwypukla konieczność podjęcia działań na wielu płaszczyznach, gdzie przedmiotem maksymalizacji jest możliwie najobszerniejszy wycinek wiązki celów organizacji.

W celu opracowania systemowego ujęcia dla przedstawionych powyżej sytuacji decyzyjnych, zdefiniowano kategorię **Złożonych Wielokryterialnych Problemów Wybo-**

ru (ZWPW). Sytuacja decyzyjna polegająca na wyborze najlepszego wariantu decyzyjnego z dostępnego zbioru A, klasyfikowana jest jako ZWPW gdy prawdziwe są wszystkie twierdzenia przedstawione we wzorach (1.1)–(1.5).

$$\max(C_1, \ldots, C_k), \min(C_{k+1}, \ldots, C_n), \qquad n \geqslant 2 \tag{1.1}$$

gdzie $\{C_1, \ldots, C_k\}$ jest zbiorem kryteriów zyskowych, a $\{C_{k+1}, \ldots, C_n\}$ zbiorem kryteriów kosztowych problemu decyzyjnego, a n jest liczba kryteriów definiujących problem decyzyjny.

$$C \subset \Psi \vee \Psi \equiv \{\Psi_1, \Psi_2, \ldots, \Psi_l\} \tag{1.2}$$

gdzie C jest zbiorem wszystkich kryteriów definiujących problem decyzyjny, Ψ jest obszarem rzeczywistości, na którym zdefiniowany jest problem decyzyjny, przy czym Ψ_i jest podzbiorem dziedziny specyficznym dla jednej dyscypliny (dla jednego obszaru działania organizacji), $i = 1, \ldots, n$, a $l \leqslant n$.

$$D(A) \subset D_1 \cup D_2 \cup \cdots \cup D_l \tag{1.3}$$

gdzie $D(A)$ jest dziedziną opisów wariantów decyzyjnych, D_i jest źródłem danych opisu zjawisk rzeczywistości, charakteryzującym się sobie właściwą konwencja i formatem zapisu danych, $i = 1, \ldots, l$, a $l \leqslant n$.

$$\partial A_{ij} \ll \partial C_i(A_j) \tag{1.4}$$

gdzie ∂A_{ji} jest zmianą wartości wariantu A_j względem kryterium C_i, a $\partial C_i(A_j)$ jest zmiana wydajności kryterium C_i dla wariantu A_j.

$$\partial(C_i(A_j) - C_i(A_k)) \gtrapprox 0 \Rightarrow A_j \prec A_k \tag{1.5}$$

Warunki przedstawione na wzorach (1.1)–(1.5) określone są opisowo w postaci następujących twierdzeń:

1. **wymóg optymalizacji więcej niż jednego parametru wariantów decyzyjnych,**
2. **definicja kryteriów obejmuje dane specyficzne dla różnych dyscyplin (różnych obszarów działania organizacji),**
3. **dane o wariantach decyzyjnych mogą pochodzić z wielu źródeł i być zapisane według różnych konwencji i w różnych formatach,**
4. **niewielkie różnice wartości pojedynczych atrybutów rzutują na istotne różnice w wartościach wydajności kryteriów,**
5. **niewielkie różnice w stopniu spełnienia jednego z kryteriów pomiędzy wariantami decyzyjnymi mają istotne znaczenie dla decydenta (lub uczestników procesu),**

W kontekście organizacji gospodarczych wymienione wyżej cechy charakterystyczne ZWPW odzwierciedlane są przez problemy strategiczne. W przedsiębiorstwach celem decyzji podejmowanych na poziomie strategicznym jest nie tylko maksymalizacja zysku przedsiębiorstwa (założenie 1), ale też zagwarantowanie przetrwania w dłuższym okresie, na co składać się mogą cele cząstkowe, takie jak: zwiększenie udziału w rynku, zmniejszenie kosztów produkcji, poprawa warunków pracy personelu, poprawa wizerunku marki, i inne. Kryteria te są często kryteriami pojedynczych jednostek organizacyjnych, które skoncentrowane są na maksymalizacji parametrów obejmujących ich obszar ekspertyzy

(założenie 2), tak jak dział personalny jest w głównej mierze zainteresowany poprawą warunków pracy personelu oraz budową wizerunku firmy jako atrakcyjnego pracodawcy. Z rozproszeniem procesu definiowania problemu wiąże się również rozproszenie źródeł danych i oceny alternatyw (założenie 3), co może wystąpić w wyniku dwóch następujących sytuacji: jednostki odpowiedzialne za definicję kryteriów dostarczają dane lub preferencje dla alternatyw w aspekcie utworzonych przez nie kryteriów **(rozproszenie zgodne z hierarchią problemu)**, lub wartości atrybutów pochodzą z wielu specjalizowanych źródeł zewnętrznych takich jak: grupy ekspertów, dane statystyczne, parametry techniczne, i inne **(rozproszenie zgodne z tematyką atrybutów)**. Ostatnie dwie cechy ZWPW wynikają głównie z dużej skali oddziaływania w przypadku złożonych problemów, co przejawia się wysoką wrażliwością celów na zmiany wartości atrybutów (założenie 4), oraz dużym znaczeniem niewielkich zmian wartości celów dla pojedynczego człowieka (założenie 5). Wymienione czynniki są szczególnie istotne w kwestiach finansowych, gdzie kwoty wyrażane w milionach są powszechnie spotykane w działaniach dużych organizacji, natomiast przeciętny pracownik prywatnie nie jest w stanie samodzielnie zakumulować kapitału tego rzędu nawet przez całe życie (powołując się na dane statystyczne [55]).

ZWPW kategoryzowany jest zgodnie z [126, s. 68] do kategorii **„problematyk wyboru"** $P.\alpha$. Problem ten można traktować również jako zadanie z grupy **„problematyk rankingu"** $P.\gamma$, gdyż problematyka ta może zostać łatwo sprowadzona do $P.\alpha$ poprzez przyjęcie wariantu o najwyższej pozycji w rankingu jako wariantu wybieranego.

1.1. Sytuacje decyzyjne o złożonej i wielodziedzinowej charakterystyce

Wielodziedzinowe sytuacje decyzyjne dotyczą wszystkich aspektów życia człowieka, a także zarządzania organizacją. Złożoność charakteryzuje każdą poważniejszą decyzję, jaką jest na przykład zakup samochodu lub domu. Często wynik dokonanego wyboru uzależniony jest od wielu złożonych warunków. Stąd problematyczne staje się analizowanie skomplikowanych łańcuchów przyczynowo-skutkowych dla każdego możliwego wariantu.

Decyzje występujące w złożonych organizacjach charakteryzują się trudnym do ocenienia skutkiem implementacji oraz niemożnością dokonania kompletnego opisu sytuacji. Na implementacje decyzji mogą wpłynąć czynniki o nieznanej sile wpływu **(warunki niepewności)** oraz czynniki nieznane w momencie podejmowania decyzji **(warunki chaosu)**. Co więcej, niewielkie różnice we właściwościach/atrybutach dostępnych wariantów decyzyjnych mogą istotnie wpłynąć na jeden z optymalizowanych celów. Stąd szczególnie istotny jest problem dokonania „właściwego" wyboru. Także istotny staje się czynnik umotywowania podjętej decyzji w sytuacji, gdy po analizie *a posteriori* okaże się, że jeden z odrzuconych wariantów dostarczyłby lepsze rezultaty.

Nadanie cech systematyczności i sprawienie, aby organizacja osiągnęła założone cele, jest wynikiem grupy działań określanych jako „zarządzanie". Pojęcie to oznacza (za [88]): **„zestaw działań (obejmujący planowanie i podejmowanie decyzji, organizowanie, przewodzenie, tj. kierowanie ludźmi, i kontrolowanie) skierowanych na zasoby organizacji (ludzkie, finansowe, rzeczowe i informacyjne) i wykorzystywanych z zamiarem osiągnięcia celów organizacji w sposób sprawny i skuteczny"** Wynika stąd kluczowa rola **podejmowania decyzji** dla osiągnięcia celów przez liczną grupę osób. Istotę dobrze podjętych decyzji podkreśla fakt, że każda decyzja

w sposób pośredni lub bezpośredni wpływa na grupę osób mogącą obejmować nawet wszystkich obywateli jednego kraju.

Problemy decyzyjne dzielą się pod względem dostępnego opisu na trzy główne grupy [96]:

— **problemy w pełni strukturyzowane**, z dokładnie określonymi zależnościami pomiędzy parametrami i sformalizowanym modelem; dla problemów tej grupy możliwe jest znalezienie optymalnego rozwiązania przy pomocy **metod badań operacyjnych**,
— **problemy słabo strukturyzowane**, z nieznanymi elementami opisu problemu, możliwe wartości w postaci ilościowej i jakościowej; do rozwiązania problemów tej kategorii stosowane są **metody wielokryterialne i analiza koszt-zysk**,
— problemy **niestrukturyzowane**, opisane w sposób jakościowy, z trudnym do zdefiniowania i agregacji modelem celów; rozwiązanie problemu z tej kategorii wymaga zastosowania **metod wielokryterialnych**.

Grupa problemów niestrukturyzowanych obejmuje złożone problemy zarządcze związane między innymi z planowaniem strategicznym. Głównym źródłem opisu niestrukturyzowanego problemu są osądy człowieka. Problemy tego typu rozwiązywane są zwykle przez człowieka, wykorzystując jego rozważania i zdolności analityczne [96].

Złożone problemy wymagające oceny wielu (często nieznanych) aspektów analizowanego zjawiska występują w wielu dziedzinach. Szczególnie **problemy związane zarządzaniem gruntami**, zarówno w kontekście wyboru lokalizacji [47], jak i planowania przestrzennego [83, 59, 41, 137], określone są nie tylko przez wiele kryteriów, ale też opis ten obejmuje wiele dyscyplin. Wielość dyscyplin i szeroka dziedzina problemu skutkuje rozdrobnieniem ciała decyzyjnego. Decyzje, których implementacja wpływa na wiele osób, oceniane są przez wielu decydentów, często pochodzących ze środowisk o sprzecznych oczekiwaniach odnośnie przedmiotu decyzji [106]

Przykładem decyzji strategicznej jest wybór systemu informatycznego dla firmy. Dokonując zakupu gotowego oprogramowania, określanego też jako „program z półki" (COTS — Commercial Of The Shelf), należy rozważyć znaczną ilość atrybutów oraz dostępnych na rynku rozwiązań. Wiąże się to z dużą ilością wariantów decyzyjnych do porównania. Dodatkowo wybór systemu informatycznego, na przykład systemu dla hurtowni danych, wymaga rozważenia dwóch płaszczyzn: technicznej i zarządczej [82]. Inaczej wygląda sytuacja przy rozważaniu wdrożenia oprogramowania „na zamówienie" lub „customized", gdzie ilość dostępnych możliwości jest znacznie mniejsza, jednak problem jest opisany rozbudowaną strukturą kryteriów [145].

Złożoność tego rodzaju decyzji wiążę się z koniecznością uwzględnienia danych z różnych źródeł i związanych z różnymi obszarami działania organizacji. Organizacje gospodarcze posiadają wyspecjalizowane jednostki organizacyjne zajmujące się wybranymi aspektami działalności. Decyzje strategiczne determinujące kierunek rozwoju całej firmy wymagają uwzględnienia wszystkich aspektów jej działania, stąd konieczne jest uwzględnienie danych z różnych źródeł. Źródła te są specyficzne dla dziedziny, którą opisują. Stąd w niniejszej pracy wprowadzone zostało pojęcie ZWPW, którego istotą jest dokonanie wyboru jednej z dostępnych alternatyw dla problemu obejmującego wiele specjalizowanych aspektów pewnej rzeczywistości i gdzie istotne jest osiągnięcie (optymalizacja) wielu celów ze znaczną dokładnością.

Główne cechy niestrukturyzowanych problemów wymieniono poniżej (za [96]):

— unikalność problemu dla decydenta,
— jakościowy charakter większości kryteriów i częste sformułowania w języku naturalnym,
— uzyskanie porównań lub szacunków dla niektórych alternatyw możliwe do uzyskania wyłącznie od decydenta (lub ekspertów dziedzinowych),
— całkowita ocena wariantu decyzyjnego jest wynikiem subiektywnej preferencji decydenta.

Pomimo pozornej łatwości przełożenia wszystkich decyzji na kryterium przepływów pieniężnych, zarządzanie finansami również wymaga rozwiązywania ZWPW. Występowanie decyzji wielokryterialnych w obszarze finansów wynika z istnienia różnych teorii zarządzania. Stąd, posługując się neoklasycznym spojrzeniem na przedsiębiorstwo, możliwe jest sprowadzenie każdej sytuacji decyzyjnej do jednego kryterium kosztowego. Jednakże wraz z teorią agencji wprowadzeni są kolejni interesariusze, co prowadzi do włączenia kolejnych celów. Istniejące wiązki celów oraz ograniczenia otoczenia pozostają niejednokrotnie we wzajemnej sprzeczności [135].

Złożone problemy decyzyjne są również domeną planowania działań związanych z produkcją energii. Identyfikacja rodzaju i mocy źródeł energii obejmuje wiele czynników ekonomicznych, organizacyjnych, środowiskowych oraz politycznych. Celami projektów energetycznych są między innymi: minimalizacja kosztów (instalacji i eksploatacji), minimalizacja emisji zanieczyszczeń, maksymalizacja niezawodności i bezpieczeństwa, ograniczenie zależności od podmiotów zewnętrznych (obcych państw), ograniczenie ryzyka zanieczyszczeń/zniszczeń. Ograniczenia w przypadku projektów z tej dziedziny dotyczą głównie pojemności, wydajności, dopuszczalnych obciążeń, popytu na energie, dostępności zasobów, ograniczeń technologicznych, dostępności surowców, zapewnienia bezpieczeństwa (szczególnie istotne w przypadku energetyki jądrowej), limitów zanieczyszczeń i innych [32].

Decyzje związane z projektami energetycznymi mają na celu: wybór źródeł i technologii do produkcji energii (elektryczności), planowanie mocy produkcyjnych, planowanie przełączeń, strategii cenowych, wybór lokalizacji dla elektrowni i siłowni, tworzenie planów awaryjnych. Planowanie może także dotyczyć długofalowych strategii dla rozwoju sektora energetycznego w kraju, podejść do wykorzystania alternatywnych źródeł energii oraz wyboru strategii modernizacyjnych zwiększających efektywność systemów energetycznych [32].

Planowanie energetyczne jest w swojej naturze złożonym obszarem praktyki. Stąd decyzje podejmowane w tym obszarze zawierają wiele czynników i skomplikowanych relacji. Podjęcie decyzji nie sprowadza się wyłącznie do uwzględnienia technicznych determinantów planowanego rozwiązania, ale uwzględnia też czynniki społeczne, środowiskowe a także polityczne. Co więcej, siatka celów nie obejmuje jedynie wymiaru przestrzennego i tematycznego, ale też wymiar czasowy. Rezultaty podjętej decyzji widziane są w innym świetle w zależności od rozpatrywanego horyzontu czasowego. Kolejnym problemem są niedostatki informacyjne wynikające z niemożności przewidzenia pewnych zjawisk [32].

Złożone problemy decyzyjne są także domeną rządów państw oraz lokalnych samorządów, których celem jest zapewnienie rozwoju podległym regionom. **Definicja zrównoważonego rozwoju** przytoczona za [98] określa ten cel jako *równoczesną maksymalizację celów systemu biologicznego (różnorodność genetyczna, zdolność do regeneracji, produktywność biologiczna), celów ekonomicznych (zaspokojenie podstawowych potrzeb, równouprawnienie, wzrost dostępności dóbr i usług) i celów społecznych (różnorodność*

kulturowa, równowaga instytucjonalna, sprawiedliwość społeczna, partycypacja)".

Ostatnim omawianym tu obszarem charakteryzującym się złożonością decyzji jest planowanie i projektowanie sieci telekomunikacyjnych. Decyzje związane z planowanym nowym modelem sieci dotyczą aspektów świadczenia usług, struktury rynku, odpowiedzi na szybkie zmiany trendów rynkowych. Innego podejścia wymagają modele wspomagające efektywność trasowania. Cechą charakterystyczną tych modeli jest samodzielne działanie urządzeń wykorzystującym zaimplementowane algorytmy, stąd zastosowane mogą być modele pozwalające na specyfikację *a priori* preferencji. Wielokryterialność problemu spowodowana jest wieloma aspektami przepustowości, związanymi z kosztami czasowymi oraz finansowymi, priorytetami QoS (Quality-of-Service) i przewidywanymi możliwościami zakleszczeń, blokad lub opóźnień [27].

Złożony aspekt ZWPW można zatem podsumować jako wynik powiązań pomiędzy przedmiotem podejmowanej decyzji a uwarunkowaniami zewnętrznymi. Niemożność uwzględnienia w modelu całego otoczenia zewnętrznego tworzy konieczność przedsięwzięcia środków pozwalających na jak najbliższe rzeczywistości odzwierciedlenie prawdopodobnego wpływu tej interakcji. Inną przyczyną złożoności jest istnienie wielu źródeł alternatyw, dla względnie nieskomplikowanego problemu. W sytuacji tego rodzaju, konstrukcja modelu decyzyjnego nie wykracza skalą złożoności poza klasyczne problemy wyboru, jednakże problemem jest uwzględnienie w rozważaniu wariantów decyzyjnych z różnych źródeł z niespójnym formatem opisu. Heterogeniczność opisu alternatyw zyskuje na znaczeniu wraz z popularyzacją środowisk rozproszonych, gdzie poszukiwanie dostępnych alternatyw jest również włączane do procesu wspomagania decyzji.

1.2. Stan badań w zakresie rozwiązywania złożonych problemów wyboru

Analiza konsekwencji wariantów decyzyjnych prowadzi do wyodrębnienia wymiarów ich oddziaływania na rzeczywistość decydenta. W ten sposób identyfikowane są możliwe kompensacje oddziaływań poprzez dopuszczalne kompensacje pomiędzy kryteriami, które to obarczone są określonym stopniem prawdopodobieństwa. Uwzględnienie tych oddziaływań w modelowaniu matematycznym dokonywane jest przy pomocy wypunktowania w danym wymiarze. Najczęściej stosowane formy operatora wypunktowującego, to: (a) wypunktowanie oparte na średniej lub masie całkowitej, (b) wypunktowanie oparte na charakterystykach rozproszenia, lub (c) równoważnik punktowy (wartość użyteczności). Określenie kryterium przez analityka wymaga starannej analizy i rzetelnego wyboru takiego kryterium, które wyczerpuje wyznaczony zbiór konsekwencji, a jednocześnie jest miarą najlepiej odzwierciedlającą dany wymiar konsekwencji [126, s. 173-187].

Istniejące wielokryterialne metody wspomagania decyzji zbudowane są według schematu, którego celem jest zebranie w wiarygodny sposób (bez przekłamań) wiedzy od decydenta i wykorzystanie tej wiedzy do uporządkowania dostępnych alternatyw, bazując na ich charakterystykach. Stąd, celem jest wskazanie decydentowi takiego wariantu decyzyjnego, którego implementacja da rezultaty najbardziej pożądane przez decydenta.

Praca [105] przywołuje kwalifikację systemów decyzyjnych według trzech następujących aspektów:

— **determinizm wspomagania decyzji** — stopień ryzyka w skali od pewnego (deterministycznego) do całkowicie losowego,

— **liczba decydentów** — podział decyzji na indywidualne i grupowe,
— **etapowość decyzji** — jedno- i wieloetapowe systemy decyzyjne, w tym systemy dynamiczne.

Za największy problem strukturalizowanego wspomagania decyzji uznawany jest **problem obiektywności wspomagania**. Wynika to z ograniczeń związanych między innymi z brakiem możliwości jednoznacznej oceny pewnych wartości/parametrów. Rozmycie wartości wynika nie tylko z charakteru pewnych parametrów opisu rzeczywistości, ale też z często nieprecyzyjnymi/niedoprecyzowanymi preferencjami decydenta. Dodatkowym utrudnieniem jest też udział analityka w procesie, gdyż wprowadza on dodatkową percepcję rzeczywistości, nie zawsze zgodną z percepcją decydenta [127].

Model decyzyjny jest obiektywny, gdy zapewnia bezstronność w płaszczyźnie reprezentacji odzwierciedlanej klasy zjawisk oraz w płaszczyźnie podstawy badań i klasyfikacji. W praktyce, już sam fakt współpracy analityka wprowadza pewną stronniczość i opiniotwórczość. Każdy człowiek posiada swój wewnętrzny system wartości i nie jest możliwe dostarczenie osądów z wyłączeniem tego systemu. Jest to szczególnie silne przy dokonywaniu ocen aspektów powiązanych z uczuciowością, na przykład takich jak czynniki społeczne konsekwencji analizowanych zjawisk [126, s. 30].

Jednoznaczne porównanie i uporządkowanie wariantów decyzyjnych, opisanych dużą liczbą atrybutów, przekracza możliwości percepcji ludzkiego umysłu. Zlecenie takiego zadania decydentowi prowadzi do sprzecznych osądów i niespójności modelu. Wyniki badań przytoczone w [96] wykazały, że dużo łatwiejszym zadaniem dla człowieka jest dokonanie porównania wartości wyrażając jakościową preferencję porządkową, niż dokonać liczbowej oceny preferencji. W przytoczonej pracy wyróżniono następujące operacje, dopuszczalne do zlecenia decydentowi:

— uporządkowanie ważności kryteriów,
— jakościowe porównanie wartości atrybutów dla jednego lub dwóch kryteriów,
— jakościowa ocena prawdopodobieństw.

Doprowadzenie skomplikowanego opisu sytuacji decyzyjnej do postaci możliwej do analizy przez człowieka dokonywane jest poprzez dzielenie problemu na podproblemy reprezentowane przez kryteria/atrybuty. Kryteria scharakteryzowane są przy pomocy wartości pochodzących z domen specyficznych dla każdego kryterium. Stąd każdy wariant decyzyjny $A = \{A_1, A_2, \ldots, A_n\}$ opisany jest przez wektor wartości $A_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \ldots, u_{im}\}, u_{ij} \in D_j, i = 1, 2, \ldots, n; j = 1, 2, \ldots, m$. Wartości alternatyw są następnie agregowane do poziomu globalnej preferencji/wydajności alternatywy przy pomocy wybranego operatora agregacji. Klasycznymi przykładami takich operatorów są operatory ważonej sumy i ważonego iloczynu przedstawione we wzorze (1.6) [44].

$$v(A_i) = \sum_{j=1}^{m} w_j u_{ij} \qquad v(A_i) = \prod_{j=1}^{m} w_j u_{ij} \tag{1.6}$$

Ostatecznie warianty decyzyjne są porządkowane według wartości ich użyteczności dla decydenta, i alternatywa o najwyższej wartości użyteczności jest wskazywana decydentowi jako decyzja preferowana [44].

Do oceny alternatyw stosowane są następujące skale [92]:

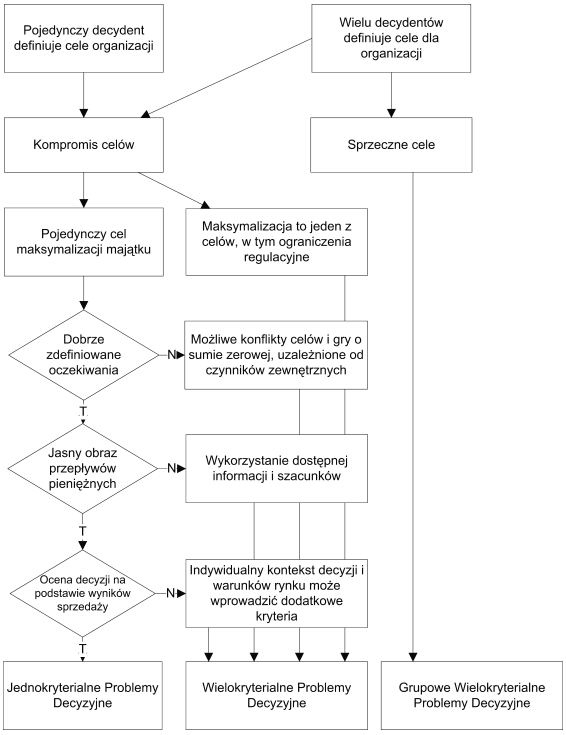
Skala porządkowa , gdzie wartość g_i określona jest na skali punktowej,
Rozmyta skala porządkowa , gdzie wartość funkcji przynależności μ określa stopień zgodności oceny z pozycją na skali,

Skala ilościowa , gdzie wartość rzeczywista g_j określa wydajności alternatywy,

Rozmyta skala przedziałowa gdzie funkcja rozmyta (najczęściej trapezoidalna) określa stopień prawdopodobieństwa przynależności rozważanej alternatywy do przedziału wartości (prawdopodobieństwo jest równe jedności dla podprzedziału wyznaczonego rdzeniem zbioru). Funkcja trapezoidalna stosowana jest w metodach uwzględniających progi nierozróżnialności i preferencji.

Kształt funkcji użyteczności, lub ogólniej **modelu sytuacji decyzyjnej**, zdeterminowany jest nie tylko przez preferencje decydenta, na podstawie których może być niemożliwe ocenienie tego parametru, ale też przez samą sytuację decyzyjną. Wiąże się to z ogólnie przyjętymi konwencjami, które dla konkretnej sytuacji mogą być wprowadzone przez ekspertów dziedzinowych. Dokonany przegląd literatury pozwolił na sporządzenie meta-opisu dla zastosowania szeregu metod wielokryterialnych do wspomaganych sytuacji decyzyjnej. Wyniki dokonanej analizy przedstawia tabela A.2 w załączniku A.

Rysunek 1.1 przedstawia algorytm testowania wielokryterialności sytuacji decyzyjnej napotkanej w zarządzaniu organizacją gospodarczą.



Rysunek 1.1: Test na wielokryterialność problemu zarządczego

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [135]

Analiza schematu pozwala na wyciągnięcie wniosku o nadrzędnej roli finansów oraz przepływów pieniężnych w roli organizacji. Podczas gdy **sytuacje jednokryterialne sprowadzają się do maksymalizacji dodatniego przepływu** (minimalizacji ujemnego przepływu), **problemy wielokryterialne uwzględniają ryzyko związane z „możliwymi przyszłymi przepływami" oraz alokację przepływów wewnątrz organizacji** (różni uczestnicy procesu decyzyjnego i implementacji decyzji).

W obszarze finansów problemy decyzyjne często obejmują porównanie skończonego zbioru alternatyw w celu wyboru najlepszego pod względem wyspecyfikowanych kryteriów. Cel dokonywanego wyboru wpływa na wybór klasy problematyk do zastosowania.

Wybór najlepszego projektu inwestycyjnego jest przykładem klasy **problemów wyboru** (problematyka α), przewidywanie upadłości przedsiębiorstwa (klasyfikacja do klasy „zdrowych" lub „zagrożonych") jest przykładem **problemu klasyfikacji** (problematyka β), analiza porównawcza walorów (akcje, opcje lub udziały) przedsiębiorstwa reprezentuje **problem rankingu alternatyw** od najlepszej do najgorszej (problematyka γ), natomiast opis charakterystyk (wskaźników) finansowych grupy przedsiębiorstw należy do klasy **problemów opisu alternatyw** pod względem spełniania przez nie zadanych kryteriów [135].

Problem oceny możliwości bankructwa firmy lub oceny ryzyka kredytowego należy do **problemów klasy** β dotyczących klasyfikacji firm do klas „ryzykowne"/„brak ryzyka". Powszechnie stosowane w tego typu sytuacjach są metody statystyki i ekonometrii. Problem doboru portfela inwestycyjnego (akcje, kontrakty, papiery skarbowe, kontrakty terminowe) ukierunkowane są zwykle na maksymalizację użyteczności decydenta/posiadacza. Ocena efektywności organizacji/przedsiębiorstwa jest istotnym zadaniem kadry zarządzającej, szczególnie tak zwanego „top managementu" (kadra najwyższego szczebla). Organizacja jest bytem skomplikowanym, tak więc jakakolwiek próba oceny jej w miarach wydajności lub poprawności jest problemem wielowymiarowym. Uwzględnić należy czynniki określające pozycję finansową organizacji, czynniki ekonomiczne związane z otoczeniem biznesowym oraz czynniki strategiczne o naturze jakościowej definiujące i efektywność procesów wewnętrznych. Agregacja czynników z wymienionych grup powinna prowadzić do uzyskania globalnego indeksu wydajności przedsiębiorstwa według określonego zestawu kryteriów. Także dobór projektów inwestycyjnych należy ocenić z punktu widzenia strategii przedsiębiorstwa. Często decyzja o wyborze projektu jest decyzją strategiczną z punktu widzenia rozwoju (lub nawet istnienia) przedsiębiorstwa. Tradycyjne kryteria, którym poddawana jest ocena projektów, dotyczą finansowych determinantów projektu, takich jak: okres zwrotu, stopa zwrotu, wartość NPV (Net Present Value), księgowy okres amortyzacji i zdyskontowana stopa [135].

Klasa problemu wynika z oczekiwań decydenta oraz z przedmiotu sytuacji decyzyjnej. Analiza porównawcza różnych technologii produkcji energii jest **problemem klasy** γ (ranking) — celem jest prioryteryzacja dostępnych technologii. Wybór jednego planu energetycznego (plan rozwoju) na poziomach od lokalnego do narodowego jest przykładem **problemu klasy** α (wybór najlepszego wariantu). W przypadku zespołu projektów, celem decydenta jest konstrukcja najlepszego zestawu projektów, co jest **problemem typu** β (klasyfikacja) [32].

Przykładem rozwiązania złożonego problemu wyboru jest poszukiwanie najlepszego dostawcy materiałów do produkcji. W [8] zaproponowano podział procesu wyboru dostawcy na trzy etapy: ocenę dostawców przy pomocy metody PROMETHEE, sortowanie dostawców przy pomocy algorytmu PROMOSORT (zmodyfikowany wariant PROMETHEE TRI) i faza zarządzania relacją z kandydatami, polegająca na wysłaniu informacji zwrotnej do rozważanych dostawców i negocjacji zmiany wartości niektórych parametrów (faza interaktywna).

Zadaniem wspomagania decyzji w przypadku niestrukturyzowanych ZWPW nie jest przeprowadzanie procesu decyzyjnego i wybranie najlepszego wariantu, ale dostarczenie rekomendacji pozwalającej decydentowi na łatwiejszą ocenę konsekwencji każdego z wariantów. Rekomendacja powinna przedstawić dopasowanie wybranej grupy najlepszych z analizowanych wariantów decyzyjnych do preferencji decydenta. Przedstawienie to powinno mieć formę zrozumiałą dla człowieka i

poziom szczegółowości nie przekraczający komfortowego pojmowania przez ludzki umysł.

Wielokryterialne podejście do modelowania pozwala na dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistości, gdzie celem nie jest jedynie maksymalizacja jednego parametru, lecz poszukiwanie rozwiązania dostarczającego dobre (jak najlepsze) współczynniki dla wielu kryteriów. Jednakże w przypadku optymalizacji struktury sieci komunikacyjnej istnieje wiele modeli programowania matematycznego, rozwiązujących problem struktury sieciowej optymalizującej przepustowość sieci. W przypadku praktycznych implementacji nowych rozwiązań telekomunikacyjnych efektywność przepływu opisana jest przez wiele determinant, co sprawia, że problem ten staje się problemem wielokryterialnym. Stąd rozwinięto wiele modeli wielokryterialnych poszukujących dokładnego rozwiązania, a także podejścia metaheurystyczne i heurystyczne (w tym algorytmy genetyczne). Problemem jest jednakże ustanowienie uniwersalnego podejście niewrażliwego na zachodzące w dużym tempie zmiany technologiczne [27].

Dobór metody dla zadanego problemu decyzyjnego jest równie istotny, jak definicja problemu. Możliwe jest rozważenie dwóch aspektów doboru metody wspomagającej do zadanej sytuacji decyzyjnej. **Pierwszy aspekt** to fakt, że dla tej samej definicji problemu decyzyjnego, różne metody dostarczają różne wyniki (por. [143]) — dostarczane są więc różne rekomendacje, na podstawie, których decydent podejmuje decyzję. **Drugi aspekt** to konstrukcja modelu decyzyjnego w sposób uwzględniający właściwości wybranej metody wspomagającej — tak więc narzuca się decydentowi schemat rozumowania przyjęty dla metody wielokryterialnej. Aspekt ten jest zaprzeczeniem idei „wspomagania" decyzji, toteż **niniejsza rozprawa ukierunkowana została na dostosowanie narzędzi informatycznych do oczekiwań decydenta**.

1.3. Dane lingwistyczne w formułowaniu kryteriów i w wartościach atrybutów

Źródła niedoskonałości danych wywodzą się zarówno z nieprecyzyjnej natury ocen ludzkich, jak i z niedoskonałości instrumentów pomiarowych. W przypadku niektórych cech, jak na przykład wzrost, brak jest możliwości wykonania dokładnego pomiaru. Co więcej, w przypadku ocen wykonanych przez człowieka, dane są często nieadekwatne do rzeczywistości (przykładowo w sytuacji, gdy osoba A jest nieznacznie niższa od osoby B, osoba A może być oceniona jako wysoka, podczas gdy osoba B jako osoba o wzroście średnim) [117].

Przyczyny niedoskonałości danych zostały skategoryzowane w [127] następująco:

$S.\alpha$ — dane nieprecyzyjne, niepewne i słabo zrozumiane, wynikające z natury pewnych cech problemu,

$S.\beta$ — niedokładność wynikająca z warunków implementacji decyzji, które można sklasyfikować jako wynikające z:

- kontekstu czasowego podejmowanej decyzji; warunki charakterystyczne dla sytuacji niepowtarzalnych,
- progresji związanej z podjęciem decyzji i z nieodwracalną promocją stanu na dalszy poziom (nieodwracalność decyzji),

$S.\gamma$ — rozmyty, niekompletny i niestabilny charakter systemu wartości branych pod uwagę, charakterystyczne dla systemów preferencji uzależnionych od warunków implementacji rozważanych alternatyw

Osądy wykonywane przez człowieka charakteryzują się niepewnością, określaną też jako **niepewność wewnętrzna**. Wynika to z faktu, że oceny subiektywne lub opisy zjawisk jakościowych są nieprecyzyjne i punkt odniesienia zależy od całokształtu osobistych doświadczeń osoby dokonującej oceny. Stąd w wielu pracach oceny te modelowane są przy pomocy zbiorów rozmytych i zbiorów lingwistycznych przy zastosowaniu różnych kształtów funkcji przynależności. Wewnętrzną niepewność należy odróżnić od **niepewności zewnętrznej**, która wynika z nieprzewidywalności pewnych zjawisk i niedeterminizmu zachowań badanego systemu. Badania nad niepewnością zewnętrzną wykorzystują **metody rachunku prawdopodobieństwa i modelowanie probabilistyczne**, jednakże ten aspekt wspomagania decyzji wykracza poza zakres niniejszej rozprawy [136].

Niepewność jest definiowana w [136] jako „*...sytuacja, w której osoba nie posiada wystarczających informacji do ilościowego lub jakościowego opisania, przewidzenia lub ustanowienia systemu, jego zachowania lub innej charakterystyki w sposób deterministyczny*".

Niepewność wynikająca ze złożoności problemów decyzyjnych związana jest z trudnością lub niemożnością modelowania pewnych zjawisk lub oceny pewnych wartości na etapie strukturalizacji problemu. Spośród dostępnych technik rozwiązywania problemu niepewności, najpowszechniej stosowane są techniki wymienione poniżej [32]:

— Budowa scenariuszy i analiza wrażliwości: najczęściej stosowane podejście, to takie, w którym analityk zbiera względne ważności kryteriów od różnych interesariuszy celem identyfikacji różnych systemów wartości i wyznaczenia siły otrzymanych osądów,
— Skale jakościowe: zastosowanie skal jakościowych dla kryteriów, które nie mogą być opisane przy pomocy wartości porządkowych,
— Podejście stochastyczne: wykorzystywane w sytuacjach, gdy wpływ czynników zewnętrznych ma charakter stochastyczny (na przykład: czynniki środowiskowe),
— Zbiory rozmyte: wykorzystane do konstrukcji relacji przewyższania, a także do modelowania określeń lingwistycznych w ocenie wydajności lub wag kryteriów,
— Równoległe zastosowanie wag i metod skalujących: równoczesne zastosowanie różnych technik tworzy efekt procedury uczącej dla uczestniczących interesariuszy. Umożliwia to lepsze zrozumienie najważniejszych aspektów i zwiększa wiarygodność procesu decyzyjnego.

Nawet w sytuacjach, w których człowiek nie potrafi sprawnie posłużyć się liczbami, posiada on możliwość wyrażania ocen przy pomocy uczuć, szacunków lub odczuć. Stąd może dokonać porównań według dostarczonej skali opisowej [130].

Lingwistyczne postrzeganie świata przez człowieka stało się inspiracją dla prób dostosowania obliczeń komputerowych do odzwierciedlania specyficznego dla człowieka modelu analitycznego. Próby te obejmują zastosowanie wartości rozmytych [51, 60, 76, 150], wartości lingwistycznych [46], soft computing [72, 94], a także przetwarzanie bazujące na percepcji [153]. W kontekście wspomagania decyzji wiążę się to z metodami zbierania i wykorzystywania do obliczeń danych nieostrych.

Nieliczbowy charakter opisu rzeczywistości ma miejsce we wszystkich obszarach wspomagania decyzji. Decydent określa swoje kryteria jako chęć maksymalizacji własnej użyteczności, która może obejmować wewnętrzne odczucia opisane przy pomocy wyrażeń

w języku naturalnym. Także ocena wariantów decyzyjnych może nie być dokładnie znana, lub też dokładne wartości nie mają znaczenia dla decydenta, a jedynie ich przybliżone położenie na skali. Ostatnim etapem jest wymóg dla rekomendacji, gdzie nie zawsze jest możliwe (i celowe) dostarczenie decydentowi dokładnego rankingu wariantow decyzji wraz z odległościami pomiędzy wariantami. Często rekomendacja może być sporządzona jedynie w formie rozkładów probabilistycznych wzajemnego usytuowania rozważanych alternatyw.

Rozumowaniem człowieka rządzi „zasada proporcjonalności", która polega na tym, że człowiek dokonując oceny otaczającego go świata dostosowuje dokładność swojej percepcji do skali zjawiska. Umożliwia to człowiekowi dostosowanie swoich działań do potrzeb interakcji z otoczeniem. Zgodnie z tą zasadą człowiek ocenia siłę zjawiska oraz różnice w wartościach w zależności od względnego rzędu wielkości analizowanego parametru [130].

Przykładem działania zasady proporcjonalności jest rozważanie kosztu zakupu produktu, gdzie 100 zł stanowi istotny czynnik przy cenie produktu równej 1000 zł, a jest całkowicie pomijalne przy zakupie samochodu za cenę 100 000 zł. Zasada ta ma solidną podstawę zdroworozsądkową wynikającą z doświadczeń człowieka, które nakazują przydzielać dużą uwagę wartości „100 gram" w przypadku przyrządzania potraw (na przykład ciasta) i pomijania tej wartości przy rozważaniu masy ciała człowieka.

1.4. Złożony charakter problemu wyboru lokalizacji dla przedsiębiorstwa

Wybór lokalizacji dla przedsiębiorstwa polega na znalezieniu miejsca dla nowej jednostki o najlepszym dopasowaniu do strategii firmy i dostarczającej największych korzyści z punktu widzenia celów organizacji. Złożoność tego problemu wynika z nieznanego i niedeterministycznego wpływu wiązki celów podlegających planowaniu (długo i średniookresowemu) na cele strategiczne (długookresowe) a także na strategiczny aspekt funkcjonowania organizacji określony przez jej misję [88]. Tak więc skoncentrowanie się na krótkookresowym celu minimalizacji kosztów nowej lokalizacji może w długim okresie doprowadzić na przykład do odejść pracowników ze względu na pewne cechy lokalizacji, a w konsekwencji do poważnych strat, a nawet upadku przedsiębiorstwa.

Umiejscowienie przedsiębiorstwa ma na celu nie tylko zapewnienie ochrony pracownikom przed czynnikami zewnętrznymi, takimi jak temperatura, opady i wiatr. Rolą budynku jest ułatwienie działań pracownikom poprzez zapewnienie im dobrych warunków do wykonywania ich działań. Rozróżnić można zadania „wewnętrzne" (na przykład: czynności biurowe) i „zewnętrzne" (na przykład: składowanie materiałów budowlanych). Lokalizacja przedsiębiorstwa powinna odpowiadać charakterowi działań organizacji poprzez dopasowanie uwarunkowań technicznych, a także wspomagać działania przedsiębiorstwa poprzez dopasowanie struktury lokalizacji do charakteru organizacyjnego przedsiębiorstwa [86].

Lokalizacje są narzędziem walki miast i regionów o atrakcyjnych/pożądanych przedsiębiorców. Charakter rynku nieruchomości stanowi główny czynnik konkurencji pomiędzy regionami. Również agencje rządowe szczebla ponadlokalnego i krajowego wpływają na atrakcyjność tego rynku poprzez inicjatywy wpływające na funkcjonowanie przedsiębiorców w określonych regionach i o określonych rodzajach działalności. Dobrze wybrana lokalizacja ma znaczący wkład w skuteczne, efektywne i kreatywne działania w kierun-

ku spełnienia celów organizacji, a także zapewnia elastyczność działania w zmiennym otoczeniu [86].

Istotnym czynnikiem każdej lokalizacji jest obciążenie finansowe związane z jej użytkowaniem. Obciążenie finansowe związane jest nie tylko z wielkością kosztu, ale też z metodą finansowania. Zasadnicze trzy sposoby użytkowania gruntu lub pomieszczeń, to: **najem, leasing i własność**. Różnice pomiędzy wymienionymi sposobami obejmują rozłożenie kosztu w czasie, stronę ponoszącą koszty ekonomiczne możliwych zmian technologicznych i ilość kapitału firmy zablokowanego tytułem użytkowania obiektu [86].

Problem wyboru miejsca na lokalizacje nowego obiektu dla przedsiębiorstwa może być rozpatrywany w wielu aspektach. Niech F_i będzie funkcją preferencji decydenta i, wtedy model problemu jest przedstawiony we wzorze (1.7):

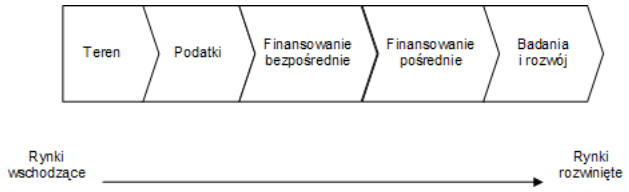
$$v - \min_{X_p \subseteq S \subseteq X, |X_p| = p} (F_i(X_p, A))_{i \in I}, \tag{1.7}$$

gdzie $v - \min$ oznacza minimalizację wektora, X jest przestrzenią/dziedziną decyzyjną, a X_p jest skończonym zbiorem dostępnych lokalizacji, $|X_p|$ jest rzędem zbioru, a S jest dopuszczalnym regionem poszukiwań [101].

Wyróżniono następujące grupy czynników, jako istotne przy rozważaniu lokalizacji dla przedsiębiorstwa [3]:

— rynek zbytu
— transport
— siła robocza
— właściwości terenu
— surowce i dostępność usług (podwykonawcy)
— usługi komunalne (media)
— wpływ rządu
— ryzyko polityczne
— regulacje środowiskowe
— społeczność lokalna
— zachęty materialne i niematerialne
— koszty

W zależności od stopnia rozwoju gospodarki państwa, zachęty dla inwestorów zagranicznych kładą nacisk na różne elementy. Rysunek 1.2 przedstawia zależność pomiędzy rodzajem zachęt, a typem gospodarki.



Rysunek 1.2: Zmiana rodzajów czynników zachęcających do inwestycji

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [121]

Różnorodność czynników oraz różne źródła tak definicji, jak i danych opisujących alternatywy, plasuje ten **problem wybrania najlepszej lokalizacji dla przedsiębiorstwa** w **grupie zdefiniowanych w niniejszej rozprawie problemów ZWPW**. Dla

celów przeprowadzania badań została określona struktura tego problemu oparta o dostępną literaturę z zakresu zarządzania oraz o materiały praktyczne udostępnione przez firmy doradcze.

1.5. Nakreślenie problemu

Złożoność sytuacji decyzyjnej wynikająca z niedeterminizmu wpływu otoczenia na przebieg implementacji nakazuje uwzględnienie czynnika niepewnego lub nieprecyzyjnego w przeprowadzanym modelowaniu. Literatura wskazuje szereg podejść do uwzględnienia niepewności [87, 153, 51], rozmytości [51] i danych słownych [87, 153] (więcej w podrozdziale 1.3). Wzrost oczekiwań odnośnie inteligencji narzędzi informatycznych stanowi motywację do poszukiwania nowych podejść do dostosowania *stricte* liczbowych obliczeń komputerowych do modelowania ciągłego i opartego na subiektywnych odczuciach świata [152, 153].

Nadrzędnym celem wspomagania decyzji jest sprowadzenie złożonego problemu decyzyjnego, obejmującego konieczność dokonania wyboru spośród znacznej liczby wariantów opisanych wieloma atrybutami, do poziomu łatwego do objęcia przez człowieka problemu wyboru jednej z rekomendowanych alternatyw z określonym wpływem implementacji/z określoną zgodnością z zadanymi kryteriami.

Wymóg formalnego opisu procesu analizy decyzyjnej jest szczególnie istotny w przypadku decyzji obejmującej instytucje rządowe. Wzrastająca popularność trendu e-government (e-administracja) zwiększa wykorzystanie narzędzi informatycznych. W sytuacjach związanych z administracją publiczną istotne jest zapewnienie determinizmu postępowania, co jest tym trudniejsze, że często definicja problemu oraz dane dotyczące wariantów decyzyjnych są nieostre.

W kontekście niniejszej rozprawy **Wielodziedzinowy Złożony Problem Wyboru** określa sytuację decyzyjną o charakterze wielokryterialnym, z pewnym zasobem informacji niewyrażonym *explicite* w definicji problemu decyzyjnego. Zasób tej „ukrytej" informacji wynika z kontekstu danej sytuacji decyzyjnej i jest niezwykle trudny (lub niemożliwy) do modelowania. Stąd rozważania na temat wspomagania decyzji kwalifikujących się do określenia wymienioną kategorią powinny pójść w kierunku uwzględnienia przedstawionej informacji w sposób inny, niż żmudne i kosztowne angażowanie analityka.

Opracowanie narzędzia informatycznego wspomagającego decydenta w rozwiązywaniu przedstawionych w niniejszym rozdziale sytuacji decyzyjnych wymaga zastosowania **metod wielokryterialnych**, (rozdział 2) a także uwzględnienia **teorii zbiorów lingwistycznych** (rozdział 3) i **teorii agentów programowych** (podrozdziały 5.1 i 5.2).

2. Wielokryterialne wspomaganie decyzji

Zadaniem analityka jest utworzenie modelu decyzyjnego na podstawie wewnętrznej struktury preferencji decydenta. Model decyzyjny odzwierciedla wzajemne relacje pomiędzy atrybutami, a nie model użyteczności decydenta. Addytywność atrybutów wynika ze wzajemnej niezależności atrybutów, natomiast funkcja wydajności jest wynikiem wpływu zmian wartości atrybutu na preferencję danego wariantu decyzyjnego. Analityk dokonuje serii odpytań decydenta w celu zdeterminowania wzajemnej niezależności atrybutów.

Strukturyzacja problemu jest pierwszym i podstawowym etapem każdego procesu **MCDA**. Przytaczanym często twierdzeniem jest *„dobrze strukturyzowany problem to problem w połowie rozwiązany"* [32]. Do strukturyzacji problemu wykorzystywana jest lista kontrolna **CAUSE** (Criteria, Alternatives, Uncertainties, Stakeholders, Environment — Kryteria, Alternatywy, Czynniki Niepewności, Interesariusze, Środowisko). Na tą metodologię składa się analiza kolejnych grup elementów problemu [32]:

Kryteria i alternatywy są podstawowymi parametrami opisującymi problem decyzyjny. Zadaniem decydenta we współpracy z interesariuszami jest zdefiniowanie tych parametrów.

Wewnętrzne i zewnętrzne czynniki niepewności są kluczową przesłanką dla istnienia metod wspomagania decyzji. Czynniki te stanowią o różnicy w zachowaniu pomiędzy rzeczywistością a opisującym ją matematycznym modelem.

Interesariusze to osoby, które odczują rezultat podjętej decyzji oraz mają możliwość oddziaływania na proces podejmowania decyzji. W przypadku złożonych decyzji (takich jak wybór strategii rozwoju energetyki na szczeblu krajowym) interesariuszami mogą być wszyscy obywatele kraju. Udział interesariuszy może być zrealizowany na dwa sposoby: poprzez udział interesariuszy w formułowaniu problemu (określaniu kryteriów lub definiowaniu ograniczeń) lub poprzez dwustronna interakcję z każdym interesariuszem (w przypadku decyzji w przedsiębiorstwach praktykowane jest wyznaczenie interesariusza reprezentującego daną komórkę organizacyjną).

Środowisko zewnętrzne jest określeniem dla zewnętrznego otoczenia ekonomicznego, naturalnego i socjologicznego organizacji podejmującej decyzję. Otoczenie to może wprowadzić dodatkowe kryteria lub narzucić ograniczenia, nie wynikające ze specyfikacji problemu przez decydenta.

Roy [126, s. 26] definiuje wspomaganie decyzji jako: *„działalność tego, który na podstawie jasno wyrażonych, lecz niekoniecznie w pełni sformalizowanych modeli pomaga znaleźć elementy odpowiedzi na pytania, jakie stawia interwenient w procesie decyzyjnym, elementy wyjaśniające decyzję i zwykle zalecające lub po prostu uprzywilejowujące pewne zachowania w celu zwiększenia spójności z ewolucją procesu z jednej strony, a celami i systemem wartości interwenienta z drugiej strony"*.

Zadanie wspomagania decyzji definiowane jest jako objaśnianie, bądź klaryfikacja decyzji, w szczególności poprzez rekomendację lub wyróżnienie działania, które jest bardziej dopasowane i spójniejsze z celami i oczekiwaniami podanymi przez decydenta. Przy czym

nie jest konieczne, aby proces ten był sformalizowany [127].

Techniki wspomagania decyzji obejmują obszar wielu nauk i wielu dziedzin. Dla każdego z obszarów praktycznych opracowano specyficzne podejścia rozwiązywania problemów, natomiast każdy obszar nauki rozważa inne aspekty podejmowania decyzji przez człowieka. Nauki humanistyczne skoncentrowane są na analizie behawioralnych aspektów dokonywania wyborów oraz przesłanek, które kierują człowiekiem określającym swoje preferencje. Metody ekonomiczne skoncentrowane są na optymalnej alokacji zasobów i maksymalizacji korzyści decydenta w rozważanym horyzoncie czasowym. Nauki matematyczne obejmują techniki modelowania rzeczywistości i efektywnego kosztowo poszukiwania najlepszego wariantu na podstawie otrzymanych danych. Informatyka jako nauka interdyscyplinarna obejmuje wszystkie wymienione aspekty podejmowania decyzji, toteż rozwiązania informatyczne ukierunkowane są na cały proces decyzyjny: od elaboracji problemu przez decydenta do racjonalności ekonomicznej rozważanych alternatyw.

Wspomaganie decyzji na wstępie należy podzielić na cztery kategorie problematyk decyzyjnych, wyróżnione w [127]. Problematyki te wynikają z określonego aspektu planowanej decyzji i z celu, jaki jest oczekiwany od wspomagania tego procesu, i obejmują:

— **„problematykę opisu"** ($P.\delta$) – problemem jest sporządzenie opisu potencjalnych akcji oraz identyfikacja kryterium lub rodziny kryteriów, do tej kategorii zaliczają się problemy obejmujące, na przykład: charakterystykę kondycji finansowej zbioru przedsiębiorstw [135];
— **„problematykę wyboru"** ($P.\alpha$) – wspomaganie decydenta skoncentrowane jest na wyborze małej liczby „dobrych" propozycji, nie ma wymogu na wybranie najlepszego (optymalnego) wariantu, wybór nastawiony jest na wybór najlepszej opcji z rozważanego podzbioru, do tej kategorii zaliczają się problemy polegające na przykład na wyborze projektów inwestycyjnych [135];
— **„problematykę przyporządkowania"** ($P.\beta$) – problem przypisania alternatywy do jednej z dostępnych kategorii, do tej kategorii zaliczają się problemy takie, jak predykcja możliwej upadłości przedsiębiorstwa (na podstawie analizy kondycji finansowej) [135];
— **„problematykę rankingu"** ($P.\gamma$) – sporządzenie rankingu wariantów decyzyjnych według zdefiniowanych kryteriów (i określonej relacji przewyższania), warianty mogą być wzajemnie „lepsze", „gorsze", „nieporównywalne" (lub „nierozróżnialne"), do tej kategorii zaliczają się problemy wykonania na przykład: analizy porównawczej i rankingu udziałów lub akcji przedsiębiorstwa na rynku finansowym/giełdzie [135].

Wybór wariantu decyzyjnego dokonywany jest w celu osiągnięcia najlepszej konsekwencji, z punktu widzenia decydenta, będącej rezultatem implementacji tego wariantu. B. Roy w [126, s. 133] definiuje konsekwencję jako: *„każdy skutek lub atrybut wariantu a, który może interferować z celami lub z systemem wartości uczestnika procesu decyzyjnego (...). Jest to element, na podstawie którego uczestnik tworzy, uzasadnia lub transformuje swoje preferencje"*. Problematyczność w ocenie konsekwencji wynika z ich wielorakości i niedostępności danych. Możliwość oceny konsekwencji jest często utrudniona i nieracjonalna ze względu na znaczny koszt i czasochłonność potrzebnej analizy. Stąd analizuje się **chmurę konsekwencji**, będącą rozmytym i niedokładnym wynikiem analizy powiązań wariantu decyzyjnego [126, s. 133].

Zadaniem wspomagania decyzji jest pomoc decydentowi w podjęciu decyzji zgodnie z jego rozumowaniem. Podejmowanie decyzji jest jedną z najczęściej wykonywanych aktywności przez całe jego życie człowieka. Decyzje obejmują zakres: od mikroskali —

codziennych czynności, do makroskali — organizacji lub całych państw. Nauka o podejmowaniu decyzji zmieniła sposób postrzegania umysłu. Zakres danych wymaganych do podjęcia decyzji przekracza możliwości instrumentów naukowych, a także wprowadza nowy wymiar znaczeniowy do suchych danych pozyskanych z różnorakich pomiarów lub opisów. W podejmowaniu decyzji istotne są nie same wartości zmiennych, ale znaczenie jakie tym zmiennym przypisuje człowiek. Podjęcie dobrej decyzji powinno więc bazować na pozyskaniu wiarygodnych danych opisujących rzeczywistość, oraz na rzetelnym zebraniu preferencji od decydenta. Wynikiem takiego podejścia będzie proces decyzyjny bazujący na matematycznej analizie dostępnych danych i subiektywnym procesie analizy wykonanym przez ludzki umysł [130].

Wyróżnić można (za [126, s. 48]) następujące cztery poziomy procesu decyzyjnego:

Poziom I: przedmiot decyzji i sens zalecenia lub udziału,
Poziom II: analiza konsekwencji i opracowanie kryteriów,
Poziom III: modelowanie preferencji globalnych i koncepcja agregacji ocen,
Poziom IV: procedury badawcze i opracowanie zalecenia.

W niniejszej pracy wspomaganie decyzji będzie rozumiane jako sformalizowany proces, na który składa się grupa działań wspomagających lub zastępujących decydenta przy następujących grupach zadań [127]:

— **analiza kontekstu decyzji,**
— **organizacja i/lub strukturalizacja procesu,**
— **interakcja z uczestnikami procesu,**
— **wygłoszenie rekomendacji,**
— **uzasadnienie podjętej decyzji.**

W ramach wymienionych grup podejmowane są rozmaite czynności, z których w niniejszej rozprawie obrano następujące czynności jako element wspomagania prac decydenta: identyfikacja przedmiotu decyzji, identyfikacja wszystkich uczestników decyzji, rozkład procesu decyzyjnego na podstawowe elementy celem zidentyfikowania relacji pomiędzy wejściem procesu (wymagania, preferencje decydenta, opisy wariantów decyzyjnych) a wyjściem (decyzja — rekomendacja, uzasadnienie), uzasadnienie sporządzonej rekomendacji. Wykonanie wymienionych powyżej czynności może być wspomagane lub wykonane przez narzędzia informatyczne [127].

Rolą analityka jest konstrukcja modelu ukazującego konsekwencje różnych zachowań i tworzącego rekomendację na podstawie ocen uzyskanych od decydenta. Analityk jest osobą współpracującą z decydentem i wnoszącą swoją wiedzę i doświadczenie do procesu. Wyidealizowana koncepcja osoby analityka sytuuje go jako postać całkowicie przeźroczystą z punktu widzenia procesu decyzyjnego. W praktyce natomiast, trafniej jest rozważać analityka jako jeden z podmiotów procesu [126, s. 28].

Cel wielokryterialnego wspomagania decyzji można zdefiniować jako ustalenie relacji wzajemnego przewyższania pomiędzy wariantami decyzyjnymi, w taki sposób, aby zależnie od kategorii problemu decyzyjnego ustalić wariant najbardziej preferowany przez decydenta, lub aby sporządzić ranking wariantów pod względem stopnia preferencji przez decydenta. Zadanie to jest złożone ze względu na istnienie różnych kryteriów opisujących dostępne alternatywy i różne preferencje decydenta odnośnie tych kryteriów. Stąd brane pod uwagę są wartości poszczególnych kryteriów i obliczana jest *funkcja użyteczności* $u_j : X_i \to \mathbb{R}$ dla każdego/wybranego kryterium. Określenie, który wariant jest preferowany, wymaga analizy rozważanych wariantów z perspektywy wszystkich kryteriów. Do

tego celu wykorzystywana jest globalna/zagregowana wartość funkcji użyteczności $u(x)$ obliczana przy wykorzystaniu *funkcja agregacji* $F : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, zgodnie ze wzorem (2.1) [49].

$$u(x) = F\left[u_1(x_1), \ldots, u_n(x_n)\right] \ \forall x \in X \tag{2.1}$$

Wielokryterialne podejście do wspomagania decyzji wymaga podziału procesu na dwa główne etapy. W przypadku wykorzystania metod opartych o **relację przewyższania** pierwszym etapem jest **agregacja** celem identyfikacji relacji przewyższania pomiędzy alternatywami. Drugim etapem jest **eksploatacja** tych relacji w celu wyboru najlepszego wariantu (α), klasyfikacji wariantów do zdefiniowanych grup (β) lub konstrukcji rankingu (γ) [135].

Wsparcie decydenta wskazane jest na wszystkich etapach tego procesu. Decydent oczekuje wspomagania przy procesie wyrażania jego potrzeb celem najrzetelniejszego określenia sytuacji decyzyjnej, a także przy określaniu jego wag, w celu konstrukcji modelu najlepiej oddającego jego oczekiwania. Wspomaganie jest również wskazane przy określaniu dopasowania wariantów decyzyjnych do kryteriów decydenta. Z wariantami decyzyjnymi związane jest również zagadnienie poszukiwania tychże w heterogenicznym środowisku rozproszonym (na przykład sieć Internet). Ostatnim etapem wspomagania decydenta jest przełożenie wyników procesu MCDA na rekomendację, która powinna zawierać informacje dotyczące przewidywanych wyników implementacji sugerowanego wariantu i uzasadnienie dopasowania tego wariantu do wymagań decydenta.

Klasyczny model oceny dla problemu decyzyjnego przedstawić można (za [140]) w postaci zbioru pięciu uporządkowanych elementów, jak to zobrazowano za pomocą wzoru:

$$M = \langle A, \{D, \varepsilon\}, H, U, R \rangle \tag{2.2}$$

gdzie:

A jest zbiorem alternatyw rozważanego modelu decyzyjnego, stanowi zatem domenę rozważań dla relacji i funkcji opisujących analizowany problem;

D jest zbiorem wymiarów (atrybutów), które opisują elementy zbioru wariantów decyzyjnych, stanowi zbiór funkcji rzutujących rzeczywiste właściwości obiektów z A na przyjętą skalę odwzorowań określoną w ϵ;

ε jest skalą wartości przypisaną każdemu elementowi elementowi D;

H jest zbiorem kryteriów, względem których oceniane są elementy zbioru A; jest to przekształcenie rzutujące właściwości elementów A na preferencję decydenta;

U jest zbiorem struktur niepewności określonych na zbiorach D i H; określają one rozkłady niepewności relacji zdefiniowane przez decydenta;

R jest zbiorem operatorów agregujących informacje zawarte w zbiorze A za pomocą funkcji ze zbiorów D i H, do postaci ocen wariantów decyzyjnych względem preferencji decydenta.

2.1. Przegląd definicji i zastosowań metod MCDA

Praktyka decyzyjna pokazuje, iż większość sytuacji decyzyjnych rozważana jest przez decydentów z perspektywy więcej niż jednego kryterium. Przyczyna takiego podejścia leży w złożoności otaczającego świata i wielowymiarowości ludzkiego postrzegania. Człowiek

w swojej naturze dąży do maksymalizacji swojego zadowolenia we wszystkich możliwych aspektach [127].

W związku z powyższą motywacją, w rozprawie skoncentrowano się na **wielokryterialnym podejściu do wspomagania decyzji**. Rozważane metody uwzględniają wiele celów rozważanej decyzji i wspomagają decydenta w podjęciu najlepszej decyzji według wyznawanych przez niego wartości. Narzędzie wspomagające ma również za zadanie ułatwić decydentowi określenie jego wag dla różnych kryteriów.

Metodami wielokryterialnymi określane są **metody konstrukcji rankingu, wyboru lub klasyfikacji** uwzględniające istnienie wielu kryteriów podlegających optymalizacji. Polega ona na stworzeniu spójnej rodziny kryteriów umożliwiającej wyznaczenie preferencji dla rozważanych akcji. Analizując warianty decyzyjne z perspektywy wielu kryteriów, optymalizacja pozwala na wyznaczenie wariantu sprawnego, co oznacza, że nie istnieje żaden inny wariant, który byłby lepszy względem jednego kryterium i nie gorszy względem pozostałych [126, s. 232].

Wielokryterialność modelu wynika z istnienia więcej niż jednego celu. Badania operacyjne definiują ten problem jako zagadnienie programowania matematycznego w postaci przedstawionej za pomocą wzoru (2.1) [135]:

$$\begin{array}{c} \max \text{ lub } \min \ \{f_1(x) = z_1\} \\ \vdots \\ \max \text{ lub } \min \ \{f_k(x) = z_k\} \\ x \in S \end{array} \tag{2.3}$$

Wielokryterialny problem decyzyjny może zostać zapisany również w następującej formie:

$$\begin{array}{ll} \min & \left(c_1^T x, c_2^T x, \ldots, c_p^T x\right)^T \\ \text{dla} & a_1^T x \leqslant b_i, \ i = 1, 2, \ldots, m_1, \\ & a_i^T x = b_i, \ i = m_1 + 1, \ldots, m, \\ & x \geqslant 0, \end{array} \tag{2.4}$$

gdzie $c_k = (c_{k1}, c_{k2}, \ldots, c_{kn})^T$, $k = 1, 2, \ldots, p$ i $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \ldots, a_{in})^T$, $i = 1, 2, \ldots, m$ są stałymi wektorami, a b_i, $i = 1, 2, \ldots, m$ są stałymi, $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^T$ jest wektorem zmiennych decyzyjnych. Rozwiązaniem zadania jest „rozwiązanie sprawne" $\bar{x}$, będące rozwiązaniem możliwym/realnym takim, że nie istnieje żadne x, dla którego spełnione jest $c_k^T x \leqslant c_k^T \bar{x}$, $k = 1, 2, \ldots, p$, przy czym co najmniej jedna nierówność jest ostra [68].

Informacja preferencyjna definiująca relację porządkową może być konstruowana przy pomocy jednej z wymienionych poniżej technik [96]:

— skale porządkowe — zgodnie z **regułą przeważania** (zasada Pareto) określają, że alternatywa x jest bardziej preferowana niż alternatywa y, gdy nie istnieje żaden atrybut, którego wartość alternatywy x jest mniej preferowana niż alternatywy y, oraz istnieje co najmniej jeden atrybut, którego wartość alternatywy x jest bardziej preferowana niż alternatywy y;

— uporządkowany ranking ważności kryteriów — polega na selekcji podzbioru alternatyw o najlepszych wartościach dla kryterium o dominującej ważności, a następnie powtarzaniu tej operacji dla kolejnych kryteriów według ich ważności;

— wzajemne porównania rzeczywistych par alternatyw — bezpośrednie porównania par alternatyw, w przypadku dokonania porównań w całym zbiorze alternatyw możliwa jest konstrukcja kompletnego rankingu wariantów decyzyjnych;
— kompromisy porządkowe — polega na zadaniu serii pytań decydentowi w celu ocenienia, do jakiego stopnia jest on skłonny na kompromis dla rozważanych kryteriów.

Stąd opracowane zostało podejście do wielokryterialnej agregacji, zwane też **Procedurą Agregacji Wielokryterialnej** (**MCAP** — MultiCriteria Aggregation Procedure). Procedura ta dla każdej pary alternatyw dokonuje rozwiązania problemu agregacji [127].

Wynikiem agregacji kryteriów jest układ relacji preferencji wariantów decyzyjnych, który może mieć postać ostrą lub rozmytą. Celem ustanowienia relacji preferencji jest zdefiniowanie wzajemnej kolejności pomiędzy alternatywami, w celu następnego ich uporządkowania tychże na etapie eksploatacji wielokryterialnej [114].

Dwa zasadnicze podejścia do modelowania decyzji różnią się podejściem do ustalania preferencji alternatyw. Podejście pierwsze oparte jest o **agregację** kryteriów i zakłada znajomość *a priori* modelu agregacji kryteriów, podczas gdy globalna preferencja wariantów nie jest znana. Drugie podejście wnioskuje postać modelu preferencji na podstawie **de-agregacji** preferencji globalnych [134].

Wynikiem procesu agregacji jest model preferencji globalnej, stanowiący w istocie relacyjny system preferencji na zbiorze A wariantów decyzyjnych. Roy definiuje w [126, s. 240] problem agregacji ocen w postaci: *„na podstawie jakich informacji międzykryterialnych i za pomocą jakich reguł można przypisać parze wektorów ocen $(g(a), g(a'))$ jedną i tylko jedną z podstawowych lub zgrupowanych sytuacji preferencyjnych? W szczególności, w jakich przypadkach jest uzasadnione (przy uwzględnieniu progów, dostępnych informacji międzykryterialnych, itp.):*

— *wprowadzenie przewyższania lub równoważności, jeżeli nie zachodzi dominacja;*
— *przekształcenie dominacji na preferencję silną, preferencję słabą, równoważność, itp.*
— *zdobywanie informacji międzykryterialnych bardziej kompletnych i bardziej precyzyjnych w celu zredukowania sytuacji nieporównywalności i lepszego uzasadnienia dominacji?"*

Rozwiązanie wymienionego problemu dokonane jest przez analityka poprzez opracowanie stosownej **koncepcji agregacji**. Koncepcja powstaje w wyniku dokonania wyborów w szeregu płaszczyzn, w tym: w warstwie formalnej (typy relacji preferencji i operatory ich agregacji), w warstwie informacyjnej (pozyskiwanie informacji międzykryterialnej) i w warstwie dopuszczalnych stopni niejednoznaczności i nieporównywalności informacji preferencyjnej [126, s. 240].

Podejście agregacji/de-agregacji oparte jest o kognitywną analizę procesów myślowych decydenta. Analiza ocen decydenta pozwala na odtworzenie jego systemu wartości, a także na uzyskanie dokładniejszej informacji od decydenta poprzez jego głębsze uświadomienie sobie kształtu sytuacji decyzyjnej [134].

Decydent lub analityk wprowadzający **próg nierozróżnialności** i **próg preferencji** dokonują reorientacji procesu decyzyjnego ze zorientowanego na kryteria – na proces pseudokryterialny. Roy [126, s. 196] określa **pseudokryterium** jako: *„...funkcję kryterialną g, z którą są związane dwie funkcje progowe $q_g[g(a)]$ i $p_g[g(a)]$, spełniające..."* zależności ze wzorów:

$$\forall a, b \in A, \qquad \frac{q_g[g(a)]-q_g[g(b)]}{g(a)-g(b)} \geqslant -1 \qquad i \quad \frac{p_g[g(a)]-p_g[g(b)]}{g(a)-g(b)} \geqslant -1 \tag{2.5}$$

takie, że $\forall a,\ a' \in A$:

$$g(a') \geqslant g(a) \Rightarrow \begin{cases} a' I_g a, & \text{jeżeli } g(a') - g(a) \leqslant q_g\left[g(a)\right] \\ a' Q_g a, & \text{jeżeli } q_g\left[g(a)\right] < g(a') - g(a) \leqslant p_g\left[g(a)\right] \\ a' P_g a, & \text{jeżeli } p_g\left[g(a)\right] < g(a') - g(a) \end{cases} \tag{2.6}$$

następujące:

— Zasada zrozumiałości — Składniki $\Gamma(A)$ powinny ujmować w sposób możliwie bezpośredni wszystkie konsekwencje, tak jak uczestnicy wyobrażają je sobie lub są w stanie je zrozumieć w ścisłym związku ze skalami preferencji.
— Zasada uniwersalizmu — Składniki te powinny być powiązane z wymiarami odzwierciedlającymi to, co jest podstawowe i jednomyślne w ocenie preferencji dotyczących wariantów ze zbioru A.
— Zasada niezawodności — Model $\Gamma(A)$ powinien wyraźnie ukazać stopień niezawodności (poziom dokładności, znaczenia, ważności) swoich najważniejszych składników w zależności od rozpatrywanego wariantu a.

Rozważając przewyższanie jednego wariantu decyzyjnego nad drugim jedynie z perspektywy stopnia zgodności wartości kryteriów z relacją przewyższania, jest podejściem powierzchownym. Do pogłębienia rozważań wprowadzono testy **niezgodności** z powyższym twierdzeniem. Kryteria niezgodne z relacją przewyższania określane są jako opozycja. Dla pewnych kryteriów możliwe jest określenie progu wartości, którego przekroczenie powoduje zawetowanie relacji przewyższania [126, s. 237].

2.2. Wytyczne dla selekcji metody odpowiedniej do danej sytuacji decyzyjnej

Techniki agregacji wielu kryteriów stosowane w metodach **MCDA/MCDM** (Wielokryterialnej Analizy Decyzji / Wielokryterialnego Podejmowania Decyzji) zgrupowane są w trzy następujące modele technik agregacji [135]:

— forma relacyjna (oznaczona w niniejszej pracy symbolem Φ_r), oparta na **relacji przewyższania**;
— forma funkcyjna (oznaczona w niniejszej pracy symbolem Φ_f), oparta na **funkcji użyteczności**;
— forma symboliczna (oznaczona w niniejszej pracy symbolem Φ_s), oparta na **regułach decyzyjnych**.

Zadaniem analityka jest utworzenie modelu decyzyjnego na podstawie wewnętrznej struktury preferencji decydenta. Model decyzyjny odzwierciedla wzajemne relacje pomiędzy atrybutami, a nie model użyteczności decydenta. Addytywność atrybutów wynika ze wzajemnej niezależności atrybutów, natomiast funkcja preferencji/wydajności jest wynikiem wpływu zmian wartości atrybutu na preferencje danej alternatywy. Analityk dokonuje serii odpytań decydenta w celu zdeterminowania wzajemnej niezależności atrybutów.

Dostępna jest literatura przedstawiająca zastosowanie konkretnej metody do rozwiązania wybranego problemu decyzyjnego. Prezentowane prace te często dokonują dokładnej analizy aspektów dziedzinowych wybranego problemu, oraz przedstawiają uzasadnienie wyboru wybranej metody. Świadczy to o wykonaniu przez badaczy dogłębnej analizy

problemu oraz zasobu dostępnych metod w celu wyboru metody najlepiej odpowiadającej charakterowi problemu. Analiza ta oparta jest na wybranej grupie czynników oraz na wynikach badań empirycznych.

Pomimo znaczącej ilości prac poświęconych dopasowaniu metody do problemu, ilość literatury poświęconej wyłącznie zagadnieniu wpływu doboru metody wielokryterialnej na rezultat procesu wspomagania decyzji jest znacznie uboższa. Istnieje grupa prac dokonujących rozwiązania tego samego problemu przy pomocy kilku metod, jednak **brak jest systemowego podejścia do wpływu doboru metody na trafność rekomendacji**. Wynika to częściowo z trudności zdefiniowania pojęcia „trafność rekomendacji". Stąd koncentracja wysiłków na metodycznym aspekcie doboru metody.

Istniejące zestawienia dopasowania metody wielokryterialnej bazują na analizie następujących aspektów problemów decyzyjnych:

— przedmiot sytuacji decyzyjnej,
— charakterystyka kryteriów,
— charakterystyka i źródła atrybutów,
— typ sformułowań decydenta dla ważności i preferencji.

2.2.1. Metody oparte o relację przewyższania — szkoła europejska

Wartość wynikowa globalnej preferencji $u(x)$ określa stopień preferencji alternatywy x przez decydenta. Relację przewyższania alternatywy x nad alternatywą y opisuje stwierdzenie „alternatywa x jest preferowana względem alternatywy y", co oznacza się symbolicznie przez $x \succeq y$. Test na prawdziwość relacji $\succeq$ przedstawia wzór (2.7) [49].

$$\forall x, y \in X \ , \ x \succeq y \Leftrightarrow \ u(x) \geqslant u(y) \tag{2.7}$$

Określanie **preferencji częściowej**, oznaczającej preferencję jednego z wariantów w aspekcie kryterium i, oznaczane jest przez $\succeq_i$ i twierdzenie $x \succeq_i y$ oznacza, że biorąc pod uwagę wyłącznie punkt widzenia kryterium i, wariant x jest „częściowo preferowany" względem wariantu y [49].

Zastosowanie wzajemnych porównań (w parach) ograniczone jest możliwościami ludzkiego umysłu, którego budowa nnie pozwala człowiekowi na dokonanie wiarygodnych porównań pomiędzy sobą bardzo dużych i bardzo małych liczb. Podobny problem występuje przy wartościach nienumerycznych, usytuowanych na skali porządkowej lub przedziałowej. Stąd metody wykorzystujące wzajemne porównania dokonywane przez decydenta stosowane są w przypadkach, gdy alternatywy decyzyjne charakteryzują się zbliżonymi wartościami atrybutów oraz gdy porównywanie dokonywane jest pomiędzy wartościami leżącymi na zgodnych skalach (tych samych skalach) [130].

Najbardziej znanymi metodami opierającymi swoje działanie o relacje przewyższania są rodziny metod ELECTRE i PROMETHEE [135].

Początkiem dynamicznego rozwoju badań nad metodami opartymi o relację przewyższania było opracowanie metody ELECTRE (**ELimination Et Choix Traduisant la REalité**) w 1965 roku (nazwanej wówczas MARSAN — Méthode d'Analyse, de Recherche, et de Sélection d'Activités Nouvelles) [42]. Metoda ta stanowi centrum całego podejścia opartego na relacjach przewyższania. Istotą metod z rodziny ELECTRE jest modelowanie systemu preferencji przy pomocy binarnych relacji przewyższania aSb osobno dla każdego kryterium. Wspomniana relacja może przyjmować jeden z następujących

czterech stanów [42]: stan ścisłej preferencji a nad b (aPb), stan ścisłej preferencji b nad a (bPa), stan nierozróżnialności a od b (aIb) oraz stan nieporównywalności pomiędzy a i b (aRb). Szkoła Roy'a bazuje na identyfikacji reguł zgodności i niezgodności pomiędzy rozważanymi stanami.

Opracowanie pierwszej metody **ELECTRE** dość szybko wykazało niedogodności związane z jej praktycznym zastosowaniem, oraz stanowiło motywację do opracowania kolejno: nieoficjalnej wersji uwzględniającej współczynnik weta – ELECTRE Iv [42], wersji uwzględniającej niedoskonałość danych – ELECTRE IS [42], metody porządkowania alternatyw od najlepszej do najgorszej – ELECTRE II [42], metody operującej na pseudokryteriach i rozmytej relacji przewyższania – ELECTRE III [42], metody tworzącej ranking bez użycia względnych współczynników ważności, za to ze zintegrowaną strukturą relacji przewyższania, ELETRE TRI [42, 97], której przeznaczeniem jest sortowanie alternatyw do wyznaczonych *a priori* kategorii[1] [44, 42].

Metody rodziny ELECTRE są szeroko aplikowane zarówno w praktyce, jak i w rozważaniach akademickich. Wybrane zastosowania metod opisuje przywołana poniżej literatura: ELECTRE — [7, 4, 2], ELECTRE II — [7, 64], ELECTRE III — [10, 73, 61, 93, 74, 15], ELECTRE IV — [61, 133],

Kolejna rodzina metod **PROMETHEE** bazuje na obliczeniu wspólnego balansu negatywnego i pozytywnego strumienia przewyższania, oraz na zastosowaniu teorii grafów. W skład grupy metod PROMETHEE wchodzą metody: PROMETHE I [8, 12] — ranking częściowy, PROMETHE II [8, 73, 12] — ranking kompletny, PROMETHE III [12] — ranking odstępów, PROMETHE IV [12] — przypadki ciągłe i analiza wrażliwości, PROMETHE [12] — MCDA z ograniczeniami, PROMETHE GDSS [12] — grupowe podejmowanie decyzji[2], PROMETHE V [12] — ograniczenia segmentacji, PROMETHE VI [12] — reprezentacja ludzkiego umysłu,

W metodach tej rodziny zastosowany trzy rodzaje relacji: stan ścisłej preferencji a nad b (aPb), stan nierozróżnialności a od b (aIb) oraz stan nieporównywalności pomiędzy a i b (aRb). Szerzej o warunkach przypisania relacji do jednego z wymienionych stanów w [12]

Zastosowanie metod PROMETHEE jest powszechne z powodu względnej ich prostoty. Aplikacje metod przedstawione są szerzej w literaturze: PROMETHEE I w [39], a PROMETHEE II w [73, 48].

Wspomaganie decyzji przy pomocy metod PROMETHEE może być uzupełnione o bardzo efektywną metodę wizualizacji GAIA [12] oraz o analizę wrażliwości PROMETHEE IV [12].

Metoda PROMETHEE nie dopuszcza kompensacji pomiędzy kryteriami, nie jest również przeprowadzana hierarchizacja problemu decyzyjnego. W metodzie tej nie ma żadnych wytycznych dla określania wag kryteriów [142].

Rozwiązywanie problemu przy pomocy różnych metod dostarcza różnych wyników także w sytuacji zastosowania tak zbliżonych do siebie metod, jak ELECTRE TRI i PROMETHEE TRI [8].

Aczkolwiek metody z rodzin ELECTRE i PROMETHEE są najczęściej stosowane,

[1] Z tego powodu metoda ta wykracza poza zakres rozważań w niniejszej pracy i nie będzie włączana do dalszych rozważań. Gdziekolwiek w pracy użyte zostało twierdzenie „rodzina metod ELECTRE", dotyczy ona rozważanego w pracy zakresu metod ELECTRE: I, IS, Iv, II, III, IV.

[2] Zagadnienie to wykracza poza zakres rozprawy.

istnieje grupa innych, mniej popularnych metod, które w większości bazują na głównej idei zaczerpniętej z metod ELECTRE. Wspomniane metody, to [89]: QUALIFLEX — dokonująca porównania wartości dla wszystkich możliwych permutacji rankingu, REGIME — oparta na analizie przewyższania i macierzy dominacji (reżimu), ORESTE — stosująca niezależne rankingi dla kryteriów oraz dla alternatyw względem każdego z kryteriów, ARGUS — rzutująca stopniowaną preferencję na skalę porządkową, EVAMIX — stosująca uogólnienie analizy zgodności dla mieszanej informacji odnośnie porównania alternatyw względem kryteriów, TACTIC — stosująca udział kryteriów rzeczywistych i pseudo-kryteriów z wymaganiem odnośnie poziomu zgodności, MELCHIOR — stosująca pseudokryteria oraz wzajemną relację *„jest co najmniej tak ważny, jak...”*, zamiast globalnych wag kryteriów.

Inna metodologia służąca jako podstawa do opracowania całej grupy alternatywnych metod opartych o zasadę przewyższania, to podejście PCCA (**Pairwise Criterion Comparison Approach**), dzielące konstrukcję relacji przewyższania na dwa etapy: etap podziału na klastry kryteriów do ewaluacji (indeks rozmytej preferencji binarnej) i etap agregacji indeksów cząstkowych (indeks globalny wyraża rozmyte preferencję dla par alternatyw). Na podejściu PACCA bazują następujące metody [89]: MAPPAC — wprowadzająca szczegółowy schemat dla wartości indeksów zgodności dla warunku przewyższania; PRAGMA — metoda sytuowana na pograniczu metod opartych o relacje przewyższanie i metod opartych o funkcje użyteczności, bazuje w dużej mierze na metodzie MAPPAC, jednakże wprowadza pojęcie „częstotliwości rankingu”; IDRA — stosująca mieszaną funkcję użyteczności i tolerancję spójności powiązanej; PACMAN — badająca zachowanie decydenta wobec wzajemnie kompensujących się kryteriów.

Metoda MACBETH jest metodą interaktywną, polegającą na odpytywaniu decydenta z jego preferencji odnośnie prezentowanych par metod w kolejności od najatrakcyjniejszej do najmniej atrakcyjnej [44, 37].

Metoda ZAPROS [44] wykorzystuje porównania jakościowe decydenta do konstrukcji częściowych porządków na możliwie największych zbiorach alternatyw; wadą tej metody jest konstrukcja rankingu częściowego i brak gwarancji otrzymania kompletnego rankingu.

Metody oparte o porównania par alternatyw są wrażliwe na dodawanie nowych elementów do zbioru alternatyw A. Wynika to ze wzajemnej zależności alternatyw, stąd nowa alternatywa w zbiorze może zmienić oceny wzajemnych porównań pomiędzy pewnymi parami alternatyw. W celu zapobieżenia zmianom w ocenach preferencji stosowane jest umieszczanie w zbiorze A wariantu idealnego, a następnie uniemożliwienie zmiany wartości tego wariantu. Rozwiązanie to pozwala na ustalenie skali odniesienia dla ocen wartości kryteriów/atrybutów [130].

Rankingowy charakter metod ELECTRE, w szczególności demokratyczna zasada większości decydująca o przewyższaniu wariantów w przypadku wsparcia koalicji i braku silnej opozycji, nie sprzyja stosowaniu tych metod do indywidualnej oceny produktów. Metody ELECTRE są jednakże stosowane do oceny rozważanych usprawnień produktu [78].

2.2.2. Metody oparte o funkcję użyteczności

Wieloatrybutowa teoria użyteczności (**MAUT** — Multiattribute Utility Theory), to zestaw reguł i aksjomatów, na których bazuje szereg metod wspomagających podejmowanie decyzji. Metody te oparte są o różne modele preferencji, z czego najpopularniejsze

są modele addytywne i multiplikatywne, i dążą one do odnalezienia alternatywy o najbardziej zbliżonym do optymalnego bilansie wartości kryteriów. Zasadniczym założeniem metod opartych o funkcję użyteczności jest możliwość modelowania problemu decyzyjnego przy pomocy funkcji o wartościach w postaci liczb rzeczywistych, która może być maksymalizowana względnie minimalizowana [35, 44].

Metoda hierarchicznej analizy procesu (**AHP**), opracowana przez Saaty'ego, opiera się na trzech zasadniczych przesłankach: przedstawienie złożonej struktury problemu w postaci hierarchii celów, kryteriów i alternatyw; porównanie parami elementów na każdym poziomie hierarchii; synteza ocen ze wszystkich poziomów hierarchii [44, 128, 129].

Metoda AHP jest metodą addytywną, dokonującą całkowitej agregacji, co powoduje wzajemną kompensację kryteriów. Wynika z tego utrata, często istotnej, części informacji. Rozważając modelowanie problemu, istotnym elementem tej metody (co stanowi jej istotę) jest strukturalizacja (dekompozycja) problemu na hierarchię kryteriów. Wagi w metodzie AHP określane są przez wektor wartości własnych macierzy, a wartości atrybutów oraz wag są ograniczone do dziewięciostopniowej skali (skala Likerta); tymczasem zdarzają się sytuację wymagające bardziej rozbudowanej skali [142].

Zastosowania metody AHP przedstawiają prace: [145, 22].

Metody typu **UTA** (UTilits Additives) bazują na minimalizacji błędu funkcji użyteczności przy pomocy modelu programowania liniowego. Metoda UTASTAR [134] dąży do minimalizacji rozkładu (rozproszenia) błędów, w metodzie UTADIS [134] natomiast wyznaczono dwie wartości błędu: ρ_k^+ i ρ_k^- oznaczające odpowiednio naruszenie dolnego i górnego krańca funkcji użyteczności grupy alternatyw przez k-ty wariant decyzyjny. UTADIS I [134] zakłada różne kryteria optymalności przy tworzeniu addytywnego modelu klasyfikacji wartości, UTADIS II [134] opiera się na minimalizacji liczby źle sklasyfikowanych alternatyw, UTADIS III [134] dokonuje równoczesnej minimalizacji źle sklasyfikowanych alternatyw oraz maksymalizacji miary dobrej klasyfikacji (odległości alternatyw od progów wartościowych).

Metoda SMART dokonuje oceny wydajności alternatyw poprzez wybór wartości z przedziału pomiędzy najgorszą (rzeczywistą lub urojoną) alternatywą a najlepszą (rzeczywistą lub idealną). Zaletą tej metody jest wzajemna niezależność wartości alternatyw [44].

Metoda TOPSIS [44] dokonuje sortowania alternatyw względem ich podobieństwa do najbardziej preferowanego wariantu; podobieństwo determinowane jest na podstawie minimalizacji dystansu do najbardziej pożądanego wariantu i maksymalizacji dystansu do najbardziej niepożądanego. Zastosowania metody TOPSIS przedstawiono w [81, 24].

Konstrukcja multiplikatywnego modelu użyteczności jest zadaniem złożonym i dzieli się na dwa podstawowe etapy. Pierwszym etapem jest ocena częściowych użyteczności $u_i(Z_i)$ poprzez prosty wybór atrybutów (loteria), drugim etapem jest szacowanie parametrów, co wymaga dokonania ocen preferencji przez decydenta [136]. Zadaniem analityka budującego model addytywny dla MAUT jest utworzenie funkcji użyteczności odpowiadającej użytecznościom decydenta. Decydent może mieć na myśli własny układ użyteczności przedmiotu decyzji, który może być multiplikatywny. Stąd, analityk dokonując serii odpytywań determinuje układ wzajemnych preferencji pomiędzy przykładowymi alternatywami (generowanymi syntetycznie) i konstruuje addytywny model użyteczności, wykorzystując odpowiednie transformacje dla funkcji wydajności poszczególnych kryteriów [35]. Kształt funkcji użyteczności, lub ogólniej modelu sytuacji decyzyjnej, zde-

terminowany jest nie tylko przez preferencje decydenta, na podstawie których może być niemożliwe ocenienie tego parametru, ale też przez samą sytuację decyzyjna. Wiąże się to z ogólnie przyjętymi konwencjami, które dla konkretnej sytuacji mogą być wprowadzone przez ekspertów dziedzinowych.

2.3. Badania nad stosowaniem wielu metod w jednym modelu decyzyjnym

Zastosowanie więcej niż jednej metody do rozwiązania zadanego problemu decyzyjnego najczęściej przedstawiane jest jako narzędzie do porównania lub sprawdzenia wyników. Celem dokonania sprawdzenia jest utrzymanie tezy o słuszności otrzymanej rekomendacji lub jej podważenie celem wykonania dalszych analiz. Dostępna jest również literatura dotycząca łącznego zastosowaniu dwóch lub więcej metod na różnych etapach procesu decyzyjnego [93, 38, 111, 95, 29]. Natomiast literatura na temat metod hybrydowych, łączących zastosowanie kilku metod do rozwiązania problemu decyzyjnego, jest ograniczona [12, 142].

W szczególności, zastosowanie łączenia relacji przewyższania oraz funkcji użyteczności przestawia praca [29], w której opisano wspomaganie decyzji wyboru dostawcy usług outsourcingu przy pomocy połączenia metod ELECTRE i MAUT. W przykładzie tym preferencje decydenta odnośnie każdego kryterium modelowane są jako osobna funkcja użyteczności. Stąd, tworzona jest taka liczba funkcji użyteczności, ile jest celów do maksymalizacji dla planowanego kontraktu (kryterium kosztu, czasu i pewności dostawy). Obliczone wartości funkcji użyteczności poddawane są następnie procesowi decyzyjnemu ELECTRE.

Wysoka skuteczność metody TOPSIS w środowisku deterministycznych i namacalnych danych wiąże się z potrzebą dostarczenia efektywnej procedury odkrywania względnych ważności dla różnorodnych atrybutów pod kątem obranego celu. Procedurę taką zawiera metoda AHP, której mocną stroną jest wspomaganie ustalania priorytetów dla cech namacalnych, jak i nienamacalnych. Wadą tej metody jest konieczność dokonania znacznej liczby porównań w niektórych przypadkach [122].

W pracy [12] przedstawiono kombinację metody PROMETHEE II i Zadania Programowania Liniowego (ZPL), wykorzystanego w celu rozwiązania problemu MCDA z ograniczeniami. Ranking wynikowy metody PROMETHEE II wraz ze strumieniami netto $\phi(a_i), i = 1, 2, 3, \ldots, n$, jest wykorzystywany do konstrukcji binarnego ZPL z ograniczeniami. Wynikiem rozwiązania ZPL jest zbiór alternatyw spełniających ograniczenia i zapewniających maksymalną wartość przepływu ϕ. Zastosowanie kombinacji metod (metoda hybrydowa) wyboru strategii outsourcingu systemu informatycznego przedstawiono w [142]. Problem został zdekomponowany do postaci wielopoziomowej hierarchii przy pomocy metody AHP, następnie zastosowano metodę PROMETHEE do sporządzenia rankingów alternatyw dla każdego kryterium. Ostatnim etapem doświadczenia jest analiza wrażliwości przy pomocy metody GAIA.

Dostępny zakres literatury na temat wspomagania decyzji obejmuje zarówno pozycje praktyczne, nakierowane na efektywne podejmowanie decyzji codziennych, poradniki gospodarcze dla menedżerów podejmujących decyzje w organizacjach, jak i pozycje meto-

dyczne z zakresu teorii zarządzania, a także techniczne analizy zastosowań różnych metod wspomagających podejmowanie decyzji. W niniejszym rozdziale skoncentrowano się na pozycjach dotyczących matematycznych podstaw istniejących metod wielokryterialnego wspomagania decyzji. Scharakteryzowano te metody zarówno pod względem istoty ich działania, jak i praktykowanych zastosowań. Dokonany przegląd pozwala na wyciągnięcie wniosków o różnicach nie tylko w głównych podejściach do wspomagania decydenta w procesie decyzyjnym, ale też o różnicach pomiędzy poszczególnymi metodami. Zasadniczo różnice te wynikają z różnych sytuacji, które stanowiły bodziec dla opracowania danej metody. Często metoda stanowiła odpowiedź na konkretną praktyczną potrzebę. Zasadniczym celem wielokryterialnych metod wspomagania decyzji jest dostarczenie decydentowi wiarygodnej informacji o wzajemnym przewyższaniu alternatyw w sytuacji, gdy ich wzajemna relacja jest różna dla różnych kryteriów. Na przykład, porównując wydajności alternatyw a i b, dla części kryteriów wariant a wykazuje lepsze wartości, a dla pozostałych kryteriów będzie to wariant b [127].

Za nadrzędny cel metod **MCDA** przyjmowane jest udzielenie pomocy decydentowi w podejmowaniu „lepszych" decyzji. Samo pojęcie „lepsze" nie jest jednak możliwe do zdefiniowania. W [127] określono znaczenie tego pojęcia jako element względny i zależny od obranej techniki wspomagania. Podsumowano też, że nie jest możliwe obiektywne i naukowe wykazanie, że dana decyzja jest „lepsza", niż inna. Istotnym elementem analizy jakości podjętej decyzji jest fakt, iż przy ocenie rezultatów często brane są pod uwagę czynniki nie wyspecyfikowane „a priori" w procesie wyboru decyzji, a także czynniki wynikowe implementacji wybranego wariantu decyzyjnego, które znajdowały się poza dziedziną opisu tego wariantu. Ważnym, a często nie wspominanym aspektem wielokryterialnego wspomagania decyzji jest fakt, że całkowita jakość procesu wielokryterialnego jest uzależniona nie tylko od przebiegu modelowania i przeprowadzonych obliczeń, ale w znacznie większym stopniu od dopasowania procesu do zewnętrznych uwarunkowań społecznych, politycznych oraz technicznych [98]. Podstawy teoretyczne wielokryterialnego wspomagania decyzji pozwalają na dokonanie oceny dopasowania schematu postępowania do racjonalności wnioskowania człowieka. Wynika to z faktu, że w przypadku decyzji w organizacjach decydent podejmuje decyzje reprezentując szersze grono uczestników. Tworzy to wymóg dla zdolności do uzasadnienia i umotywowania podjętej decyzji poprzez sformalizowany algorytm postępowania [35].

3. Nieostra informacja decyzyjna

W naukach ścisłych dominują obliczenia oparte na liczbach – empiryczne podejście do otaczającego świata zdeterminowało relacje badacza z badanymi przedmiotami (podmiot–przedmiot). Założenia poczynione przy opracowaniu fundamentów tego podejścia uważane były za podstawową metodologię badań we wszystkich obszarach/dziedzinach nauki. Podejście to wymaga stabilnej rzeczywistości, precyzyjnych danych i zdefiniowanej struktury badanego procesu. Człowiek postrzegany jest jako złożony mechanizm systemów kontrolujących jego działania (stan homeostazy). Stąd, następuje rozwój metod statystycznych i ilościowych w badaniu zjawisk otaczającego świata [105].

Nauki humanistyczne natomiast oparte są o mające swoje korzenie w post modernizmie humanistyczne objaśnianie zjawisk. Symboliczna analiza otaczającego świata i próby zrozumienia i wyjaśnienia – zamiast modelowania i obliczania – oparte są na relacji podmiotowej (podmiot–podmiot) pomiędzy badaczem i badanymi przedmiotami. Otoczenie postrzegane jest zgodnie z jego nieprecyzyjną naturą i z uwzględnieniem kontekstu badanych elementów. Człowiek postrzegany jest jako indywiduum posiadające intencję i jest czymś więcej niż sumą elementów składowych (podejście holistyczne). Badanie otaczającego świata oparte jest na kwestionariuszach w języku naturalnym, zbieraniu materiału źródłowego w naturalnej postaci (obraz, dźwięk) i danych „miękkich" [105].

Działania człowieka często oparte są o logikę. Pojęcie to jednakże bywa nadużywane, szczególnie w kontekście zachowań i podejmowanych decyzji. Najczęstszym błędem jest utożsamianie „logiki" z „racjonalnością". Człowiek zachowuje się „racjonalnie", gdy działa na swoją korzyść [107]. Szczególnym przykładem jest „racjonalność ekonomiczna" [88, s. 26], polegająca na takim działaniu, aby pozyskać maksymalny efekt przy minimalizacji zaangażowania zasobów. Człowiek w swoich dzialaniach kieruje się na przemian logiką i intuicją, która pozwala operować w niedokładnie opisanym i niedookreślonym świecie.

Tendencją obecną w badaniach nad rzeczywistością jest postrzeganie zjawisk przez pryzmat ich prawdopodobieństwa. Modelowanie wielu aspektów rzeczywistości, a w szczególności prognozowanie, wymaga uwzględnienia rachunku prawdopodobieństwa w przeprowadzanej analizie. Wiąże się to jednakże z trudnością oszacowania niektórych prawdopodobieństw. Stąd rozwinięty został obszar badań nad obliczeniami przy użyciu nieprecyzyjnych prawdopodobieństw, co prowadzi do powstania kolejnego problemu, jakim jest znaczny wzrost złożoności obliczeniowej dla takiego podejścia [153].

Rzeczywistość otaczająca człowieka dostarcza często minimalny i niewystarczający zasób informacji do podejmowania decyzji. Stąd, działanie pewnej osoby, w jej rozumieniu „racjonalne", może nie mieć cech zachowania „logicznego" w postrzeganiu obserwatora. Dowodzi to niewystarczalności klasycznie pojmowanej „logiki" dla opisania rzeczywistych zjawisk. Uwzględnienie niedomówień, niedokładności danych i nieuchwytnej/nieopisywalnej informacji wymaga zastosowania innych metod, niż klasyczna logika Boula. W odpowiedzi na te niedogodności powstały takie podejścia, jak: intuicjonizm, logika niemonotoniczna, wnioskowanie prawdopodobieństw, które mają na celu znalezienie

dobrego (ale niekoniecznie najlepszego) rozwiązania w sytuacji ograniczonej dostępności danych [103].

Modelowanie rzeczywistości przy pomocy wartości liczbowych okazało się niewystarczające przy modelowaniu wielu zjawisk. Na główne przyczyny tego niedostatku składa się ciągły charakter wielu zjawisk i płynność ludzkiej preferencji. Niewielkie różnice w wartościach są dla człowieka nieistotne, podczas gdy każda różnica pomiędzy dwoma wartościami liczbowymi determinuje prawdziwość relacji większości. Również zebrane dane charakteryzujące wiele zjawisk są jednie przybliżone, stąd wszelkie operacje i porównania powinny zachować ten charakter. Dokonanie skwantyfikowanych obliczeń na danych pozyskanych z niską dokładnością powoduje zafałszowanie charakteru tych danych.

Powstałe w ten sposób błędy odwzorowań propagowane są przez cały proces obliczeniowy, co skutkuje błędnym wynikiem wspomagania decyzji i podjęciem decyzji na podstawie błędnej rekomendacji. Błędy kwantyfikacji zajść mogą również w sytuacji, gdy decydent jest zmuszany do wyrażenia swoich preferencji na skali liczbowej. Wyrażona w ten sposób preferencja nie oddaje naturalnego charakteru ocen decydenta, który wiąże się z różnymi odstępami pomiędzy ocenami a także różnicami w ocenie tych samych parametrów w zależności od ocenianego przedmiotu.

Powyższe nieścisłości są szczególnie istotne w modelowaniu zjawisk bezpośrednio związanych z odczuciami człowieka (decydenta). Wybór lokalizacji do zamieszkania lub pracy, wybór samochodu lub innego produktu do zakupu przez człowieka niemal w każdym przypadku wiąże się z uwzględnieniem kryterium wyglądu. Jest to kryterium całkowicie subiektywne i nie poddające się kwantyfikacji. Co więcej, ocena różnych obiektów rzutuje na kształt skali zastosowanej do oceny dostępnych wariantów.

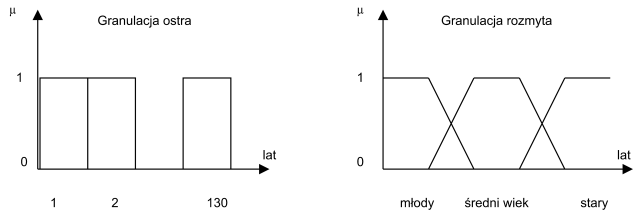
Uniwersalna maszyna Turinga wprowadziła formalizację podejścia do algorytmów i obliczeń, która zdeterminowała rozwój całej dziedziny obliczeń komputerowych. Podejście to pozwoliło odnieść sukces rozbudowanym maszynom liczącym (komputerom), jednakże początek badań nad budową sztucznej inteligencji obnażył braki związane z tą architekturą. Naśladowanie działań ludzkiego umysłu, co stanowi cel badań nad stworzeniem „sztucznego mózgu", nie jest możliwe przy pomocy sformalizowanych algorytmów automatu skończonego (FST). Stąd rozwój „alternatywnych" technologii, do których należą między innymi: logika rozmyta, przetwarzanie „miękkie", teoria możliwości/posibilistyczności (possibility theory), inteligentni agenci, sieci neuronowe, systemy adaptatywne, systemy ekspertowe i różne techniki hybrydowe [44].

3.1. Teoria zbiorów rozmytych

Teoria zbiorów rozmytych jest odpowiedzią na nieostry charakter zjawisk zachodzących w świecie rzeczywistym. Wprowadzenie tej teorii zrewolucjonizowało modelowanie zjawisk poprzez rozszerzenie wartości o „stopień przynależności". Uwzględnienie stopnia przynależności i modelowanie tego stopnia przy pomocy „funkcji przynależności" różnych kształtów pozwoliło na lepsze (bliższe) odwzorowanie rzeczywistości.

Wprowadzenie pojęcia **granulacji** pozwala na rozróżnienie dostępnych danych pod względem ich szczegółowości. Dokonując takiego rozróżnienia, tworzy się dwie kategorie opisu świata: granulacja ostra i granulacja rozmyta. Na rysunku 3.1 przedstawiono przykład wartości danych dla cechy „wiek człowieka" z perspektywy granulacji ostrej i

rozmytej. Istotne jest nadmienienie, że również modyfikatory wartości, mające na celu doprecyzowanie odpowiedzi, są specyficzne dla obu wariantów. I tak dla ostrego opisu wieku doprecyzowanie polega na określeniu, ile dodatkowych miesięcy ponad ukończone lata ma oceniana osoba. Natomiast modyfikatory wariantu rozmytego dodają szacunkowe wzmocnienie lub osłabienie badanej cechy przy pomocy zwrotów: „bardzo", „nie bardzo" lub „dosyć" [153].



Rysunek 3.1: Granulacja ostra i rozmyta na przykładzie cechy „wiek człowieka"

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [153]

Liczba rozmyta A jest liczbą trójkątną, gdy opisana jest funkcją przynależności przedstawioną we wzorze (3.1) [44].

$$f_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leqslant x \leqslant b \\ \frac{x-c}{b-c}, & b \leqslant x \leqslant c \\ 0, & \text{dla pozostałych} \end{cases} \tag{3.1}$$

Dla zbioru rozmytego U na ciele liczb rzeczywistych $\mathbb{R}$, określonego jako $A : U \to [0,1]$, wyróżniono następujące pojęcia [131]:

Rdzeń zbioru $core(A) = \{x|A(x) = 1\}$

Wsparcie zbioru $supp(A) = \{x|A(x) > 0\}$

α-cięcie dla $\alpha \in \langle 0,1\rangle$ zdefiniowane jest jako $[A]_\alpha = A(x) = 1$ i jest wypukłe, gdy dla każdego $x, y, z : x \leqslant y \leqslant z$ zachodzi $A(y) \geqslant \min(A(x), A(z))$. Wykorzystanie algebry α-cięć do operacji na zbiorach lingwistycznych przedstawiono we wzorach (3.16)–(3.21).

T-norma jest operatorem $\top : [0,1]^2 \to [0,1]$ takim, że jest przemienny, asocjacyjny, monotoniczny i ma element neutralny 1

Relacja podobieństwa S na zbiorze U zachodzi, gdy rozmyta relacja binarna, na przykład przypisanie $S : U \times U \to \langle 0,1\rangle$, spełnia warunki jak we wzorze (3.2).

$$\begin{aligned} &\forall x \in U, S(x,x) = 1 \text{ (zwrotność)} \\ &\forall x, y \in U, S(x,y) = S(y,x) \text{ (symetria)} \end{aligned} \tag{3.2}$$

Przybliżenie zbioru A jest uogólnieniem relacji podobieństwa S oznaczanym przez $S \circ A$ i wyznaczana jest zgodnie ze wzorem (3.3).

$$(S \circ A)(x) = sup_{y \in U} min\,(S(x,y), A(y)) \tag{3.3}$$

Rodzina relacji podobieństwa $S = \{S_0, S_\infty\} \cup \{S_\beta\}_{\beta \in I \subseteq (0,+\infty)}$ taka, że:

1. $S_0 = S^\perp$,
2. $S_{+\infty} = S^\top$,
3. $\beta < \beta'$, wtedy $S_\beta \prec S_{\beta'}$.

gdzie $S \prec S'$ oznacza, że $S(x,y) \leqslant S'(x,y)$ dla każdego $x, y \in U$ i $S(x_0, y_0) < S'(x_0, y_0)$ dla pewnego $x_0, y_0 \in U$

Rzeczywista liczba rozmyta A opisana jest przez podzbiór rozmyty na osi liczb rzeczywistych $\mathbb{R}$ przez funkcję przynależności f_A spełniającą [44]:

(a) $f_A(x)$ jest ciągłym odwzorowaniem $\mathbb{R}$ na przedział $\langle 0, 1\rangle$,
(b) $f_A(x) = 0$, dla wszystkich $x \in (-\infty, a\rangle$,
(c) $f_A(x)$ jest ściśle rosnąca na $\langle a, b\rangle$,
(d) $f_A(x) = w$, dla wszystkich $x \in \langle b, c\rangle$,
(e) $f_A(x)$ jest ściśle malejąca na $\langle c, d\rangle$,
(f) $f_A(x) = 0$, dla wszystkich $x \in \langle d, +\infty)$,

gdzie a, b, c, d są liczbami rzeczywistymi.

Liczba rozmyta typu L-R jest to zbiór rozmyty $\tilde{a}$ zdefiniowany przez funkcję przynależności podaną we wzorze (3.4).

$$\mu_{\tilde{a}}(r) = \begin{cases} L\left(\frac{a^L - r}{\alpha}\right), & \text{jeżeli } r \leqslant a^L \text{ i } \alpha > 0, \\ 1, & \text{jeżeli } r \in \left\langle a^L, a^R\right\rangle, \\ R\left(\frac{r - a^R}{\beta}\right), & \text{jeżeli } r \geqslant a^R \text{ i } \beta > 0, \\ 0, & \text{w pozostałych przypadkach}, \end{cases} \tag{3.4}$$

gdzie $L, R : \langle 0, +\infty) \to \langle 0, 1\rangle$ są funkcjami odniesienia, a $\alpha, \beta \geqslant 0$ [68].

Oznaczając trapezoidalną funkcję przynależności przez $\tilde{M} = (m_l, m_u, \alpha, \beta)_{LR}$, niech wartości funkcji przynależności będą dane wzorem (3.5) [45].

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{dla } x \leqslant m_l - \alpha \text{ lub } m_u + \beta < x, \\ 1 - \frac{m_l - x}{\alpha}, & \text{dla } m_l - \alpha < x < m_l, \\ 1, & \text{dla } m_l \leqslant x \leqslant m_u, \\ 1 - \frac{x - m_u}{\beta}, & \text{dla } m_u < x \leqslant m_u + \beta, \end{cases} \tag{3.5}$$

Zdefiniowane zostały następujące operacje arytmetyczne na zbiorach przedstawionych we wzorze (3.5) [45, 112]: dodawanie, odejmowanie, odwracanie, mnożenie. Zakładając odwzorowanie zbioru rozmytego z trójkątną funkcją przynależności jako szczególny przypadek zbioru $\tilde{M}$, zachodzi wówczas: $m_l = m_u$. Liczba ostra n będzie również przedstawiona jako trapezoidalna liczba rozmyta, gdzie zachodzi: $n = m_l = m_u$ i $\alpha = \beta = 0$.

Operator dodawania:

$$\tilde{M} \oplus \tilde{N} = (m_l, m_u, \alpha, \beta)_{LR} \oplus (n_l, n_u, \gamma, \delta)_{LR} = (m_l + n_l, m_u + n_u, \alpha + \beta, \gamma + \delta)_{LR} \tag{3.6}$$

Operator odwracania:

$$-\tilde{M} = -(m_l, m_u, \alpha, \beta)_{LR} = (-m_u, -m_l, \beta, \alpha)_{LR} \tag{3.7}$$

Operator odejmowania:

$$\tilde{M} \ominus \tilde{N} = (m_l, m_u, \alpha, \beta)_{LR} \ominus (n_l, n_u, \gamma, \delta)_{LR} = (m_l - n_u, m_u + n_l, \alpha + \delta, \beta + \gamma)_{LR} \tag{3.8}$$

Operator mnożenia:

$$\begin{aligned} &\tilde{M} \otimes \tilde{N} = (m_l, m_u, \alpha, \beta)_{LR} \otimes (n_l, n_u, \gamma, \delta)_{LR} \approx \\ &(m_l \cdot n_l, m_u \cdot n_u, m_l\gamma + n_l\alpha - \alpha\gamma, m_u\delta + n_u\beta - \beta\delta)_{LR} \end{aligned} \tag{3.9}$$

W przypadku modelowania zbiorów rozmytych o trójkątnej funkcji przynależności, zdefiniowano za [48] operatory przedstawione we wzorach (3.10)–(3.15).

Dodawanie

$$(m,a,b)_{LR} \oplus (n,c,d)_L R = (m+n, a+c, b+d)_{LR} \tag{3.10}$$

Liczba przeciwna

$$(m,a,b)_{LR} = (-m,b,a)_{LR} \tag{3.11}$$

Odejmowanie

$$(m,a,b)_{LR} - (n,c,d)_{LR} = (m-n, a+d, b+c)_{LR} \tag{3.12}$$

Mnożenie przez skalar

$$(m,a,b)_{LR} \times (n,0,0)_{LR} = (mn, an, bn)_{LR} \tag{3.13}$$

Mnożenie przez zbiór rozmyty

$$\begin{aligned} &(m,a,b)_{LR} \otimes (n,c,d)_{LR} \approx \\ &\begin{cases} (mn, cm+an, dm+bn)_{LR} & \text{dla } m>0, n>0 \\ (mn, an-dm, bn-cm)_{LR} & \text{dla } m<0, n>0 \\ (mn, -bn-dm, -an-cm)_{LR} & \text{dla } m<0, n<0 \end{cases} \end{aligned} \tag{3.14}$$

Odwrotność

$$(m,a,b)_{LR}^{-1} \approx \left(m^{-1}, bm^{-2}, am^{-2}\right)_{LR} \tag{3.15}$$

Do obliczeń na wartościach rozmytych wykorzystywana jest algebra α-cięć. Dla α-cięcia zapisanego w postaci zgodnej ze wzorem (3.16), oznaczonego przez $A^\alpha = [A_l^\alpha, A_u^\alpha]$, gdzie A^α jest niepustym ograniczonym przedziałem domkniętym na dziedzinie liczb rzeczywistych, a A_l^α i A_u^α są odpowiednio dolnym i górnym ograniczeniem przedziału, operacje arytmetyczne na przedziałach określających α-cięcia, obliczane są, jak przedstawiono we wzorach (3.17)–(3.21) [26].

$$A^\alpha = \{x | f_A(x) \geqslant \alpha\} \tag{3.16}$$

$$(A \oplus B)^\alpha = [A_l^\alpha + B_l^\alpha, A_u^\alpha + B_u^\alpha] \tag{3.17}$$

$$(A \ominus B)^\alpha = [A_l^\alpha - B_l^\alpha, A_u^\alpha - B_u^\alpha] \tag{3.18}$$

$$(A \otimes B)^\alpha = [A_l^\alpha \cdot B_l^\alpha, A_u^\alpha \cdot B_u^\alpha] \tag{3.19}$$

$$(A \oslash B)^\alpha = \left[\frac{A_l^\alpha}{B_l^\alpha}, \frac{A_u^\alpha}{B_u^\alpha}\right] \tag{3.20}$$

$$(A \otimes r)^\alpha = [A_l^\alpha \cdot r, A_u^\alpha \cdot r], \quad r \in \mathbb{R}^+ \tag{3.21}$$

Nietrywialnym problemem jest porównanie dwóch wartości rozmytych. Istnieje wiele metod sporządzania rankingów zbiorów rozmytych, jednakże żadna z tych metod nie dostarcza satysfakcjonujących wyników we wszystkich możliwych sytuacjach. Jednym z podejść do porównań zbiorów rozmytych jest schemat przedstawiony w pracy [25]. Dla liczby rozmytej $a = [a,b,c,d]$, gdzie $A \in \mathbb{R}$, określane jest lewe i prawe odcięcie

zgodnie ze wzorami (3.22) i (3.23). Na postawie wartości odcięć wyznaczana jest wartość środkowa liczby rozmytej A zgodnie ze wzorem (3.24).

$$A_L = b - \int_a^b f_A^L)x = dx \tag{3.22}$$

$$A_R = c + \int_c^d f_A^R)x = dx \tag{3.23}$$

$$M(A) = \frac{1}{2}(A_L + A_R) \tag{3.24}$$

Stąd, relacja przewyższania zbiorów rozmytych A_i i A_j zdefiniowana jest jak przedstawiono we wzorze (3.25).

$$\begin{array}{l} M(A_i) > M(A_j) \Rightarrow \quad A_i > A_j \\ M(A_i) = M(A_j) \Rightarrow \quad A_i = A_j \\ M(A_i) < M(A_j) \Rightarrow \quad A_i < A_j \end{array} \tag{3.25}$$

3.2. Rozwinięcie teorii zbiorów rozmytych przy pomocy zbiorów lingwistycznych

Zbiory rozmyte pozwoliły na rozwiązanie problemu niedokładności w modelowaniu danych z nieprecyzyjnymi wartościami. Pomimo tego, operacje matematyczne wykonywane na wartościach pochodzących z ocen człowieka, określonych w sposób słowny, wymagały poczynienia dalszych założeń.

Jedną z postaci zapisu nieprecyzyjnej informacji jest model posybilistycznych zbiorów rozmytych. Zgodnie z teorią Dempstera-Shafera liczby rozmyte odzwierciedlają nieprecyzyjną dystrybucję prawdopodobieństwa osądu człowieka. Według tej interpretacji, dolny $E_*(\tilde{a})$ i górny $E^*(\tilde{a})$ kraniec liczby rozmytej $\tilde{a}$ zdefiniowane są, jak przedstawiono we wzorze (3.26) [68].

$$E_*(\tilde{a}) = \int_0^1 \inf[\tilde{a}]_h dh, \qquad E^*(\tilde{a}) = \int_0^1 \sup[\tilde{a}]_h dh. \tag{3.26}$$

Wynika stąd, że liczba rzeczywista $\epsilon(\tilde{a}) = \frac{E_*(\tilde{a})+E^*(\tilde{a})}{2}$ może być postrzegana jako reprezentacja liczby $\tilde{a}$. Przedstawiony we wzorze (3.27) indeks $\sqsupset(\tilde{a} \leqslant \tilde{b})$ ma za zadanie dostarczyć informację o wyniku porównania dwóch liczb rozmytych $\tilde{a}$ i $\tilde{b}$.

$$\sqsupset(\tilde{a} \leqslant \tilde{b}) = \frac{E^*(\tilde{b}) - E_*(\tilde{a})}{E^*(\tilde{a}) - E_*(\tilde{a}) + E^*(\tilde{b}) - E_*(\tilde{b})} \tag{3.27}$$

Obliczenia na wartościach lingwistycznych wymagają zakodowania tych wartości w sposób możliwy do obliczenia przez komputer. Dwoma zasadniczymi technikami zapisu wartości tego typu są podejścia: numeryczne i symboliczne. W podejściu numerycznym wartości lingwistyczne są szeregowane kolejno na skali, gdzie każdemu elementowi odpowiada zbiór rozmyty, a elementy są usytuowane równomiernie (symetrycznie). Zaletą tego podejścia jest łatwość opisania tych obliczeń w postaci algorytmów komputerowych,

natomiast wadą jest wymóg symetrycznego rozkładu wartości. Drugie podejście – symboliczne – polega na przypisaniu wartości indeksu do każdej etykiety lingwistycznej i na dokonywaniu obliczeń przy pomocy tych indeksów [87].

Warunkiem wykorzystania zbiorów rozmytych przy modelowaniu ocen lingwistycznych jest określenie ograniczeń tego odwzorowania. Jednoznaczne opisanie oceny lingwistycznej decydenta/człowieka przy pomocy zbioru rozmytego nie jest możliwe ze względu na zmienność wartości terminów lingwistycznych w zależności od kontekstu, a także z powodu nadawania przez człowieka tych samych ocen różnym wartościom, co wynika między innymi z ograniczonej liczby terminów lingwistycznych. Również uczestnictwo wielu decydentów w procesie utrudnia dokonanie modelowania lingwistycznego z powodu różnych wartości przypisywanych tym samym ocenom przez różne osoby. Reasumując, zastosowanie zbiorów lingwistycznych jest dobrą techniką odwzorowania ocen lingwistycznych, wymaga jednak dokonania pewnych założeń [87].

Przez zmienną lingwistyczną rozumie się element, którego wartość stanowi słowo lub fraza w języku naturalnym (lub sztucznym) i który charakteryzowany jest przez piątkę przedstawioną we wzorze (3.28) [44].

$$\{X, T(X), U, G, M\} \tag{3.28}$$

gdzie:

1. X jest nazwą wartości,
2. $T(X)$ jest zbiorem określeń (etykiet) lingwistycznych,
3. U jest dziedziną dyskursu (wypowiedzi) (kontekstem),
4. G jest regułą syntaktyczną generowania elementów zbioru $T(X)$,
5. M jest regułą semantyczną przypisywania znaczeń elementom lingwistycznym X.

Determinizm oceny lingwistycznej t zdefiniowany jest przez całkę rozmytą $\int_U \mathscr{F}_t dU$ z $\mathscr{F}_t$ na U i przedstawia ją wzór (3.29) [87].

$$Det(t) = 1 - \frac{\int_U \mathscr{F}_t dU}{\int_U dU} \tag{3.29}$$

Wobec tego determinizm zbioru ocen lingwistycznych może zostać przedstawiony jak we wzorze (3.30) [87].

$$Det(t) = 1 - \frac{\int_U \left(\bigcup_{i=1}^{n} \mathscr{F}_t \right) dU}{\int_U dU} \tag{3.30}$$

Zgodnie z definicją, zachodzą następujące właściwości determinizmu wartości lingwistycznych przedstawione we wzorach (3.31), (3.32) i (3.33) [87].

$$Det(t) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } \mathscr{F}_t(u) = 1 \text{ dla } u \in U, \text{ i } \mathscr{F}_t(x) = 0, \\ & \text{dla } x \neq u \text{ (funkcja typu singleton)} \\ 0, & \text{gdy } \mathscr{F}_t(x) = 1 \text{ dla } \forall x \in U \end{cases} \tag{3.31}$$

$$0 \leqslant Det(t) \leqslant 1, \qquad \text{dla dowolnej etykiety } t \tag{3.32}$$

$$\mathscr{F}_{t_1} \subseteq \mathscr{F}_{t_2} \Rightarrow Det(t_1) \geqslant Det(t_w) \tag{3.33}$$

Spójność zbioru ocen lingwistycznych zdefiniowana jest, jak podano we wzorze (3.34) [87].

$$Con(T) = \vee \left\{ \alpha : \bigcap_{i=1}^{n} (\mathscr{F}_{t_i})_\alpha \neq \varnothing \right\}, \tag{3.34}$$

gdzie $(\mathscr{F}_{t_i})_\alpha$ jest α-cięciem (α-cut) $\mathscr{F}_{t_i}$, dla $i = 1, 2, ldots, n$.

Percepcja oznacza lingwistyczne pojęcie, etykietę przypisaną przez człowieka do pewnego znaczenie. Znaczenie to może być specyficzne dla danej osoby, oraz zmienne w zależności od opisywanego obiektu. Percepcję mogą być także pojęcia współdzielone przez pewną grupę ludzi ze wspólnego środowiska lub szerzej ze wspólnego kręgu kulturowego. Pojęcie to jest abstrakcyjne i bezznaczeniowe dla komputera [153].

Percepcja jest elementem abstrakcyjnym, stąd wykonywanie obliczeń na percepcjach przy pomocy maszyn obliczeniowych (komputerów) wymaga dokonania uporządkowania tych pojęć oraz nadania im znaczenia numerycznego poprzez przypisanie im pozycji lub zakresów na osi liczbowej. Przypisanie wartości liczbowej jest operacją umowną i wykorzystywane jest wyłącznie wewnątrz algorytmów do wykonania stosownych obliczeń. Dane wyjściowe natomiast powinny być poddane odwrotnej transformacji w stosunku do przekształcenia wejściowego, celem nadania uzyskanym rezultatom liczbowym znaczeń zgodnych z percepcją człowieka zadającego obliczenia.

3.3. Wspomaganie decyzji z danymi lingwistycznymi

Sytuacje decyzyjne opisane są zarówno przez wartości ilościowe, jak i jakościowe. Stąd proces wspomagania decydenta w procesie podejmowania decyzji powinien być dostosowany do uwzględnienia takiego charakteru danych. Szczególnie istotne jest to w sytuacji, gdy decydent wyraża swoje preferencje w sposób werbalny, gdyż, jak zostało to wspomniane w podrozdziale 3, kwantyfikacja ocen decydenta prowadzi do utraty danych o rozkładzie jego preferencji, oczekiwań i kryteriów.

Zastosowanie zbiorów rozmytych oraz lingwistycznych objęło wiele dziedzin, nie wyłączając metod wspomagania decyzji. Metody wielokryterialne zostały dostosowane do uwzględniania ocen nieostrych, a także do obliczeń na takich wartościach zarówno jako danych wejściowych, jak i jako wewnętrznych preferencjach wykorzystywanych przy modelowaniu relacji pomiędzy alternatywami.

Lingwistyczne podejście do procesu decyzyjnego wymaga określenia etykiet lingwistycznych oraz funkcji przynależności dla opisów alternatyw oraz wag kryteriów. Następnie, przy pomocy określonych skal lingwistycznych, decydent nadaje stopnie ważności kryteriom i wartości preferencji alternatyw dla poszczególnych kryteriów. Wykorzystując te dane, algorytm wspomagania decyzji dokonuje obliczenia zagregowanych wag dla każdego kryterium i średnich ocen alternatyw. Następnie wartości te są agregowane do rozmytego indeksu dopasowania. W rezultacie, spośród otrzymanych wartości rankingowych, wybierana jest wartość najwyższa, która opisuje najbardziej preferowany przez decydenta wariant decyzyjny [82].

Rozwiązywanie skomplikowanych i niestrukturalizowanych problemów jest w znacznej mierze oparte o pozyskane osądy decydenta. Wynika stąd potrzeba dostosowania procesu decyzyjnego do modelu rozumowania ludzkiego umysłu. Czynnikami pozwalającymi osiągnąć to dostosowanie są: wykorzystanie do opisu problemu języka naturalnego dla

decydenta, zastosowanie technik pomiaru wartości kryteriów i preferencji naturalnych dla ludzkiego umysłu, sprawdzanie spójności informacji pozyskanych od decydenta, transparentność procesu dla decydenta i zapewnienie objaśnień wszystkich rezultatów [96].

Trudnością w określeniu preferencji alternatywy są nieprecyzyjne oczekiwania decydenta. Często decydent nie jest w stanie określić stopnia preferencji dla danej alternatywy, a także uzależnić ten stopień od różnicy w wydajności dla rozważanego kryterium. Dodatkowym utrudnieniem są niejednoznaczne i lingwistyczne oceny człowieka, które prowadzą do powstania relacji preferencji o różnej intensywności / różnym stopniu [114].

W pracy [5] wyróżniono następujące trzy typy nieprecyzji (niedokładności):

— niepełność,
— rozmycie,
— iluzoryczna poprawność.

Występowanie wyłącznie słownego i niedokładnego opisu sytuacji decyzyjnej często wiąże się także z niekompletnością danych tego opisu. Szczególnie jest to częste w problemach obejmujących szeroki zakres rzeczywistości, do jakich należą rozważane w niniejszej pracy **ZWPW** [149].

Procedura zaproponowana w [44] dla pozyskiwania etykiet lingwistycznych od decydenta jest następująca:

1. sporządzenia rankingu ważności kryteriów,
2. następuje zebranie lingwistycznych ocen ważności każdego kryterium,
3. lingwistyczna ocena alternatyw w wymiarze każdego kryterium,
4. graficzne oznaczenie zakresu znaczenia użytego określenia lingwistycznego,
5. graficzne oznaczenie punktu znaczenia użytego określenia lingwistycznego,
6. powtórzenie wymienionych kroków dla wszystkich określeń lingwistycznych,
7. uzyskanie liczby rozmytej odpowiadającej każdemu użytemu określeniu lingwistycznemu (gdzie wsparcie obejmuje zakres znaczenia określenia lingwistycznego, a punkt centralny odpowiada punktowi znaczenia),
8. normalizacja etykiet odpowiadających wagom kryteriów.

Podejście graficzne przedstawione w [44] pozwala na zebranie ocen decydenta, bazując na jego wyobraźni i wewnętrznej percepcji, a nie na sugestii analityka. Działanie to pozwala to na zwiększenie niezależności decydenta poprzez ograniczenie zadań, do których niezbędny jest analityk.

Zastosowanie metod programowania liniowego wymaga założenia, że wartości współczynników problemu decyzyjnego oraz dane ograniczeń są określone i znane. Jednakże w przypadku praktycznych problemów wartości te mogą być znane jedynie w stopniu przybliżonym lub określone lingwistycznie. W tej sytuacji zastosowanie ma postać modelu przedstawiona we wzorze (3.35).

$$\begin{array}{ll} \min & \left(\tilde{c}_1^T x, \tilde{c}_2^T x, \ldots, \tilde{c}_p^T x\right)^T \\ \text{dla} & \tilde{a}_1^T x \lesssim_i \tilde{b}_i,\ i = 1, 2, \ldots, m_1, \\ & \tilde{a}_i^T x \backsimeq_i \tilde{b}_i,\ i = m_1 + 1, \ldots, m, \\ & x \geqslant 0, \end{array} \tag{3.35}$$

gdzie $\tilde{c}_k = (\tilde{c}_{k1}, \tilde{c}_{k2}, \ldots, \tilde{c}_{kn})^T$, $k = 1, 2, \ldots, p$ i $\tilde{a}_i = (\tilde{a}_{i1}, \tilde{a}_{i2}, \ldots, \tilde{a}_{in})^T$, $i = 1, 2, \ldots, m$ są rozmytymi wektorami współczynników, a $\tilde{c_{kj}}, \tilde{a}_{ij}$ i b_i, $i = 1, 2, \ldots, m$ są zbiorami rozmytymi [68].

Rozmyty wariant metody PROMETHEE zastosowany w [48] wykorzystuje notację Dubois i Prade $x = (m, a, b)_{LR}$ zapisu zbiorów rozmytych do zapisu wydajności każdego scenariusza dla każdego kryterium. W wymienionej pracy dokonano porównania wyników wspomagania tego samego problemu dla wariantu klasycznego metody (PROMETHEE II) i dla wariantu rozmytego (F-PROMETHEE). Rozmyty zapis ocen pozwolił na uwzględnienie niepewności dotyczących rozważanych scenariuszy i wpłynął na wartości rankingu końcowego.

Przedstawione w [92] podejście do wyznaczania stopnia preferencji dla wartości rozmytych oparte jest o porównania liczb, gdzie wynik porównania może być otrzymany w wyniku operatora przecięcia lub przy pomocy operacji na α-cięciach.

3.3.1. Metoda Fuzzy PROMETHEE

Rozszerzenie metody PROMETHEE o operacje na wartościach rozmytych zostało zaproponowane między innymi w [48] i [45]. Istotnym ograniczeniem metody PROMETHEE jest konieczność rzutowania wartości preferencji na zakres $\langle 0, 1\rangle$.

Zaproponowany w [48] algorytm..

Funkcja przynależności liczby $\Pi(\alpha, \beta) = (m, c, d)$ jest normalizowana do ograniczeń: $m - c \geqslant 0$ i $m + d \leqslant 1$.

Algorytm rozmytego wariantu metody PROMETHEE wykorzystany w niniejszej pracy został zaprezentowany w [45]. Wykorzystuje on trapezoidalny model zbiorów rozmytych w postaci przedstawionej we wzorze (3.5) i operatory przedstawione we wzorach (3.6)–(3.9) [48].

Pierwszym krokiem metody „Fuzzy PROMETHEE" jest wyznaczenie uogólnionej funkcji kryterialnej $p_k(d)$ dla każdego kryterium f_r. Krok drugi polega na definicji wektora wag rozmytych (normalizowanego do $\sum_{k=1}^{K} \tilde{w}_K = 1$) w postaci przedstawionej we wzorze (3.36) [48].

$$\tilde{w}^T = [\tilde{w}_1 \quad \tilde{w}_2 \quad \ldots \quad \tilde{w}_K] \tag{3.36}$$

gdzie $\tilde{w}_k = (m_l^w, m_u^w, \alpha^w, \beta^w)_{LR}$.

Krok trzeci obejmuje definicję rozmytej relacji przewyższania $\tilde{\pi}$ dla każdej pary wariantów $a_i, a_{t'} \in A$ zgodnie ze wzorem (3.37) [48].

$$\tilde{\pi} : \begin{cases} A \times A \to \langle 0, 1\rangle \\ \tilde{\pi}(a_t, a_{t'}) = \sum_{k=1}^{K} \tilde{w}^k \otimes p_k \left(\tilde{f}_k(a_t) \ominus \tilde{f}_k(a_{t'})\right) \end{cases} \tag{3.37}$$

gdzie $\tilde{f}_k(a_t) = (m_l, m_u, \alpha, \beta)_{LR}$, $\tilde{f}_k(a_{t'}) = (n_l, n_u, \gamma, \delta)_{LR}$, a stopień preferencji wariantu a_t nad $a_{t'}$ dla kryterium f_k może zostać wyprowadzony zgodnie ze wzorem (3.38)

[48].

$$
\begin{aligned}
&p_k(\tilde{f}_k(a_t) \ominus \tilde{f}_k(a_{t'})) = p_k((m_l, m_u, \alpha, \beta)_{LR} \ominus (n_l, n_u, \gamma, \delta)_{LR}) = \\
&p_k(m_; - n_u, m_u - n_l, \alpha + \delta, \beta + \gamma)_{LR} = \\
&(p_k(m_l - n_u), p_k(m_u - n_l), p_k(m_l - n_u) - p_k(m_l - n_u - \alpha + \delta), \\
&p_k(m_u - n_l + \beta + \gamma) - p_k(m_u - n_l))_{LR} = \\
&(m_l^{p_k}, m_u^{p_k}, \alpha^{p_k}, \alpha^{p_k})_{LR}
\end{aligned}
\tag{3.38}
$$

Następnie wartości stopnia preferencji są mnożone przez wagi odpowiadających im kryteriów, co przedstawiono we wzorze (3.39) [48].

$$
\begin{aligned}
&\tilde{w}_k \otimes p_k\left(\tilde{f}_k(a_t) \ominus \tilde{f}_k(a_{t'})\right) = \\
&(m_l^{w_k}, m_u^{w_k}, \alpha^{w_k}, \beta^{w_k})_{LR} \otimes (m_l^{p_k}, m_u^{p_k}, \alpha^{p_k}, \beta^{p_k})_{LR} \approx \\
&(m_l^{w_k} \cdot m_l^{p_k}, m_u^{w_k} \cdot m_u^{p_k}, m_l^{w_k} \cdot \alpha^{p_k} + m_l^{p_k} \cdot \alpha^{w_k} - \alpha^{w_k}\alpha^{p_k}, \\
&m_u^{w_k} \cdot \beta^{p_k} + m_u^{p_k} \cdot \beta^{w_k} + \beta^{w_k} \cdot \beta^{p_k})_{LR}
\end{aligned}
\tag{3.39}
$$

Ostatnim elementem tego etapu jest wyznaczenie siły relacji przewyższania $\tilde{\pi}$ zgodnie ze wzorem (3.40) [48].

$$
\begin{aligned}
&\tilde{\pi}(a_t, a_{t'}) = \sum_{k=1}^{K} \tilde{w}_k \otimes p_k(\tilde{f}_k(a_t) \ominus \tilde{f}_k(a_{t'})) \approx \\
&\sum_{k=1}^{K} (m_l^{w_k} \cdot m_l^{p_k}, m_u^{w_k} \cdot m_u^{p_k}, m_l^{w_k} \cdot \alpha^{p_k} + m_l^{p_k} \cdot \alpha^{w_k} - \alpha^{w_k}\alpha^{p_k}, \\
&m_u^{w_k} \cdot \beta^{p_k} + m_u^{p_k} \cdot \beta^{w_k} + \beta^{w_k} \cdot \beta^{p_k})_{LR} = \\
&\left(\sum_{k=1}^{K} m_l^{w_k} \cdot m_l^{p_k}, \sum_{k=1}^{K} m_u^{w_k} \cdot m_u^{p_k}, \right. \\
&\sum_{k=1}^{K} m_l^{w_k} \cdot \alpha^{p_k} + m_l^{p_k} \cdot \alpha^{w_k} - \alpha^{w_k}\alpha^{p_k}, \\
&\left. \sum_{k=1}^{K} m_u^{w_k} \cdot \beta^{p_k} + m_u^{p_k} \cdot \beta^{w_k} + \beta^{w_k} \cdot \beta^{p_k} \right)_{LR} = \\
&(m_l^{\pi}, m_u^{\pi}, \alpha^{\pi}, \beta^{\pi})_{LR}
\end{aligned}
\tag{3.40}
$$

Czwartym krokiem metody jest obliczenie strumienia wychodzącego $\phi^+(a_t)$ dla każdego wariantu a_t, zgodnie ze wzorem (3.41) [48].

$$
\phi^+(a_t) = \frac{1}{T-1} \cdot \sum_{\substack{t'=1 \\ t' \neq t}}^{T} \tilde{\pi}(a_t, a_{t'}) \tag{3.41}
$$

Krok piąty polega na obliczeniu strumienia wchodzącego $\phi^-(a_t)$ dla każdego wariantu a_t, zgodnie ze wzorem (3.42) [48].

$$\phi^-(a_t) = \frac{1}{T-1} \cdot \sum_{\substack{t'=1 \\ t' \neq t}}^{T} \tilde{\pi}(a_{t'}, a_t) \tag{3.42}$$

Krok szósty, to eksploatacja obliczonej relacji przewyższania w formie graficznej. Wyznaczenie pozycji wariantu decyzyjnego w rankingu następuje w wyniku przeprowadzenia defuzyfikacji rozmytych strumieni wchodzącego i wychodzącego według równania przedstawionego we wzorze (3.43) [48].

$$\begin{aligned} x_{defuzz} &= \frac{\int x \cdot \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} = \\ &\frac{\int_{m_l-\alpha}^{m_l} \left(1 - \frac{m_l - x}{\alpha}\right) \cdot x dx + \int_{m_l}^{m_u} 1 \cdot x dx + \int_{m_u}^{m_u+\beta} \frac{x - m_u}{\beta} \cdot x dx}{\int_{m_l-\alpha}^{m_l} \left(1 - \frac{m_l - x}{\alpha}\right) dx + \int_{m_l}^{m_u} 1 dx + \int_{m_u}^{m_u+\beta} \left(1 - \frac{x - m_u}{\beta}\right) dx} = \\ &\frac{m_u^2 - m_l^2 + \alpha m_l + \beta m_u + \frac{1}{3}\left(\beta^2 - \alpha^2\right)}{\alpha + \beta + 2m_u - 2m_l} \end{aligned} \tag{3.43}$$

Rozmyty wariant metody PROMETHEE pozwala także na przeprowadzenie analizy wrażliwości, czyli wyznaczenie zakresu wag dla wybranego kryterium, dla których nie następuje zmiana rankingu. Wyznaczenie wrażliwości polega na znalezieniu punktów przecięcia dla linii wag wyznaczanych przez strumienie netto dla problemu jednokryterialnego (waga kryterium równa 100%) i dla problemu z wyłączeniem danego kryterium (waga kryterium równa 0%). Wyznaczenie przepływów przedstawiają wzory (3.44) i (3.45) [48], gdzie $\phi_0^{net}(a_t)$ jest strumieniem netto wariantu a_t dla $w_{f_k} = 0$, a $\phi_1^{net}(a_t)$ jest strumieniem netto wariantu a_t dla $w_{f_k} = 1$.

$$\begin{aligned} &\phi_0^{net}(a_t) + (\phi_1^{net}(a_t) - \phi_0^{net}(a_t)) \cdot w^* = \\ &\phi_0^{net}(a_{t'}) + (\phi_1^{net}(a_{t'}) - \phi_0^{net}(a_{t'})) \cdot w^* \\ &\Leftrightarrow w^* \frac{\phi_0^{net}(a_t) - \phi_0^{net}(a_{t'})}{\phi_1^{net}(a_{t'}) - \phi_0^{net}(a_{t'}) - \phi_1^{net}(a_t) + \phi_0^{net}(a_t)} \end{aligned} \tag{3.44}$$

$$\begin{aligned} &\phi_0^{net}(a_t) = \\ &\left(\left(\tilde{\phi}^+(a_t) - \tilde{\pi}(a_t, a_{t'}) - \tilde{\phi}^-(a_t) + \tilde{\pi}(a_t, a_{t'})\right) \div \left(\left(\sum_{k=1}^{K} \tilde{w}_k\right) - w_{f_k}^*\right)\right)_{defuzz} \end{aligned} \tag{3.45}$$

gdzie $w_{f_k}^*$ jest wagą kryterium f_k przypisaną przez decydenta.

3.3.2. Metoda Fuzzy TOPSIS

W niniejszej pracy zastosowano rozmyty wariant metody TOPSIS przedstawiony w [144]. Metoda ta oparta jest na α-cięciach i rozmytym wyznaczaniu dystansu wariantów decyzyjnych od wariantu idealnego.

Algorytm metody TOPSIS zakłada klasyczny model problemu decyzyjnego, opisanego przez zbiór m kryteriów $C_1, C_2, \ldots, C_m$ i wymagającego rozważenia n wariantów decyzyjnych $A_1, A_2, \ldots, A_n$. Wartości wydajności/ocen wariantów ze względu na poszczególne kryteria opisane są przez zbiór $X = (x_{ij})_{n \times m}$, który może mieć również postać macierzy decyzyjnej. Wektor $W = (w_1, \ldots, w_m)$ jest wektorem wag względnych kryteriów i spełnia warunek zapisany we wzorze (3.46) [144].

$$\sum_{j=1}^{m} = 1 \tag{3.46}$$

Pierwszym krokiem metody TOPSIS jest dokonanie normalizacji macierzy decyzyjnej zgodnie ze wzorem (3.47) [144].

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} x_{kj}^2}} \tag{3.47}$$

gdzie $i = 1, \ldots, n$, $j = 1, \ldots, m$, a r_{ij} jest znormalizowaną oceną atrybutu.

Drugim krokiem metody jest obliczenie znormalizowanej ważonej macierzy decyzyjnej $V = (v_{ij})_{n \times m})$, której wartości obliczone są jak we wzorze (3.48) [144]:

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \tag{3.48}$$

gdzie $i = 1, \ldots, n$, $j = 1, \ldots, m$, a w_j jest wagą względną dla kryterium j.

W trzecim kroku metody TOPSIS określane są rozwiązania pozytywnie i negatywnie idealne, gdzie rozwiązanie pozytywnie idealne A^* wyznaczane jest zgodnie ze wzorem (3.49), a negatywnie idealne A^- zgodnie ze wzorem (3.50) [144].

$$A^* = \{v_1^*, \ldots, v_m^*\} = \left\{ \left(\max_j v_{ij} | j \in Q_b \right), \left(\min_j v_{ij} | j \in Q_c \right) \right\} \tag{3.49}$$

$$A^- = \{v_1^-, \ldots, v_m^-\} = \left\{ \left(\min_j v_{ij} | j \in Q_b \right), \left(\max_j v_{ij} | j \in Q_c \right) \right\} \tag{3.50}$$

gdzie Q_b, Q_c są zbiorami kryteriów odpowiednio zyskowych i kosztowych.

Czwarty krok dokonuje obliczenia odległości wariantów decyzyjnych od obliczonych wariantów wyidealizowanych. Zgodnie z definicją metody zastosowano euklidesowe miary dystansu, i wzory (3.51) i (3.52) [144] przedstawiają odległość atrybutu A_i od wariantu odpowiednio pozytywnie i negatywnie idealnego.

$$D_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(v_{ij} - v_j^* \right)} \tag{3.51}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(v_{ij} - v_j^- \right)} \tag{3.52}$$

gdzie $i = 1, \ldots, n$.

Na podstawie wyznaczonych dystansów w piątym kroku obliczana jest względna odległość od wariantu idealnego, wyznaczona zgodnie ze wzorem (3.53) [144].

$$RC_i = \frac{D_i^-}{D_i^* + D_i^-} \tag{3.53}$$

gdzie $i = 1, \ldots, n$.

Finalny ranking wariantów decyzyjnych uzyskany przy pomocy metody TOPSIS jest szeregiem ułożonym według malejącej wartości RC_i, gdzie $RC_i > RC_j \Rightarrow RC_i \succ RC_j$.

Zaproponowana w pracy [19] miara dystansu dla zbiorów rozmytych w formie trójkątnej przedstawiona została we wzorze (3.54).

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3}\left[(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2\right]} \tag{3.54}$$

gdzie $\tilde{m}$ i $\tilde{n}$ są liczbami rozmytymi postaci odpowiednio $\tilde{m} = (m_1, m_2, m_3)$ i $\tilde{n} = (n_1, n_2, n_3)$.

Podejście przedstawione w [144] dokonuje połączenia definicji metody TOPSIS oraz zasady rozszerzania Zadeha [151] w rozmytej metodzie Fuzzy TOPSIS, bazującej na α cięciach (zbiorach α-level).

Opis problemu decyzyjnego przyjmuje postać rozmytej macierzy decyzyjnej, zgodnie ze wzorem (3.55) [144].

$$\tilde{X} = (\tilde{x}_{ij})_{n \times m} \tag{3.55}$$

Macierz decyzyjna jest scharakteryzowana przez funkcję przynależności $\mu_{\tilde{x}_{ij}}(x)$, gdzie $i = 1, \ldots, n$, $j = 1, \ldots, m$, natomiast wagi opisane są przez wektor zbiorów rozmytych $\tilde{W} = (\tilde{w}_1, \ldots, \tilde{w}_m)$.

W przypadku, gdy kryteria oceniane są według różnych skal, konieczna jest normalizacja, która scharakteryzowana jest przez wzory (3.56) i (3.57) [144], odpowiednio dla kryterium zysku i kosztu.

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{d_j^*}, \frac{b_{ij}}{d_j^*}, \frac{d_{ij}}{d_j^*}\right) \quad i = 1, \ldots, n; \quad j \in Q_b \tag{3.56}$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}^-}{d_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_i^-}{a_{ij}}\right) \quad i = 1, \ldots, n; \quad j \in Q_c \tag{3.57}$$

gdzie spełnione są warunki przedstawione we wzorach (3.58) i (3.59) [144].

$$d_j^* = \max_i d_{ij}, \qquad j \in Q_b \tag{3.58}$$

$$a_j^- = \min_i a_{ij}, \qquad j \in Q_c \tag{3.59}$$

Istotne jest zauważenie, że znormalizowane wartości $\tilde{r}_{ij}$ są zbiorami rozmytymi w tej samej postaci, w jakiej dostarczone zostały wartości wejściowe. Zgodnie z istotą normalizacji wszystkie wartości są z zakresu $\langle 0, 1 \rangle$. Stąd, rozwiązanie pozytywnie idealne określone jest jako $A^* = \{1, \ldots, 1\}$, a negatywnie idealne jako $A^- = \{0, \ldots, 0\}$. W sytuacji, gdy nie dokonano normalizacji macierzy decyzyjnej, określenie wariantu pozytywnie i negatywnie idealnego przebiega zgodnie ze wzorami (3.60) i (3.61) [144].

$$A^* = \{x_1^*, \ldots, x_m^*\} = \left\{\left(\max_j d_{ij} | j \in Q_b\right), \left(\min_j a_{ij} | j \in Q_c\right)\right\} \tag{3.60}$$

$$A^- = \{x_1^-, \ldots, x_m^-\} = \left\{\left(\min_j a_{ij} | j \in Q_b\right), \left(\max_j d_{ij} | j \in Q_c\right)\right\} \tag{3.61}$$

gdzie Q_b, Q_c są zbiorami kryteriów odpowiednio zyskowych i kosztowych.

W celu zapewnienia porównywalności wyników z rezultatami otrzymywanymi przy pomocy innych metod, w niniejszej pracy przyjęto obligatoryjną normalizację wartości atrybutów.

Obliczenie dystansu wariantu i od wariantu idealnego przy zastosowaniu α-cięć przebiega w sposób przedstawiony we wzorze (3.62) [144].

$$
\begin{aligned}
&RC_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(w_j r_{ij})^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(w_j r_{ij})^2}+\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(w_j(r_{ij}-1))^2}} \\
&\text{gdzie} \\
&(r_{ij})_\alpha = \left[(r_{ij})_\alpha^L, (r_{ij})_\alpha^U\right] \\
&(w_j)_\alpha = \left[(w_j)_\alpha^L, (w_j)_\alpha^U\right] \\
&(w_j)_\alpha^L \leqslant w_j \leqslant (w_j)_\alpha^U \\
&(r_{ij})_\alpha^L \leqslant r_{ij} \leqslant (r_{ij})_\alpha^U \\
&i = 1, \ldots, n \\
&j = 1, \ldots, m
\end{aligned}
\tag{3.62}
$$

W związku z przedziałową postacią dystansu RC_i, do wyznaczenia górnego i dolnego ograniczenia zastosowano modele programowania cząstkowego, zgodnie ze wzorami (3.63) i (3.64) [144].

$$
\begin{aligned}
&(RC_i)_\alpha^L = \min \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(w_j r_{ij})^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(w_j r_{ij})^2}+\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(w_j(r_{ij}-1))^2}} \\
&\text{Ograniczone przez:} \\
&(w_j)_\alpha^L \leqslant w_j \leqslant (w_j)_\alpha^U, \qquad j = 1, \ldots, m \\
&(r_{ij})_\alpha^L \leqslant r_{ij} \leqslant (r_{ij})_\alpha^U, \qquad j = 1, \ldots, m
\end{aligned}
\tag{3.63}
$$

$$
\begin{aligned}
&(RC_i)_\alpha^U = \max \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(w_j r_{ij})^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(w_j r_{ij})^2}+\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(w_j(r_{ij}-1))^2}} \\
&\text{Ograniczone przez:} \\
&(w_j)_\alpha^L \leqslant w_j \leqslant (w_j)_\alpha^U, \qquad j = 1, \ldots, m \\
&(r_{ij})_\alpha^L \leqslant r_{ij} \leqslant (r_{ij})_\alpha^U, \qquad j = 1, \ldots, m
\end{aligned}
\tag{3.64}
$$

3.3.3. Metoda rozmyta Kuo

Metoda przedstawiona w pracy [76] została opracowana z myślą o wspomaganiu decyzji podejmowanych przez grupę decydentów. Metoda dokonuje obliczeń przy użyciu wartości lingwistycznych modelowanych jako zbiory rozmyte typu L-R. Wagi kryteriów przydzielane są przez decydentów bezpośrednio jako stopień ważności każdego kryterium lub przy pomocy porównań parami i po zastosowaniu agregacji na przykład rozmytą wersją metody AHP.

$$\tilde{e}_j = (\tilde{a}_{j1}(\cdot)\tilde{a}_{j2}(\cdot)\cdots(\cdot)\tilde{a}_{jn})^{\frac{1}{n}} \tag{3.65}$$

$$\tilde{w}_j = \tilde{e}_j(\cdot)\left(\tilde{e}_1(+)\tilde{e}_2(+)\cdots(+)\tilde{e}_n\right)^{-1} \tag{3.66}$$

Oceny wariantów dokonane przez każdego decydenta biorącego udział w procesie poddawane są agregacji według formuły przedstawionej we wzorze (3.67) [76].

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{K}\left[x_{ij}^1(+)x_{ij}^2(+)\cdots(+)x_{ij}^K\right] = \frac{1}{K}\sum_{t=1}^{K} x_{ij}^t \tag{3.67}$$

gdzie x_{ij}^t jest oceną uzyskaną od t-tego decydenta.

Ważności zapisane zostają jako zbiór typu L-R w postaci przedstawionej we wzorze (3.68) [76].

$$\tilde{w}_j = \left(w_j^m, w_j^\alpha, w_j^\beta\right)_{LR} \tag{3.68}$$

Stąd przykładowa skala lingwistyczna dla ocen ważności może zostać zapisana, jak przedstawiono w tabeli 3.1 [76].

Tabela 3.1

Etykieta	Wartości L-R
Bardzo zły	$(0,0,1)_{LR}$
Zły	$(1,1,2)_{LR}$
Średnio zły	$(3,2,2)_{LR}$
Średni	$(5,2,2)_{LR}$
Średnio dobry	$(7,2,2)_{LR}$
Dobry	$(9,2,1)_{LR}$
Bardzo dobry	$(10,1,0)_{LR}$

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [76].

Wyznaczona macierz ocen wariantów decyzyjnych jest przedstawiona została we wzorze (3.69) [76].

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} = \left[\tilde{x}_{ij}\right]_{m\times n} \tag{3.69}$$

gdzie $\tilde{x}_{ij}$, $\forall i,j$, jest rozmytą oceną wydajności wariantu A_i, $i = 1,2,\ldots,m$, względem kryterium C_j, a $\tilde{w}_j$ jest rozmytą wagą kryterium C_j, $j = 1,2,\ldots,n$, należącą do wektora $\tilde{w}$ przedstawionego we wzorze (3.70) [76].

$$\tilde{w} = \begin{bmatrix} \tilde{w}_1 & \tilde{w}_2 & \cdots & \tilde{w}_n \end{bmatrix} \tag{3.70}$$

Przedstawione we wzorach (3.69) i (3.70) wartości preferencji oraz wag są modelowane przy pomocy zbiorów rozmytych typu L-R, przy czym: $\tilde{w}_j = \left(\tilde{w}_j^m, \tilde{w}_j^\alpha, \tilde{w}_j^\beta\right)_{LR}$ i $\tilde{x}_{ij} = (m_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij})_{LR}$.

Zgodność porównań pomiędzy wartościami na skali lingwistycznej (dla kryteriów subiektywnych) i na skalach ilościowych (dla kryteriów obiektywnych) osiągana jest przy pomocy normalizacji poprzez transformację wartości opisanych na różnych skalach do skal porównywalnej. Opisywana metoda wykorzystuje model normalizacyjny oparty o

liniową transformację skal zaproponowaną w [20]. W wyniku tych operacji utworzona zostaje rozmyta macierz decyzyjna przedstawiona we wzorze (3.71) [76].

$$\begin{aligned}
&\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m\times n} \\
&\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{m_{ij}}{c_j^*}, \frac{\alpha_{ij}}{c_j^*}, \frac{\beta_{ij}}{c_j^*}\right)_{LR}, \qquad j \in B \\
&\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{\alpha_{ij}^-}{m_{ij}}, \frac{\beta_{ij}a_j^-}{m_{ij}(m_{ij}+\beta_{ij})}, \frac{\alpha_{ij}a_j^-}{m_{ij}(m_{ij}-\alpha_{ij})}\right)_{LR}, \qquad j \in C \\
&c_j^* = \max_i(m_{ij} + \beta_{ij}), \qquad \text{dla } j \in B \\
&a_j^- = \max_i(m_{ij} - \alpha_{ij}), \qquad \text{dla } j \in C
\end{aligned} \tag{3.71}$$

gdzie B jest zbiorem kryteriów zysków, a C jest zbiorem kryteriów kosztów. Zastosowanie metody normalizacji pozwala zapewnić utrzymanie wartości przynależności zbiorów rozmytych w zakresie $\langle 0, 1\rangle$

Następnym krokiem metody jest wyznaczenie wariantu pozytywnie idealnego A^* według wzoru (3.72) [76].

$$A^* = [\tilde{r}_1^*, \tilde{r}_2^*, \ldots, \tilde{r}_n^*] \tag{3.72}$$

gdzie $\tilde{r}_{0j}^* = (1, 0, 0)_{LR}$, $j = 1, 2, \ldots, n$.

W dalszym etapie algorytmu wyznaczana jest macierz dystansów $\tilde{H}$ w postaci przedstawionej we wzorze (3.73), gdzie dystans wyznaczany jest według miary Hamminga [51, s. 53], zgodnie ze wzorem (3.74) [76].

$$\tilde{H} = \left[\tilde{d}_{ij}\right]_{m\times n} \tag{3.73}$$

$$\tilde{d}_{ij} = (\tilde{r}_{0j}^* - \tilde{r}_{ij}^*) \tag{3.74}$$

gdzie $i = 1, 2, \ldots, m$, $n = 1, 2, \ldots, n$, a $\tilde{d}_{ij} = (dm_{ij}, d\alpha_{ij}, d\beta_{ij})_{LR}$.

Wyznaczony wariant idealny jest następnie wykorzystany jako referencja dla porównań wariantów decyzyjnych, w celu wyznaczenia współczynnika relacji rozmytej „grey'a" dla wartości idealnej każdego wariantu $\gamma(\tilde{r}_{0j}^*, \tilde{r}_{ij})$. Schemat wyznaczania wartości γ przedstawia wzór (3.75) [76].

$$\gamma(\tilde{r}_{0j}^*, \tilde{r}_{ij}) = \frac{\min_i \min_j \tilde{\Delta}_{ij} + \zeta \max_i \max_j \tilde{\Delta}_{ij}}{\tilde{\Delta}_{ij} + \zeta \max_i \max_j \tilde{\Delta}_{ij}} \tag{3.75}$$

gdzie $\tilde{\Delta}_{ij} = \tilde{d}_{ij}$, a $\zeta \in < 0, 1 >$ jest współczynnikiem rozwiązującym, a $\gamma(\tilde{r}_{0j}^*, \tilde{r}_{ij}) = (\gamma m_{ij}, \gamma\alpha_{ij}, \gamma\beta_{ij})_{LR}$ jest zbiorem rozmytym typu L-R.

Stopień rozmytej relacji „grey'a" każdego wariantu decyzyjnego i wariantu idealnego określa wartość oceny rozmytej $\tilde{\Gamma}_{0,i} = (\tau m_{ij}, \tau\alpha_{ij}, \tau\beta_{ij})_{LR}$, obliczona zgodnie ze wzorem (3.76) [76].

$$\tilde{\Gamma}_{0,i} = \sum_{j=1}^{m} \tilde{w}_j(\cdot) r(\tilde{r}_{0j}^*, \tilde{r}_{ij}) \tag{3.76}$$

Wyznaczenie współczynników relacji „grey" pozwala na identyfikację relacji preferencji pomiędzy parami wariantów decyzyjnych. W celu uniknięcia utraty informacji związanej z procesem defuzyfikacji, w metodzie zastosowano procedurę wyznaczania preferencji i sporządzania rankingu zaproponowaną przez Hsu i Chen w [63]. Pierwszym etapem jest

obliczenie relacji rozmytej pomiędzy wariantami, jako różnicy pomiędzy dwoma zbiorami rozmytymi, zgodnie ze wzorami (3.77) i (3.78) [76].

$$\tilde{Z}_{ij} = \tilde{\Gamma}_{0,i}(-)\tilde{\Gamma}_{0,j} \tag{3.77}$$

$$\tilde{Z}^{\alpha}_{ij} = [z^{\alpha}_{ijl}, z^{\alpha}_{ijr}] \tag{3.78}$$

Gdzie $\Gamma^{\alpha}_{0,i} = [\Gamma^{\alpha}_{0,il}, \Gamma^{\alpha}_{0,ir}]$, $\Gamma^{\alpha}_{0,j} = [\Gamma^{\alpha}_{0,jl}, \Gamma^{\alpha}_{0,jr}]$, $z^{\alpha}_{ijl} = \Gamma^{\alpha}_{0,il} - \Gamma^{\alpha}_{0,jr}$, $z^{\alpha}_{ijr} = \Gamma^{\alpha}_{0,ir}, \Gamma^{\alpha}_{0,jl}$, $\Gamma^{\alpha}_{0,il} = \tau m^{\alpha}_{i} - \tau\alpha^{\alpha}_{i}$, $\Gamma^{\alpha}_{0,ir} = \tau m^{\alpha}_{i} + \tau\beta^{\alpha}_{i}$, $\Gamma^{\alpha}_{0,jl} = \tau m^{\alpha}_{j} - \tau\alpha^{\alpha}_{j}$, $\Gamma^{\alpha}_{0,jr} = \tau m^{\alpha}_{j} + \tau\beta^{\alpha}_{j}$, $\alpha \in \langle 0, 1\rangle$.

W zależności od uzyskanych wartości z^{α}_{ijl} i z^{α}_{ijr}, relacja pomiędzy wariantami A_i i A_j identyfikowana jest następująco [76]:

— A_i jest ściśle preferowana względem A_j, gdy $z^{\alpha}_{ijl} > 0$
— A_i nie jest ściśle preferowana względem A_j, gdy $z^{\alpha}_{ijl} < 0$
— gdy dla pewnych wartości α zachodzi $z^{\alpha}_{ijl} < 0$ i $z^{\alpha}_{ijr} > 0$, wtedy w zależności od przyjętej oceny e_{ij}, relacja pomiędzy wariantami A_i i A_j m a postać:
  — A_i jest preferowana względem A_j, gdy $e_{ij} > 0,5$
  — A_j jest preferowana względem A_i, gdy $e_{ij} < 0,5$
  — A_i jest równoważna A_j, gdy $e_{ij} = 0,5$

Wartość oceny e_{ij} wyznaczana jest zgodnie ze wzorem (3.79) [76].

$$e_{ij} = \frac{S_1}{S}, \qquad S > 0 \tag{3.79}$$

gdzie wartość S wyznaczona jest zgodnie ze wzorem (3.80).

$$S = S_1 + S_2, \qquad S_1 = \int_{x>0} \mu_{\tilde{z}_{ij}}(x)dx, \qquad S_2 = \int_{x<0} \mu_{\tilde{z}_{ij}}(x)dx. \tag{3.80}$$

gdzie e_{ij} jest wartością stopnia preferencji wariantu A_i względem A_j i równocześnie jest wartością oceny, $u_{\tilde{z}_{ij}}$ jest funkcją przynależności do zbioru $\tilde{\Gamma}_{0,i}(-)\tilde{\Gamma}_{0,j}$.

Zgodnie z powyższym algorytmem wyznaczana jest macierz preferencji $E = [e_{ij}]_{m\times n}$ i macierz ścisłej preferencji $E^s = [e^s_{ij}]_{m\times n}$, gdzie e^s_{ij} wyznaczane jest zgodnie ze wzorem (3.81) [76].

$$e^s_{ij} = \begin{cases} e_{ij} - e_{ji}, & \text{gdy } e_{ij} \geqslant e_{ji}, \\ 0, & \text{w pozostałych przypadkach.} \end{cases} \tag{3.81}$$

Na podstawie wartości macierzy E^s określany jest stopień dominacji (przewyższania), gdzie niezdominowany stopień wariantu A_i może zostać zdefiniowany zgodnie ze wzorem (3.82) [76].

$$\mu^{ND}(A_i) = \min_{\substack{j \in \Omega \\ j \neq i}} \{1 - e^s_{ji}\} = 1 - \min_{\substack{j \in \Omega \\ j \neq i}} e^s_{ji}, \tag{3.82}$$

gdzie $\Omega = \{A_1, A_2, \ldots, A_m\}$ jest zbiorem wariantów decyzyjnych.

Większa wartość $\mu^{ND}(A_i)$ wskazuje na większy stopień niezdominowania danego wariantu, co jest równoznaczne z większą atrakcyjnością danego wariantu dla decydenta. Stąd, wartości $\mu^{ND}(A_i)$ stanowią wyznacznik do konstrukcji rankingu wariantów decyzyjnych [76].

W tabeli 3.2 przedstawiono analizę mocnych i słabych stron zastosowania powszechnie dostępnych metod wielokryterialnych we wspomaganiu rozwiązywania sytuacji decyzyjnych uwzględniających dane nieostre.

Tabela 3.2: Analiza SWOT stanu faktycznego wspomagania decyzji

S (mocne strony)	**O** (szanse)
— uwzględniona jest wielokryterialność sytuacji decyzyjnej — przeprowadzona zostaje dogłębna analiza sytuacji decyzyjnej — zastosowanie metod rozmytych pozwala na uwzględnienie opisów słownych wyrażonych przez decydenta — istniejące metody wielokryterialne pokrywają wiele zastosowań zgodnie z dostępnymi wskazaniami w literaturze naukowej i praktycznej	— raz wybrana metoda wielokryterialna zapewni szybkie dostarczenie rekomendacji przy małej zmienności otoczenia — istnieją dogłębne analizy prezentujące obliczeniową interpretację określonych klas problemów decyzyjnych — decydenci oczekują automatyzacji przebiegu procesu decyzyjnego ograniczającej do minimum konieczność nadzoru z ich strony
W (słabe strony)	**T** (zagrożenia)
— wymagana konsultacja analityka zarówno przy formułowaniu problemu decyzyjnego, jak i przy doborze metody wielokryterialnej do wspomagania danej sytuacji decyzyjnej — konieczny kompletny zbiór wariantów decyzyjnych do dokonania doboru podejścia wielokryterialnego przez analityka — dobór metody wielokryterialnej wpływa na rezultat rekomentacji poprzez domyślne (niejawne) uwzględnienie kontekstu (determinant środowiskowych)	— niepełny opis sytuacji decyzyjnej — brak wystarczającej informacji do doboru metody odpowiedniej dla zadanego problemu decyzyjnego — nieufność decydenta wobec rezultatów wspomagania — trudności z pozyskaniem konsultacji od analityka

Źródło: Opracowanie własne.

Przedstawiona powyżej tabela zestawia stan faktyczny praktyki decyzyjnej, polegającej na uczestnictwie analityka nadzorującego całość procesu decyzyjnego.

Wspomagania decyzji można podzielić na dwa zasadnicze podejścia zależne od dostępnej formy opisu rzeczywistości. Sytuacje decyzyjne opisane precyzyjnymi i ostrymi wartościami mogą zostać rozwiązane przy pomocy klasycznych modeli matematycznych i metod ilościowych. W przypadku bardziej naturalnie opisanych problemów świata rzeczywistego opis jest przedstawiony w postaci słów lub wartości przybliżonych i nieprecyzyjnych, co wymaga zastosowania wnioskowania lingwistycznego i przetwarzania przy użyciu wartości lingwistycznych i nieprecyzyjnych [105].

Przetwarzanie „miękkie" (soft computing) oznacza wykorzystanie wartości nieostrych, lingwistycznych i niedeterministycznych, a także metod takich jak sieci neuronowe i algorytmy ewolucyjne. W szerszym ujęciu jest to zastosowanie kombinacji więcej niż jednego podejścia, co pozwala na uzyskanie lepszych rezultatów, niż zastosowanie dowolnej pojedynczej metody [105].

Wykorzystanie danych nieostrych we wspomaganiu decyzji wynika z dwóch podstawowych przesłanek: z nieostrości (lub też nieprecyzji) danych wejściowych, lub z braku znaczenia niewielkich różnic pomiędzy wartościami. Przedstawione w rozdziale metody pozwalają na obliczenia z zastosowaniem danych wyrażonych lingwistycznie na zbudowanym przez decydenta słowniku. Również wynik procesu wspomagania może zostać określony na słowniku, a także zinterpretowany zgodnie z wartością pojęciową wprowadzonych danych.

Obliczenia miękkie oraz bazujące na percepcji są przyszłościowym kierunkiem rozwoju informatyki. Przedstawiona w pracy [102] synteza sytuuje wymienione podejścia jako naturalne kroki ewolucji inteligencji maszyn. Celem badaczy jest dostosowanie obliczeń komputerowych do naturalnej dla człowieka komunikacji opartej na pojęciach. Wspomaganie decyzji na wartościach lingwistycznych jest jednym ze wstępnych kroków na tej ścieżce.

4. Budowa algorytmu do wspomagania problemów wyboru

Pierwszym zadaniem wymaganym do przeprowadzenia procesu wspomagania decyzji jest sporządzenie opisu sytuacji decyzyjnej. Dostarczona przez decydenta informacja powinna dokonać tego opisu poprzez maksymalnie dokładną i rzetelną specyfikację cech rzeczywistości, które obejmuje problem decyzyjny. Cechami rzeczywistości są właściwości analizowanych przedmiotów, zdarzeń lub zjawisk, a także oczekiwania decydenta związane z pożądanym przez niego wynikiem implementacji wybranego wariantu decyzyjnego. Wykorzystanie matematycznych metod wspomagania decyzji wymaga opisania sytuacji decyzyjnej, traktując każde kryterium jako niezależny wymiar [126, 52]. Stąd opis sytuacji decyzyjnej, opisanej przez n kryteriów, przedstawiany jest jako zbiór informacji C, zdefiniowany jak przedstawiono we wzorze (4.1).

$$C = \{C_1, C_2, \ldots, C_n\} \tag{4.1}$$

gdzie $C_i,\ i = 1, 2, \ldots, n$ jest określonym przez decydenta podzbiorem definiującym i-te kryterium sytuacji decyzyjnej.

Rozważany w niniejszej pracy problem wyboru charakteryzuje się nieznanym *a priori* zbiorem wariantów decyzyjnych. Stąd, dla konstrukcji modelu w sytuacji nieznajomości zbioru wariantów decyzyjnych, przyjęto symbol $\tilde{A}$ oznaczający „hipotetyczny zbiór wariantów decyzyjnych". Natomiast do opisu operacji matematycznych przeprowadzanych na wartościach opisujących znane warianty decyzyjne zastosowano zapis A, oznaczający zbiór „rozważanych wariantów decyzyjnych". Pojęcie „warianty decyzyjne" oznacza akcje świata rzeczywistego, których implementacja spełnia wymagania decydenta odnośnie zakresów akceptowalności (dziedziny) wartości atrybutów [126].

Ostateczny opis wariantów decyzyjnych składa się ze zbioru wymiarów opisujących wariant decyzyjny, co Roy definiuje następująco [126]: *„Zbiór $\bar{v}$ o $\bar{n}$ wymiarach, w których można opisać w sposób wyczerpujący i użyteczny całość konsekwencji tworzących v(A), jest zwany widmem konsekwencji (spectre des conséquences). Jest ono związane z rozważaną fazą studium."*

Wymiary przedstawienia sytuacji decyzyjnej dla celów porównań konsekwencji obejmują pewien zakres rzeczywistości. Z jednej strony pożądany jest największy stopień zupełności (wyczerpywalności) opisu tak, aby porównane zostały rzeczywiste konsekwencje obranych działań, a z drugiej strony przedstawienie takie może nie być możliwe *a priori*, lub być niepraktyczne (kosztowne lub czasochłonne).

Wyrażona przez decydenta informacja opisująca kryterium ma na celu ukazanie zależności pomiędzy wartością rozpatrywanego wariantu decyzyjnego dla atrybutu odpowiadającego opisywanemu kryterium, a siłą preferencji decydenta dla danego wariantu. Zależność ta może mieć charakter bezwzględny (siła preferencji atrybutu zależna wyłącznie od wartości atrybutów) lub względny (relacyjny model wzajemnych preferencji

pomiędzy wariantami decyzyjnymi). Stąd, zasób informacji dla kryterium C_i określono jako zbiór przedstawiony we wzorze (4.2).

$$C_i = \{g_i(\tilde{A}), D_i(A)\} \tag{4.2}$$

gdzie $g_i(\tilde{A})$ jest funkcją siły preferencji, której argumentem jest wartość atrybutu opisanego przez kryterium C_i dla wariantu decyzyjnego, a $D_i(A)$ jest dziedziną akceptowanych wartości wariantów decyzyjnych dla kryterium C_i.

Problem decyzyjny określony jest również przez szereg informacji dodatkowych związanych z sytuacją decyzyjną a także z oczekiwaniami decydenta odnośnie rekomendacji i wyników z implementacji wybranego wariantu decyzyjnego. Oczekiwania te związane są także z podejmowanym ryzykiem niedocenienia wpływu cech negatywnych lub przecenienia wpływu cech pozytywnych wybranego wariantu.

Preferencje określające, w jaki sposób są porównywane warianty decyzyjne, obejmują wartości progów związane z porównywaniem atrybutów analizowanych wariantów decyzyjnych. Definicje metod wielokryterialnych włączonych do badań w ramach niniejszej rozprawy posługują się wartościami progowymi dla wymienionych poniżej kategorii.

Próg weta jest wartością różnicy, która powoduje zaprzeczenie relacji przewyższania. Zdefiniowany jest dla każdego kryterium w postaci określonej przez decydenta wartości bezwzględnej na skali kryterium (wzór (4.3) na wartość weta dla kryterium g_i) lub funkcji wartości atrybutu (wzór (4.4) na funkcję obliczającą wartość weta dla kryterium g_i) z określonymi przez decydenta współczynnikami α i β.

$$v_i \in s_{g_i} \tag{4.3}$$

$$v_i = \alpha a_{ji} + \beta \tag{4.4}$$

Próg nierozróżnialności jest maksymalną wartością różnicy, dla której porównywane wartości określane są jako „nierozróżnialne", i zdefiniowany jest dla każdego kryterium w postaci określonej przez decydenta wartości bezwzględnej na skali kryterium (wzór (4.5) na wartość weta dla kryterium g_i) lub funkcji wartości atrybutu (wzór (4.6) na funkcję obliczającą wartość weta dla kryterium g_i) z określonymi przez decydenta współczynnikami α i β.

$$q_i \in s_{g_i} \tag{4.5}$$

$$q_i = \alpha a_{ji} + \beta \tag{4.6}$$

Próg preferencji jest minimalną wartością różnicy, powyżej której przyjmowane jest przewyższanie jednej z porównywanych wartości, i zdefiniowany jest dla każdego kryterium w postaci określonej przez decydenta wartości bezwzględnej na skali kryterium (wzór (4.7) na wartość weta dla kryterium g_i) lub funkcji wartości atrybutu (wzór (4.8) na funkcję obliczającą wartość weta dla kryterium g_i) z określonymi przez decydenta współczynnikami α i β.

$$p_i \in s_i \tag{4.7}$$

$$p_i = \alpha a_{ji} + \beta \tag{4.8}$$

4.1. Definicja problemu decyzyjnego

W pracy [53] zaproponowano wyodrębnienie zbioru wartości wpływających na modelowanie preferencji. W niniejszej rozprawie natomiast rozszerzono to podejście i włączono w opis sytuacji decyzyjnej zbiór szerszej kategorii, który zawiera wartości wpływające na przebieg całego procesu podejmowania decyzji. Zdefiniowany w ten sposób zbiór *meta-danych* procesu decyzyjnego przedstawia wzór (4.9).

$$\Phi = \{W, P, Q, V, U, K\} \tag{4.9}$$

gdzie wartości wektorów $P = \{p_1, p_2, \ldots, p_n\}$ i $Q = \{q_1, q_2, \ldots, q_n\}$ określają warunki wsparcia odpowiednio relacji P i Q, i określane są jako *próg preferencji* p i *próg nierozróżnialności* q; zbiór $W = \{W_1, W_2, \ldots, W_n\}$ zawiera wartości w_i, lub podzbiory wartości W_i, określające odpowiednio bezwzględne i względne ważności kryterium C_i; w przypadku określenia wag względnych, wartości w_{ij} podzbioru $W_i = \{w_{i1}, w_{i2}, \ldots, w_{in}\}$ określone są na skali Likerta (Saaty'ego), z kolei w przypadku zdefiniowania podzbioru jednoelementowego $W_i = \{w_i\}$, wartość może być ostra lub rozmyta – zależnie od specyfikacji decydenta; zbiór $U = \{u_1, u_2, \ldots, u_n\}$ jest zbiorem funkcji użyteczności dla atrybutu odpowiadającego kryterium C_i; zbiór $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ zawiera określane przez decydenta wartości weta, które określają kryterium odrzucenia preferencji rozważanego wariantu decyzyjnego ze względu na znaczącą różnicę wartości pojedynczego kryterium; w sytuacji, gdy $p_i = q_i = \varnothing$ dla kryterium C_i, wymagana jest skala przedziałowa i preferencja warunkowana jest przez operator $>$ na zastosowanej skali; K jest opisem dziedziny problemu decyzyjnego służącym do dobrania metody zgodnej z zastosowaniami praktycznymi, które potwierdziły dopasowanie wybranej metody[1].

Wobec powyższego, w niniejszej pracy zastosowano model problemu decyzyjnego uwzględniający opis środowiskowy (kontekst) sytuacji decyzyjnej. W dalszej części rozważań niniejszej pracy, problem decyzyjny przedstawiony jest jako uporządkowana czwórka – zgodnie ze wzorem (4.10).

$$(C, \Phi, \tilde{A}, \Psi) \tag{4.10}$$

gdzie C jest zbiorem kryteriów, zgodnie ze wzorem (4.1); Φ jest zbiorem meta-danych procesu (kontekst), zgodnie ze wzorem (4.9); $\tilde{A}$ jest zbiorem potencjalnych wariantów decyzyjnych (przedstawionych jako model danych doboru wariantów), a Ψ jest kolekcją metod rozważanych przy rozwiązaniu problemu, zgodnie z tabelą 4.2.

Zamiarem decydenta jest dokonanie wyboru takiego wariantu, który najlepiej spełnia jego preferencję dla określonego zbioru kryteriów. Stąd, w dalszych rozważaniach przyjęto rozwiązanie sytuacji decyzyjnej jako problem maksymalizacji rezultatu przekształcenia F, wyznaczającego stopień spełnienia zadanych kryteriów przez kolejne warianty decyzyjne, przy uwzględnieniu założeń kształtu procesu decyzyjnego zadanych przez Φ, co obrazuje wzór (4.11).

$$G(a_p) = \max F(C(A), \Phi) \tag{4.11}$$

gdzie a_p jest najbardziej preferowanym wariantem decyzyjnym wybranym ze zbioru wariantów A; $G(a_p)$ jest wydajnością wariantu a_p (oznaczaną też jako ocena spełnienia grupy kryteriów C); zbiór Φ jest zbiorem charakterystyk opisujących podejmowanie decyzji przez decydenta (na przykład zgoda na kompensację między kryteriami), które będą również określane jako „meta-dane sytuacji decyzyjnej".

[1] Jest to kryterium dziedzinowe do zastosowania z bazą wiedzy

Zgodnie ze wprowadzonymi powyżej definicjami, problem obrany w niniejszej rozprawie wyrazić można jako: Problem odnalezienia takiego przekształcenia F, które dokona wyboru wariantu decyzyjnego a_p, dostarczającego maksymalnej korzyści decydentowi i rozważającego zbiór kryteriów C w sposób zgodny z charakterystykami opisanymi przez zbiór Φ wewnętrznych charakterystyk rozumowania (meta-danych procesu decyzyjnego).

Stąd proponowane narzędzie wspomagające rozwiązywanie ZWPW umożliwia decydentowi wyrażenie parametrów przedstawionych w tabeli 4.1.

Tabela 4.1: Składowe opisu sytuacji decyzyjnej

Symbol	Nazwa	Opis
G	zbiór kryteriów	$G = \{g_1, g_2, \ldots, g_n\}$ to zbiór n funkcji g_i kryteriów problemu z określonym przez decydenta kształtem. Funkcje te przyjmują wartości na skali wynikającej z przekształcenia wartości atrybutów wariantów decyzyjnych zgodnie z oczekiwaniami decydenta.
v_i	próg weta	Wartość kryterium g_i określająca wetowanie sytuacji przewyższania wariantu decyzyjnego
w_i	bezwzględna waga kryterium i	Wartość ważności kryterium g_i taka, że $\sum_{j=1^n} w_j = 1$
W_i	względne wagi kryterium i	Zbiór wartości ważności kryterium względem pozostałych kryteriów: $W_i = \{w_{1i}, w_{2i}, \ldots, w_{ni}\}$ $w_{ii} = 1$
p_i	próg silnej preferencji	Próg preferencji kryterium g_i, dla którego: $g_i(a_1) - g_i(a_2) \geqslant p_i \Rightarrow g_i(a_1)P(\succ)g_i(a_2)$
q_i	próg nierozróżnialności	Próg nierozróżnialności kryterium g_i, dla którego: $g_i(a_1) - g_i(a_2) \leqslant q_i \Rightarrow g_i(a_1)Ig_i(a_2)$
D_i	dziedzina wartości atrybutów	Zbiór wyznaczający dopuszczalne wartości atrybutów kryterium g_i. Dopuszczalna jest jedno lub dwustronna otwartość zbioru. Dopuszczalne definicje zakresów wartości przedstawiają się następująco: $(-\infty, \infty)$, $\langle x, \infty)$, $(-\infty, y\rangle$, $\langle x, y\rangle$, $\langle \tilde{x}, \infty\rangle$, $(-\infty, \tilde{y}\rangle$, $\langle \tilde{x}, \tilde{y}\rangle$, $\langle x, \tilde{y}\rangle$, $\langle \tilde{x}, y\rangle$, gdzie: $\{x, y\}$ to wartości ostre, $\{\tilde{x}, \tilde{y}\}$ to zbiory rozmyte.
K	dziedzina sytuacji decyzyjnej	Parametr oznaczający dziedzinę (tematykę) obszaru rzeczywistości, której dotyczy sytuacja decyzyjna

Źródło: Opracowanie własne.

Podane w tabeli 4.1 charakterystyki nie pozwalają na pełen opis każdego możliwego problemu decyzyjnego. Zakres charakterystyk został dobrany w celu umożliwienia zdefiniowania problemu wyboru najlepszego wariantu spośród możliwego do opisania zbioru alternatyw i jest zgodny z praktyką stosowaną w literaturze [126, 127]. Celem opracowania takiego zestawu charakterystyk było umożliwienie zdefiniowania problemu wyboru najlepszej lokalizacji, zdefiniowanego w podrozdziale 1.4. Dopuszczalne jest określenie przez decydenta podzbioru parametrów (wartość $\varnothing$ dla parametru), przy czym fakt przypisania wartości $\varnothing$ do parametru stanowi również element opisu sytuacji decyzyjnej.

Dopuszczalne jest określenie następujących parametrów jako zbioru pustego: W, p, q, v, u, z zastrzeżeniem spełnienia warunków przedstawionych we wzorze (4.12).

$$\begin{aligned} g_i = \varnothing \vee u_i = \varnothing \\ u_i \neq \varnothing \Rightarrow v_i = \varnothing \end{aligned} \tag{4.12}$$

4.2. Kolekcja metod wielokryterialnych

Algorytm opisany w niniejszej rozprawie dokonuje wyboru najbardziej dopasowanego przekształcenia F z dostępnej kolekcji przekształceń Ψ. W kolekcji przekształceń zawarta została grupa metod spośród istniejących metod wielokryterialnych, które przedstawione zostały w rozdziale 2. Metody należące do kolekcji wymieniono w tabeli 4.2 razem z przypisaną im symboliką, która została użyta w dalszej części rozprawy.

Tabela 4.2: Zawartość kolekcji przekształceń Ψ

Symbol	Nazwa	Charakterystyka	P.
C_j	Conjonctive	Odrzucanie wariantów nie spełniających minimalnego poziomu akceptowalności.	-
D_j	Disjonctive	Wybór wariantów na podstawie skrajnych wartości dla dowolnego kryterium. Do wyboru wariantu wykorzystywane są pożądane poziomy wartości dla każdego atrybutu.	-
T_P	TOPSIS	Wybór wariantu o najmniejszym dystansie do wariantu idealnego i największym dystansie do wariantu najmniej pożądanego.	α
M_V	MAVT	Agregacja funkcji wartości każdego z kryteriów w celu ustalenia globalnej funkcji wartości V. Funkcja ta może przyjąć postać $\sum$, $\prod$ lub mieszaną.	α
U_T	UTA	Wykorzystanie regresji porządkowej do wyznaczenia funkcji wartości. Globalna funkcja wartości uzyskiwana jest poprzez agregację addytywną.	α
S_M	SMART	Wykorzystanie średnich wartości wag liniowych do wyznaczenia bliskiej aproksymacji funkcji użyteczności.	α
M_U	MAUT	Agregacja funkcji użyteczności każdego z kryteriów do wyznaczenia globalnej funkcji użyteczności. Funkcja ta może przyjąć postać $\sum$, $\prod$ lub mieszaną.	α
A_H	AHP	Przekształcenie subiektywnych ocen decydenta na wartości wag kryteriów. Procedura wykorzystuje dekompozycję problemu i macierz wartości porównań wzajemnych atrybutów do konstrukcji całościowej oceny wariantów decyzyjnych.	α, γ
E_1	ELECTRE I	Zastosowanie podejścia opartego o relację przewyższania. Procedura dokonuje redukcji wielkości „rdzenia" wariantów niezdominowanych przez inne warianty. Cechą charakterystyczną procedury jest dokonywanie agregacji preferencji, a nie wartości wydajności.	α

Tabela 4.2: Zawartość kolekcji przekształceń Ψ

Symbol	Nazwa	Charakterystyka	$P.$
E_2	ELECTRE II	Wykorzystanie dwóch stopni przewyższania: „słabe" i „silne".	γ
E_3	ELECTRE III	Przewyższanie wyrażone poprzez indeks wiarygodności.	γ
E_4	ELECTRE IV	Procedura jak w ELECTRE III, bez wag.	γ
E_S	ELECTRE IS	Procedura identyczna jak ELECTRE I, wprowadzony próg nierozróżnialności q.	α
E_T	ELECTRE TRI	Procedura podobna do ELECTRE III, wykorzystuje techniki połączeń i podziałów do przypisania wariantów do klas.	β
P_{T1}	PROMETHEE I	Bazuje na rodzinie ELECTRE, wprowadza sześć funkcji preferencji decydenta dla każdego kryterium. Konstrukcja częściowego porządku przy pomocy strumieni wejściowych i wyjściowych.	γ
P_{T2}	PROMETHEE II	Procedura jak w PROMETHEE II, konstrukcja kompletnego pre-porządku poprzez agregację strumieni wejściowych i wyjściowych.	γ
M_L	MELCHIOR	Rozszerzenie metody ELECTRE IV.	γ
O	ORESTE	Procedura wykorzystująca jedynie uporządkowane oceny wariantów i wartości ważności kryteriów.	γ
R	REGIME	Konstrukcja trójstanowej macierzy porównań parami, gdzie 1 oznacza dominację, 0 równoważność, -1 negatywną dominację. Agregacja macierzy dostarcza całkowity pre-porządek wariantów.	γ
N_1	NAIADE I	Zastosowanie miar dystansów i rozmytych porównań par. Obliczenie strumieni jak w metodach PROMETHEE.	γ
N_2	NAIADE II	Zastosowanie miar dystansów i rozmytych porównań par. Obliczenie strumieni jak w metodach PROMETHEE.	γ
Q	QUALIFLEX	Zastosowanie progresywnych mutacji w celu dostarczenia rankingu potwierdzającego informację porządkową.	γ

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [52].

W powyższych podrozdziałach dokonano opisu założeń dla algorytmu przedstawionego dalej w rozprawie. Zgodnie z tymi założeniami, celem algorytmu jest dokonanie wyboru jednego z przekształceń z kolekcji F na podstawie wyrażonej przez decydenta informacji w postaci zbiorów C i Φ w taki sposób, aby rezultat wspomagania decyzji dostarczył rekomendacji maksymalizującej korzyść decydenta nie tylko w zakresie spełnienia kryteriów problemu C, ale również w zakresie dopasowania do przebiegu samego procesu decyzyjnego opisanego przez zbiór Φ, zawierający także charakterystykę dziedziny tematycznej sytuacji decyzyjnej K.

4.3. Dane lingwistyczne w preferencjach i opisie sytuacji decyzyjnej

Przedstawiony w niniejszej rozprawie algorytm uwzględnia możliwość pozyskania danych od decydenta w postaci lingwistycznej. Dane te mogą dotyczyć lingwistycznej (lub rozmytej) specyfikacji kryteriów, rozmytego modelowania preferencji, a także lingwistycznych (lub rozmytych) opisów wariantów decyzyjnych. W zależności od miejsc występowania wartości lingwistycznych, zaproponowane zostanie odpowiednie przekształcenie ze zbioru Φ.

Wady ścisłego modelowania relacji preferencji dostrzeżone zostały już w filozofii greckiej przez Poincaré i Luce (za [99]), którzy dowodzili, że o preferencji jednego z elementu nie decyduje bezwzględna różnica ocenianego parametru. Rzeczywiste sytuacje decyzyjne dotyczą różnorodnych obiektów i działań, stąd różne może być podejście do wyznaczania preferencji. Dla pewnych grup problemów zastosowanie ustalonego progu preferencji jest w pełni uzasadnione (na przykład: minimalna wytrzymałość mechaniczna, ograniczenie budżetowe, wartości parametrów wynikające z norm), natomiast dla pewnych grup problemów (lub samych kryteriów), właściwszym podejściem będzie zastosowanie funkcji preferencji na przedziale $\langle 0, 1 \rangle$.

Następujące techniki rozwiązywania problemu nieprecyzyjnych danych zostały przedstawione w [127]:

$S.\alpha$ — wyeksponowanie granic zdroworozsądkowej interpretacji różnych wartości z domeny,

$S.\beta$ — budowa zestawu scenariuszy opisujących różne możliwe konteksty,

$S.\gamma$ — wyznaczenie zestawu wektorów ważności, zgodnych z naturą analizowanej sytuacji decyzyjnej.

Wykorzystanie ocen lingwistycznych do wspomagania podejmowania decyzji oparto na następujących założeniach przedstawionych w [87]:

1. określenia lingwistyczne mogą zostać przedstawione w postaci wypukłych, normalnych i całkowalnych zbiorów rozmytych;
2. eksperci są w stanie dokonać wyboru preferowanej etykiety lingwistycznej do oceny wariantu decyzyjnego;
3. eksperci mogą samodzielnie zdefiniować zbiór rozmyty, który będzie odpowiadał określeniu/terminowi lingwistycznemu;
4. dostarczone przez eksperta opisy alternatyw mogą zawierać więcej niż jedną etykietę lingwistyczną.

Dla celów opracowywanego algorytmu przyjęto model zachowania danych lingwistycznych zgodnie ze wzorem (3.28), wprowadzonym w podrozdziale 3.2. Wsparto się przy tym wynikami zaprezentowanymi w [155], które stanowią o wzroście satysfakcji decydenta w sytuacji, gdy ma możliwość posłużenia się różnymi skalami wyrażania preferencji w procesie decyzyjnym.

Uzupełnienie kolekcji metod wielokryterialnych o metody lingwistyczne ma na celu rozszerzenie spektrum rozwiązywanych problemów wyboru o problemy, których opis został wyrażony w sposób nieilościowy. Rozważono przy tym konieczność dobrania metod rozmytych, odpowiadających zawartym w kolekcji metodom operującym na wartościach liczbowych, w celu zachowania porównywalności zastosowań metod w rozszerzonym zbiorze Ψ.

Jedną z koncepcji przyjmowanych przez autorów rozmytych rozszerzeń metod wielokryterialnych jest wykorzystanie operatorów rozmytych w przekształceniach wynikających z definicji metody. Podejście to polega na podstawieniu wartości rozmytych jako argumentów wejściowych i wartości ważności w modelu decyzyjnym i zastosowanie rozmytych operatorów matematycznych w miejsce odpowiadających im działań na liczbach ostrych. Trudności przy stosowaniu w pełni rozmytego podejścia nastręcza niejednoznaczność wzajemnych porównań wartości rozmytych. Jedną z technik sporządzania rankingu zbiorów rozmytych przytoczono w podrozdziale 3.1. Zaproponowany algorytm wykonuje porównania wartości rozmytych zgodnie z postacią przedstawioną we wzorach (3.22)–(3.25).

Spośród dostępnych w literaturze aplikacji metod *stricte* rozmytych oraz rozmytych modyfikacji metod dla danych ostrych wybrano trzy metody do uwzględnienia w algorytmie. W związku z powyższym, zbiór Ψ przedstawiony w tabeli 4.2 uzupełniony został o trzy metody operujące na danych nieostrych (lingwistycznych), które wymieniono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3: Metody operujące na danych nieostrych włączone do kolekcji przekształceń Ψ

Symbol	Nazwa	Charakterystyka	$P.$
fT_P	Fuzzy TOPSIS	Oceny odwzorowane przez słownik lingwistyczny, wyznaczenie dystansów od rozwiązań pozytywnie i negatywnie idealnych przy pomocy wartości przedziałowych (α-cięcia) dla wybranych poziomów α (ocenia czy decydent optymistyczny czy pesymistyczny). Odległość względna jako wynik zadania optymalizacyjnego (optymalizacja nieliniowa).	
fP_T	Fuzzy PROMETHEE	Rozszerzenie PROMETHEE o dane rozmyte – wprowadza niepewność opisów wariantów, niepewność danych wejściowych. Obliczenie strumieni wchodzących i wychodzących na podstawie rozmytej relacji przewyższania (produkt funkcji preferencji i funkcji przynależności wartości atrybutu).	
fK_O	Fuzzy Kuo	Na obliczeniach wykazana racjonalność i analiza dyskryminacyjna obranej metody, zaadresowana kwestia zbliżonych wydajności wariantów decyzyjnych, założona niezależność kryteriów, należałoby rozwinąć metodę o przypadki niezależnych, zależnych i wzajemnie zależnych kryteriów. Wyznaczany jest współczynnik relacji „grey" dla każdego wariantu względem każdego kryterium i wariantu idealnego. Współczynnik ten jest uwzględniany przy obliczaniu dystansu Hamminga każdego wariantu do wariantu idealnego.	

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [76, 45, 144].

Przedstawione w tabeli 4.3 metody rozmyte wykorzystują różne notacje do obliczeń na wartościach rozmytych (lingwistycznych). Podstawowe operatory dla liczb rozmytych opisanych przez trójkątne i trapezoidalne funkcje przynależności, wykorzystane do obli-

czeń przy pomocy opracowanego algorytmu, przedstawiono we wzorach (3.1)–(3.21) w podrozdziale 3.1.

Wybór rozmytej metody wielokryterialnej do rozwiązania sytuacji decyzyjnej podyktowany jest nie tylko wystąpieniem rozmytych lub lingwistycznych wartości w definicji kryteriów, wag lub opisie wariantów decyzyjnych. Istotnym czynnikiem jest również charakter danych, dla których obliczenia na wartościach ostrych mogą prowadzić do zniekształcenia charakteru sytuacji decyzyjnej. W takiej sytuacji wskazane jest modelowanie ostrych wartości określających problem decyzyjny w postaci zbiorów rozmytych typu singleton. Zdeterminowanie, czy zadana sytuacja decyzyjna powinna podlegać wymienionemu przekształceniu, jest wynikiem analizy zbioru K.

Wykorzystanie różnych notacji do zapisu zbiorów rozmytych (por. podrozdz. 3.1) przez metody uwzględnione w przedstawionych badaniach, nakłada konieczność opracowania schematów konwersji wartości pomiędzy różnymi metodami, a także uwzględnienia możliwych do określenia przez decydenta różnych kształtów funkcji przynależności.

Spośród szerokiego zakresu metod wielokryterialnych dostosowanych do obliczeń na danych ostrych, do kolekcji Ψ włączone zostały metody wymienione w tabeli 4.3. Wybór tych metod podyktowany został zastosowaniem ich do problemów o charakterystykach istotnych z punktu widzenia niniejszej rozprawy. W szczególności: metoda Fuzzy PROMETHEE zastosowana została do oceny wpływu na środowisku naturalne [45], wyboru strategii wykorzystania energii geotermalnej [48]; metoda Fuzzy TOPSIS została wykorzystana do planowania prac konserwacyjnych dla mostów drogowych [144]; natomiast metoda Fuzzy Kuo wykorzystana została do wyboru lokalizacji dla centrum logistycznego [76].

Ze względu na wykorzystanie różnych notacji do zapisu zbiorów rozmytych przez metody w kolekcji $f\Psi'$, zastosowano metody konwersji pomiędzy różnymi notacjami. W szczególności metoda fK_O operuje na trójkątnym modelu L-R funkcji przynależności postaci (3.4) (gdzie $a^L = a^R$), metoda fP_T operuje na modelu L-R w postaci trapezoidalnej, a metoda fT_P na zapisie trójkątnym w postaci podanej we wzorze (3.1).

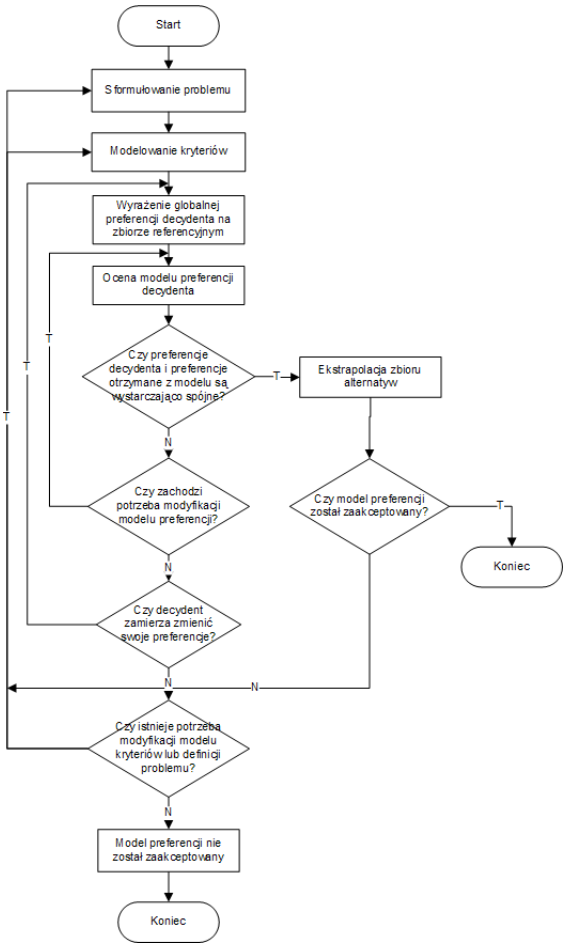
Konwersja pomiędzy wymienionymi powyżej notacjami przebiega w sposób następujący: dla przekształcenia wartości trapezoidalnej L-R na postać trapezoidalną (a, b, c, d), gdzie a, b, c, d są kolejno punktami o μ równym odpowiednio 0,1,1,0 zgodnie ze wzorem (4.13), konwersja z postaci (a, b, c, d) na postać L-R dokonana jest zgodnie ze wzorem (4.14).

$$(m_l, m_u, \alpha, \beta) = (a, b, c, d), \text{ gdzie: } \begin{cases} a = m_l - \alpha \\ b = m_l \\ c = m_u \\ d = m_u + \beta \end{cases} \tag{4.13}$$

$$(a, b, c, d) = (m_l, m_u, \alpha, \beta), \text{ gdzie: } \begin{cases} m_l = b \\ m_u = c \\ \alpha = b - a \\ \beta = d - c \end{cases} \tag{4.14}$$

4.4. Konstrukcja problemu wyboru na podstawie opisu sytuacji decyzyjnej

Etap interakcji z decydentem ma krytyczne znaczenie dla zapewnienia wysokiej jakości rekomendacji otrzymanej w wyniku wspomagania decyzji. Proces wyrażania oczekiwań i określania preferencji jest niejednokrotnie procesem trudnym i niekomfortowym dla decydenta. Skrajnym przypadkiem takiej sytuacji jest wspomaganie członka wyższej kadry menedżerskiej w podejmowaniu decyzji o słabo określonej strukturze i o słabo przez niego znanych możliwych konsekwencjach. Przedstawiony na rysunku 4.1 schemat iteracyjnego procesu zebrania oczekiwań został wykorzystany jako zestaw wytycznych tworzenia interfejsu użytkownika dla systemu wspomagającego podejmowanie decyzji, opracowanego w ramach prac nad niniejszą rozprawą.



Rysunek 4.1: Schemat procesu decyzyjnego opartego o deagregację

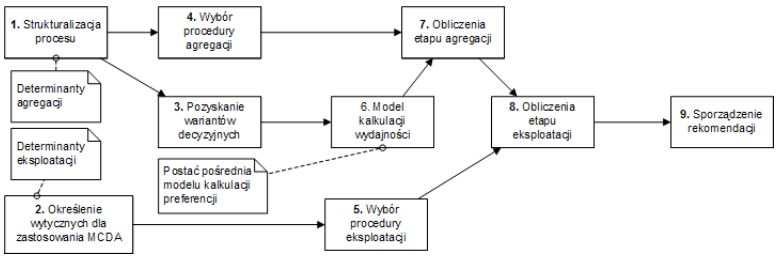
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [134]

Następujące kroki algorytmu zostały przyjęte we wspomaganiu decyzji algorytmem eksperckim [87]:

— Ocena ekspercka: eksperci wybierają oceny lingwistyczne, definiują odpowiadające ocenom zbiory rozmyte i oceniają alternatywy,
— Synteza indywidualnych ocen ekspertów: decydent dokonuje syntezy ocen ekspertów odnośnie każdej alternatywy,

— Podejmowanie decyzji: decydent dokonuje wyboru na podstawie zsyntezowanych ocen eksperckich dla wszystkich alternatyw.

Wymienione powyżej etapy procesu decyzyjnego uzależnione są od wyników operacji pozostałych etapów. Na podstawie tych zależności wyodrębniono ścieżkę wykonania algorytmu, którą przedstawiono na rysunku 4.2.



Rysunek 4.2: Struktura opracowanego algorytmu wspomagania decyzji

Źródło: Opracowanie własne

Zebranie danych od decydenta wymaga rozważenia szeregu czynników charakteryzujących otrzymane wartości. Wartości definiujące kryteria sytuacji decyzyjnej mogą należeć do jednej z czterech podstawowych skal: nominalnej, porządkowej, przedziałowej lub ilorazowej. Decydent określa skalę danych źródłowych, skalę funkcji wydajności G i dokonywane przekształcenie. Określone przekształcenie dokonuje jednego z odwzorowań, które zostały poniżej wymienione, wraz z dopuszczalnymi wartościami determinantów funkcji kryterialnej G wyrażonej przez decydenta.

— Rodzaj odwzorowania:
  — $g : R \times G$,
  — $g : R \times G \in \langle 0, 1 \rangle$,
  — $g : fuzzy \times G$,
  — $g : fuzzy \times G \in \langle 0, 1 \rangle$,
  — $g : R \times G : fuzzy$,
  — $g : R \times G : fuzzy \in \langle 0, 1 \rangle$;
— pożądany kierunek wartości $(\uparrow, \downarrow)$;
— wartość dolnego krańca preferencji: brak, a^- (ostre), $\tilde{a}^-$ (rozmyte);
— wartość górnego krańca preferencji: brak, a^+ (ostre), $\tilde{a}^+$ (rozmyte);
— zakres dziedziny wartości atrybutów (zakres akceptowalności): $\langle a^*, a^{**} \rangle$.

Parametry stanowią o kształcie funkcji wydajności $g(\cdot)$. W celu zapewnienia mobilności algorytmu, proponuje się określenie również zestawu meta-danych dla każdego kryterium. Meta-dane zawierają słowniki translacji nazw parametru dla poszukiwań w środowisku rozproszonym i dla konwersji, wykorzystywane przy rozwiązywaniu problemu decyzyjnego.

Algorytm rozwiązywania ZWPW przedstawiony na rysunku 4.2 dokonuje następujących przekształceń w kolejnych krokach:

1. konstrukcja zbioru C,
2. konstrukcja zbioru Φ,
3. konstrukcja zbioru A,
4. dobór agregującej części przekształcenia F,
5. dobór eksploatującej części przekształcenia F,
6. wyznaczenie wartości wydajności G (macierz decyzyjna),
7. wykonanie obliczeń części agregacji przekształcenia $\max F$,

8. wykonanie obliczeń części eksploatacji przekształcenia $\max F$,
9. wyznaczenie a_p.

Wynikiem pierwszego etapu jest struktura problemu decyzyjnego przedstawiona we wzorze (4.1), gdzie określony jest każdy element zbioru C zgodnie ze wzorem (4.2). W drugim etapie wartości te są przedstawiane decydentowi w celu określenia przez niego relacji międzykryterialnych i oczekiwań związanych z przebiegiem procesu decyzyjnego. Na podstawie otrzymanych danych konstruowany jest zbiór Φ. Etap trzeci jest etapem pozyskania opisów wariantów decyzyjnych, na podstawie których wyznaczany jest zbiór rozważanych wariantów decyzyjnych A. Czwarty etap algorytmu dokonuje zestawienia charakterystyk opisu problemu z bazą wiedzy doboru metody i na tej podstawie wybierana jest procedura wielokryterialnej agregacji z zaimplementowanej kolekcji (definiowana jest część agregująca przekształcenia F). Następny etap przebiega analogicznie do etapu czwartego i polega na dokonaniu wyboru procedury eksploatacji systemu preferencji globalnej uzyskanej na etapie agregacji. Etap szósty zawiera obliczenia wartości wydajności $g_i(a_j)$ dla każdego kryterium i każdego rozpatrywanego wariantu decyzyjnego, na tej podstawie tworzona jest tabela wydajności G. Etap siódmy polega na zastosowaniu agregacji przekształcenia F do uzyskanej w poprzednim etapie tabeli wydajności G i na konstrukcji systemu relacyjnego preferencji globalnych, który zostanie poddany przekształceniu eksploatacji w celu wyznaczenia porządku końcowego. Ostatni (ósmy) etap, to wybór wariantu najlepszego.

Dobór części agregującej oraz eksploatującej przekształcenia F dokonywany jest na podstawie określonych w poprzednich podrozdziałach czynników. Czynniki te pozwalają na identyfikację podzbioru możliwych do zastosowania przekształceń ze zbioru Ψ'. Uwzględnienie czynników środowiskowych (kontekstu sytuacji decyzyjnej) opisanych przez zbiór K pozwala na dobór jednego z możliwych do zastosowania przekształceń tak, aby wynik operacji wchodzących w skład dobranego przekształcenia był najlepiej dopasowany do dostępnego opisu sytuacji decyzyjnej.

Dobór przekształcenia na podstawie kontekstu sytuacji decyzyjnego jest czynnością niemożliwą do zapisu w formie tabelarycznej ze względu na wieloetapowość analizy zbioru K. Dlatego też do tego celu zastosowano regułową bazę wiedzy. Reguły zawarte w bazie wiedzy pozwalają na dobranie przekształcenia najlepiej dopasowanego do analizowanej sytuacji decyzyjnej, pod względem przesłanek uwzględnionych przez reguły zawarte w bazie wiedzy.

4.4.1. Kolekcja metod wielokryterialnych

W celu wyodrębnienia wpływu możliwych do opisania czynników kontekstu sytuacji decyzyjnej na dopasowanie przekształcenia wielokryterialnego, konstrukcję reguł oparto o wiedzę ekspercką zawartą w literaturze naukowej. Przeanalizowano opisane w literaturze przedmiotu zastosowania metod wielokryterialnych oraz motywacje przemawiające za obraniem konkretnej metody wielokryterialnej do rozwiązania badanej sytuacji decyzyjnej.

Zastosowana literatura potraktowana została jako **referencyjne źródło wiedzy ze względu na wysoką wartość ekspercką, która wynika z natury literaty naukowej**. Wybrane artykuły przedstawiały zastosowanie wybranych metod wielokryterialnych w różnych sytuacjach. Przeprowadzono analizę treści artykułów celem identyfikacji przesłanek, którymi kierowali się autorzy przy doborze metody wielokryterialnej, a także uzasadnienia słuszności dokonanego wyboru.

Wybór metody PROMETHEE I i II dokonywany był zgodnie z opisami autorów w następujących sytuacjach: alokacja obsługi systemu informatycznego na podstawie potrzeb informacyjnych różnych działów organizacji [39]; podział dostawców na kategorie: do odrzucenia, obiecujący, dobrzy [8]; referencyjny przykład wyboru projektu organizacyjnego [13]; problem wyboru lokalizacji oparty o rzeczywiste opisy parametrów [14]; przekazywanie wybór systemów informacyjnych do przekazania w outsourcing [142]; analiza możliwych scenariuszy wykorzystania energii alternatywnej [48]; wybór planu zagospodarowania terenu pod kątem przewidywanego wpływu na okolicę [73]; wybór studiów MBA do zapisania [113].

Dla metody TOPSIS wybrano artykuły o wymienionych zastosowaniach: wybór materiału do produkcji o odpowiednich parametrach fizycznych [122]; wybór pracownika do zatrudnienia [81]; wybór strategii współdzielenia się wiedzą [24].

Rozmyty wariant metody PROMETHEE zastosowano do: analizy możliwych scenariuszy wykorzystania energii alternatywnej w warunkach niepewności [48]; lokalizacji dworca autobusowego na podstawie jakościowych parametrów opisu [91]; wyboru techniki wytopu metali pod kątem wpływu na środowisko, na podstawie danych o różnej jakości [45].

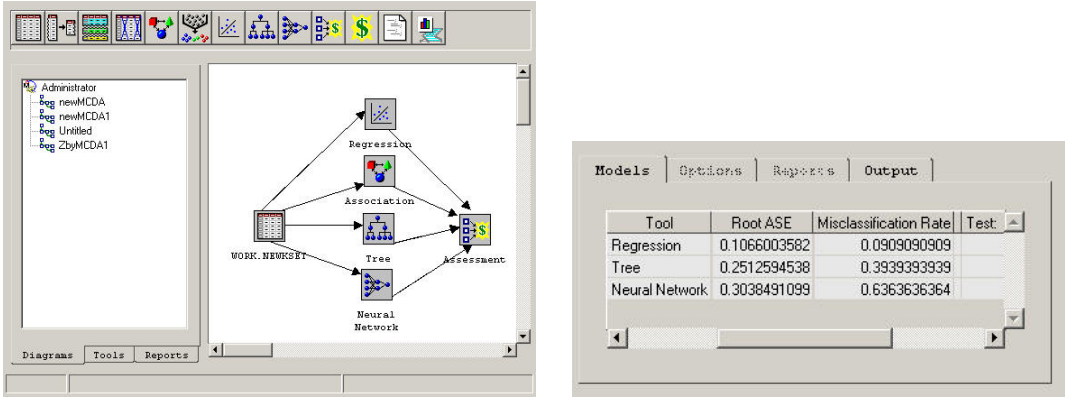
Analizę zastosowań rozmytego wariantu metody TOPSIS dokonano na podstawie siedmiu przykładów: wybór lokalizacji dla przedsiębiorstwa uwzględniający „miękkie" kryteria [38]; wybór urządzenia (robota) do przeładunku towarów z lingwistycznymi wagami i ocenami [25]; analiza bezpieczeństwa linii lotniczych [31]; wybór maszyny drukującej dla przedsiębiorstwa tekstylnego z uwzględnieniem celów strategii firmy [50]; wybór miasta do lokalizacji centrum logistycznego na podstawie niejednoznacznie i niepewnych danych [6]; ustalenie priorytetów konserwacji mostów w zależności od ich stanu technicznego [144]; lokalizacja fabryki stosującej wysokie technologie na podstawie danych subiektywnych i obiektywnych [26].

Metoda Kuo zastosowana została przez autora w następujących aplikacjach: hierarchicznie zdefiniowany problem lokalizacji międzynarodowego punktu logistycznego, oparty o nieprecyzyjne dane i oceny indywidualne [76]; wybór dostawcy usług (ocena jakości) na podstawie ocen subiektywnych pozyskanych drogą ankietową [75].

Do ekspertyzy na temat zastosowań metody AHP wybrano: wybór systemu klasy ERP [145]; wybór śmigłowca bojowego dla wojska [22]; wybór domu do zamieszkania na podstawie wybranych kryteriów [129]; ewaluacja pracowników na podstawie subiektywnych ocen [129]; wybór podejścia do kandydatury państwa do organizacji międzynarodowej [130].

Metodę ELECTRE III zastosowano do: sporządzenia rankingu przedsiębiorstw na podstawie określonych kryteriów ekonomicznych i finansowych [10]; wyboru planu zagospodarowania terenu pod kątem przewidywanego wpływu na okolicę [73]; wyboru technologii utylizacji odpadów [61]; sporządzenia rankingu kondycji ekonomicznej wybranych przedsiębiorstw [10].

Selekcji publikacji dokonano na podstawie szerszego zakresu literatury. Do źródeł wiedzy eksperckiej dokumentujących przedstawione powyżej zastosowania metod wielokryterialnych zakwalifikowano artykuły, których autorzy przedstawili uzasadnienie dokonanego wyboru metody w stopniu satysfakcjonującym autora rozprawy.



(a) Ekran definicji modelu (b) Ekran porównania jakości klasyfikacji

Rysunek 4.3: Ekrany programu SAS Enterprise Miner

Źródło: Opracowanie własne

4.4.2. Wybór podejścia data mining

Kolejnym etapem konstrukcji bazy wiedzy jest odkrycie reguł stanowiących o zastosowaniu wybranej metody do określonych klas sytuacji decyzyjnych. Wybór technologii odkrywania wiedzy wynika z charakteru informacji uzyskanych na etapie analizy artykułów. Ze względu na nominalnych charakter parametrów opisujących przesłanki wyboru metody do rozwiązania zadanego problemu, najwłaściwszymi metodami analizy są metody odkrywania wiedzy (data mining).

Badanie wpływu doboru metody na rezultat wspomagania decyzji wykonano przy pomocy autorskiego programu rozwiązującego sytuacje decyzyjne przy użyciu kolekcji metod wielokryterialnych. Program dokonuje doboru metod z kolekcji Ψ' na podstawie charakteru informacji wejściowej, a następnie rozwiązania sytuacji decyzyjnej przy pomocy wszystkich metod spełniających kryterium wejściowe. Wyniki zapisywane są w postaci pliku tabelarycznego (format CSV), który stanowi źródło dalszej analizy.

Wybrano aplikację SAS Enterprise Miner 5.1 [132] do dokonania analizy danych o zastosowaniach metod wielokryterialnych prezentowanych przez autorów publikacji wchodzących w skład bazy wiedzy proponowanego algorytmu. System SAS został wybrany ze względu na oferowane szerokie możliwości analizy danych i dostępny język skryptowy, pozwalający na automatyzację czynności związanych z odkrywaniem i testowaniem zależności dla różnych konfiguracji danych wejściowych. Rysunek 4.3a przedstawia przykładowy diagram dokonujący modelowania przy użyciu różnych technik. Należy przy tym wyróżnić blok **Assessment**, który pozwala na porównanie wyników dopasowania modeli zbudowanych na bazie zależności odkrytych przy pomocy różnych technik. Rysunek 4.3b przedstawia przykładowe porównanie błędów dopasowań przy pomocy modelów zbudowanych następującymi technikami: sieć neuronowa (perceptron), regresja liniowa (uogólniony model regresji liniowej GLM) i drzewo decyzyjne (redukcja Gini).

Możliwości programu SAS Enterprise Miner wykraczają znacznie poza zakres wymagany do analizy danych na potrzeby niniejszej pracy. Zastosowanie tego programu do analizy danych na potrzeby opisanych badań podyktowane zostało znacznym udziałem rynkowym tego oprogramowania. Stąd, określenie wytycznych algorytmu na bazie powszechnie stosowanego oprogramowania jest czynnikiem ułatwiającym implementację

praktyczną prezentowanego algorytmu.

Zgodnie z podziałem na podkategorie metod, omówionym szerzej w rozdziale 4.6 i przedstawionym we wzorach (4.38)—(4.40), analizę uzyskanej wiedzy z literatury naukowej przeprowadzono dla dwóch klas wyjść. Pierwszą klasą była identyfikacja wpływu czynników środowiskowych na wybór konkretnej metody wielokryterialnej. Drugą klasą wyjść jest identyfikacja wpływu czynników środowiskowych na wybór podejścia (amerykańskie, europejskie) i na zastosowanie modelowania rozmytego. Do odkrycia reguł zastosowano techniki właściwe dla charakteru danych wejściowych wchodzących w skład zbioru K. Ze względu na występowanie wartości nominalnych, wybrano do zastosowania następujące metody analizy logicznej: analiza asocjacji przy pomocy zbiorów częstych oraz konstrukcja drzewa decyzyjnego.

Indukcji drzewa decyzyjnego dokonano przy pomocy metody testu χ^2, metody minimalizacji entropii i metody redukcji Gini. Program SAS Enterprise Miner posiada zaimplementowany algorytm indukcji drzew decyzyjnych przy pomocy trzech wymienionych metod i umożliwia konstrukcję drzew dla różnych parametrów określających poziom istotności, liczbę potomków każdego węzła oraz kryteria podziału [30].

Badanie zależności pomiędzy czynnikami środowiskowymi opisującymi kontekst sytuacji decyzyjnej, a doborem metody wielokryterialnej, przeprowadzono przy pomocy dwóch podejść prowadzących do wyodrębnienia zbiorów reguł decyzyjnych. Pierwsze podejście polegało na indukcji drzew decyzyjnych. Zbadano rezultaty otrzymane przy pomocy techniki indukcji drzew decyzyjnych metodą „top-bottom" i użyto trzech technik określania kryteriów podziału: testu χ^2, minimalizacji entropii i metody redukcji Gini.

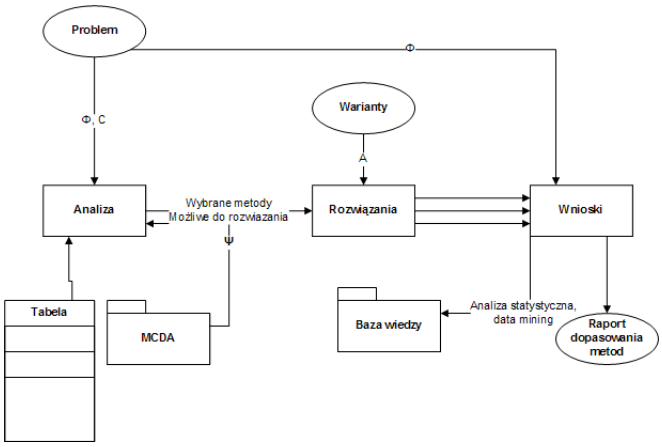
Indukcja drzew decyzyjnych przy pomocy testu statystycznego χ^2 polega na wykonywaniu testów statystycznych dla kolejnych podziałów. Dla założonego poziomu istotności szukany jest taki podział, aby odrzucenie hipotezy zerowej miało największe wsparcie [90].

Kolejną testowaną techniką jest „redukcja entropii", która oparta jest o teorię informacji Shannona. Do podziału drzewa wybierana jest taka konfiguracja, która wprowadza największy wzrost informacyjny do całości drzewa. Metoda ta zyskała szczególne zainteresowanie w dziedzinie uczenia maszynowego poświęconego rozpoznawaniu wzorców. Optymalizacja lokalnego wzrostu informacji i minimalizacja globalnej entropii stanowi bliską aproksymację rozkładu χ^2 [100].

Technika „indeksu Gini" oparta jest o indeks rozproszenia (indeks różnorodności) Gini. Indeks ten eksponuje balans pomiędzy liśćmi wychodzącymi z jednego węzła oraz ich jednorodność (czystość) [100].

Przeprowadzono proces indukcji drzewa decyzyjnego dla różnych ustawień związanych z dopuszczalną ilością rozgałęzień dla drzewa. Dokładne ustawienia wykorzystane przy odkrywaniu reguł przedstawiono w dalszej części rozprawy.

Oczekiwanym wynikiem analizy wiedzy eksperckiej jest określenie wpływu poszczególnych czynników otoczenia na dopasowanie metody wielokryterialnej do sytuacji decyzyjnej umiejscowionej w kontekście rozważanej rzeczywistości. Przebieg procesu konstrukcji bazy wiedzy przedstawiony został na rysunku 4.4.



Rysunek 4.4: Schemat konstrukcji bazy wiedzy

Źródło: Opracowanie własne

4.4.3. Wyznaczenie kryteriów problemu decyzyjnego

Problem decyzyjny określony na wartościach rozważanych wariantów decyzyjnych zdefiniowany jest jako zadanie maksymalizacji wyznaczonych funkcji wydajności zgodnie z obranym przekształceniem F, co przedstawia wzór (4.15).

$$\max F(g_1, g_2, \ldots, g_n) \tag{4.15}$$

Konstrukcja funkcji kryterium prowadzi do określenia wydajności rozważanego wariantu decyzyjnego w aspekcie danego atrybutu na podstawie kryterium przypisanego do tego atrybutu. Funkcja g uwzględnia preferencje dla wartości atrybutu i różne skale dostępnych danych źródłowych, stąd tablica decyzyjna zawiera wartości wydajności g, a nie bezpośrednie wartości atrybutów wariantów decyzyjnych. Postać ogólną funkcji g przedstawia wzór (4.16).

$$\begin{aligned} g_i(a_j) &= \sum_{\gamma=1}^{k} \alpha_\gamma a_{ji}^\gamma + \beta \\ g_i(a_j) &= \alpha a_{ji}^\gamma + \beta \\ g_i(a_j) &= log_\gamma \alpha a_{ji} + \beta \end{aligned} \tag{4.16}$$

gdzie $g_i(a_j)$ jest wartością wydajności kryterium g_i dla wariantu decyzyjnego a_j, a a_{ji} jest wartością atrybutu i wariantu a_i. Stąd przyjmuje się, że $g_i(a_j)$ jest równoważne zapisowi $g_i(a_{ji})$. Wybór kształtu funkcji dokonywany jest przez decydenta, spośród przedstawionego wyboru kolekcji kształtów, natomiast współczynniki dobierane są na podstawie określonych limitów wartości i kierunku preferencji.

Podstawowym założeniem algorytmu jest uwzględnienie wyłącznie akceptowalnych wariantów decyzyjnych, a więc takich, dla których wartości atrybutów zawierają się w dziedzinie określonej dla odpowiednich kryteriów. Do zbioru rozważanych wariantów decyzyjnych A dopuszczane są wyłącznie akcje spełniające zdefiniowane przez decydenta wymagania. Założono wzrost wartości wydajności przedstawiony we wzorze (4.17).

$$a_j \in A \Rightarrow \forall_{g \in G}\ a_{ji} \in D_{g_i} \tag{4.17}$$

Stąd, zastosowane ograniczenie miękkie $(a^-, \tilde{a}^-, a^+, \tilde{a}^+)$ jest w istocie ograniczeniem na wzrost wartości funkcji g, a nie ograniczeniem na dziedzinę wartości atrybutu.

Zastosowanie ograniczeń preferencji ma na celu umożliwienie określenia „a priori" kryteriów normalizacji na podstawie podanych przez decydenta wartości granicznych i preferencji odnośnie kierunku zmian wartości. Nieograniczona dziedzina wartości atrybutu wyklucza zastosowanie normalizacji, a przez to utrudnia zastosowanie metod opartych na obliczeniach funkcji użyteczności. Schemat funkcjonowania ograniczeń preferencji przedstawia wzór (4.18) dla kryteriów zyskowych i wzór (4.19) dla kryteriów kosztowych.

$$C \in C_b \Rightarrow g_i(a_j) = \begin{cases} 0 & \text{dla } a_{ji} \leqslant a_j^- \\ \frac{a_{ji}-a_j^-}{a_j^+-a_j^-} & \text{dla } a_j^- \leqslant a_{ji} \leqslant a_j^+ \\ 1 & \text{dla } a_{ji} \geqslant a_j^+ \end{cases} \tag{4.18}$$

$$C \in C_c \Rightarrow g_i(a_j) = \begin{cases} 1 & \text{dla } a_{ji} \leqslant a_j^- \\ \frac{a_{ji}-a_j^+}{a_j^--a_j^+} & \text{dla } a_j^- \leqslant a_{ji} \leqslant a_j^+ \\ 0 & \text{dla } a_{ji} \geqslant a_j^+ \end{cases} \tag{4.19}$$

W trakcie analizy wpływu ograniczenia preferencji na proces wspomagania decyzji zidentyfikowano brak odzwierciedlenia naturalnej dla człowieka tendencji do zmiękczania ograniczeń w przypadku „wybitnie" sprzyjających wartości parametrów. Rozwiązanie tej niedogodności osiągnięto poprzez wprowadzenie do modelu pojęcia „miękkiego ograniczenia preferencji", zgodnie ze wzorem (4.20) dla kryteriów zyskowych i wzorem (4.21) dla kryteriów kosztowych. Założony został dziesięcioprocentowy próg „wybitnej" preferencji, odwzorowujący wartości rosnące do $+\infty$ (kryterium zyskowe) lub malejące do $-\infty$ (kryterium kosztowe) na zakres $\langle 1; 1,1)$ w sposób asymptotyczny.

$$C \in C_b \Rightarrow g_i(a_j) = \begin{cases} 0 & \text{dla } a_{ji} \leqslant \tilde{a}_j^- \\ \frac{a_{ji}-\tilde{a}_j^-}{\tilde{a}_j^+-\tilde{a}_j^-} & \text{dla } \tilde{a}_j^- \leqslant a_{ji} \leqslant \tilde{a}_j^+ \\ 1,1 - \frac{1}{10+a_{ji}-\tilde{a}_j^+} & \text{dla } a_{ji} \geqslant \tilde{a}_j^+ \end{cases} \tag{4.20}$$

$$C \in C_c \Rightarrow g_i(a_j) = \begin{cases} 1,1 - \frac{1}{10+\tilde{a}_j^- - a_{ji}} & \text{dla } a_{ji} \leqslant \tilde{a}_j^- \\ \frac{a_{ji}-\tilde{a}_j^+}{\tilde{a}_j^- - \tilde{a}_j^+} & \text{dla } \tilde{a}_j^- \leqslant a_{ji} \leqslant \tilde{a}_j^+ \\ 0 & \text{dla } a_{ji} \geqslant \tilde{a}_j^+ \end{cases} \tag{4.21}$$

gdzie a_{ji} jest wartością atrybutu j wariantu decyzyjnego a_i, a $\tilde{a}_j^-$ i $\tilde{a}_j^+$ są odpowiednio dolnym i górnym ograniczeniem preferencji dla kryterium C_j, spełniającymi warunek $\tilde{a}_j^- < \tilde{a}_j^+$. Zastosowanie modelu asymptotycznego występuje wyłącznie dla danych poddanych ograniczeniu miękkiemu i pozwala na zastosowanie normalizacji przy nieznanym zbiorze A – z założeniem 10% przekroczenia progu normalizacji dla akcji z „wybitną" wartością atrybutu.

Zastosowanie ograniczonego zakresu preferencji pozwala na zagwarantowanie ograniczonej przestrzeni porównań (dla metod opartych o relację przewyższania) i ograniczoną przestrzeń wyznaczania rozwiązania idealnego (dla metod opartych o agregację kryteriów do jednego kryterium dystansowego). Skutkiem specyfikacji ograniczenia dziedziny preferencji dla metod opartych o wzajemne porównania (szkoła europejska) będzie ograniczenie domeny porównań do wartości równej a_j^+ dla kryterium zyskowego i a_j^- dla

kryterium kosztowego. Stąd wzajemne porównania wariantów, których wartości atrybutów wykraczają poza progi preferencji, przedstawione zostaną jak we wzorach (4.22) – (4.23) dla progów ostrych i we wzorach (4.24) – (4.25) dla progów rozmytych.

$$a_{kj} > a_j^+ \quad \Rightarrow \quad p(a_{ji}, a_{kj}) \equiv p(a_{ji}, a_j^+), \qquad \text{dla } c_j \in C_b \tag{4.22}$$
$$a_{kj} < a_j^- \quad \Rightarrow \quad p(a_{ji}, a_{kj}) \equiv p(a_{ji}, a_j^-), \qquad \text{dla } c_j \in C_c \tag{4.23}$$

gdzie $p(a_i, a_k)$ jest funkcją preferencji wynikającą z definicji obranej metody wielokryterialnej opartej o relację przewyższania.

Analogicznie wzory (4.24) i (4.25) przedstawiają wynik uwzględnienia miękkiego ograniczenia preferencji w metodzie opartej o europejską szkołę wielokryterialną.

$$a_{kj} > \tilde{a}_j^+ \quad \Rightarrow \quad p(a_{ji}, a_{kj}) \equiv p(a_{ji}, \tilde{a}_j^+ \cdot g(a_{kj})), \qquad \text{dla } c_j \in C_b \tag{4.24}$$
$$a_{kj} < \tilde{a}_j^- \quad \Rightarrow \quad p(a_{ji}, a_{kj}) \equiv p(a_{ji}, \tilde{a}_j^- \cdot g(a_{kj})), \qquad \text{dla } c_j \in C_c \tag{4.25}$$

gdzie $p(a_i, ai)$ jest funkcją preferencji wynikającą z definicji obranej metody wielokryterialnej opartej o relację przewyższania, a $g(a_{kj})$ jest współczynnikiem preferencji obliczonym zgodnie ze wzorem (4.20) dla kryteriów zyskowych i wzorem (4.21) dla kryteriów kosztowych.

W przypadku metod opartych o wyznaczanie zagregowanej odległości od punktu idealnego, ograniczenia preferencji uwzględniane są przy wyznaczaniu wartości kryteriów dla punktu pozytywnie idealnego (w dalszej części pracy określanego krócej jako punkt idealny) i punktu negatywnie idealnego poprzez ograniczenie domeny normalizacji. Stąd, obliczanie wartości rozwiązania pozytywnie i negatywnie idealnego dla wariantów, których wartości atrybutów wykraczają poza progi preferencji, przedstawione zostało dla progów ostrych we wzorach: (4.26) – (4.27) dla wartości rozwiązania pozytywnie idealnego i wzorach (4.28) – (4.29) dla wartości rozwiązania negatywnie idealnego. Wartości dla progów rozmytych przedstawiają wzory (4.30) – (4.33).

$$a_{kj} > a_j^+ \quad \Rightarrow \quad A^* \left\{ \ldots, a_j^+, \ldots \right\}, \qquad \text{dla } j \in Q_b \tag{4.26}$$
$$a_{kj} > a_j^+ \quad \Rightarrow \quad A^* \left\{ \ldots, 0, \ldots \right\}, \qquad \text{dla } j \in Q_c \tag{4.27}$$
$$a_{kj} < a_j^- \quad \Rightarrow \quad A^- \left\{ \ldots, 0, \ldots \right\}, \qquad \text{dla } j \in Q_b \tag{4.28}$$
$$a_{kj} < a_j^- \quad \Rightarrow \quad A^- \left\{ \ldots, a_j^-, \ldots \right\}, \qquad \text{dla } j \in Q_c \tag{4.29}$$

gdzie punkty A^* i A^- są punktami odpowiednio pozytywnie i negatywnie idealnymi, zgodnie z definicją obranej metody wielokryterialnej opartej o obliczanie dystansu do rozwiązania idealnego.

Analogicznie dla progów rozmytych wartości rozwiązania pozytywnie idealnego przedstawiają wzory (4.30) – (4.31), a dla rozwiązania negatywnie idealnego wzory (4.32) – (4.33).

$$a_{kj} > a_j^+ \quad \Rightarrow \quad A^* \left\{ \ldots, \max_j (a_j^+ \cdot g(a_{kj})), \ldots \right\}, \qquad \text{dla } j \in Q_b \tag{4.30}$$

$$a_{kj} > a_j^+ \quad \Rightarrow \quad A^* \{ \ldots, 0, \ldots \}, \qquad \text{dla } j \in Q_c \tag{4.31}$$

$$a_{kj} < a_j^- \quad \Rightarrow \quad A^- \{ \ldots, 0, \ldots \}, \qquad \text{dla } j \in Q_b \tag{4.32}$$

$$a_{kj} < a_j^- \quad \Rightarrow \quad A^- \left\{ \ldots, \min_j (a_j^- \cdot g(a_{kj})), \ldots \right\}, \qquad \text{dla } j \in Q_c \tag{4.33}$$

gdzie punkty A^* i A^- są punktami odpowiednio pozytywnie i negatywnie idealnymi (zgodnie z definicją obranej metody wielokryterialnej opartej o obliczanie dystansu do rozwiązania idealnego), a $g(a_{kj})$ jest współczynnikiem preferencji obliczonym zgodnie ze wzorem (4.20) dla kryteriów zyskowych i wzorem (4.21) dla kryteriów kosztowych.

Traktowanie opisów wariantów decyzyjnych pozyskiwanych w rozproszonej przestrzeni poszukiwań przebiega ściśle według ustalonego *a priori* schematu. Obliczenia przy pomocy prezentowanego algorytmu przeprowadzane są dla m wariantów decyzyjnych $a_1, a_2, \ldots, a_m \in \tilde{A}$, pozyskanych w rozproszonej przestrzeni poszukiwań $\tilde{A}$. Pozyskanie opisów pozwalających na określenie wartości atrybutów określonych dla wszystkich kryteriów ze zbioru C skutkuje konstrukcją kompletnego zbioru wariantów decyzyjnych stanowiących wejście procesu decyzyjnego.

Pozyskany zbiór A stanowi źródło konstrukcji macierzy decyzyjnej w postaci przedstawionej we wzorze (4.34).

$$\begin{array}{c|cccc} A, G & g_1 & g_2 & \ldots & g_n \\ \hline a_1 & g_1(a_1) & g_2(a_1) & \ldots & g_n(a_1) \\ a_2 & g_1(a_2) & g_2(a_2) & \ldots & g_n(a_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_m & g_1(a_m) & g_2(a_m) & \ldots & g_n(a_m) \end{array} \tag{4.34}$$

Przedstawiona w tabeli (4.34) macierz wydajności G stanowi argument przekształcenia F, wskazującego najlepszy wariant decyzyjny. W wyniku pozyskania zbiorów C i A obliczana jest zawartość zbioru G. Następnie pozyskane zostają od decydenta opisy stanowiące wartości zbioru Φ, co umożliwia zdefiniowanie ZWPW w postaci zgodnej ze wzorem (4.11).

Zadaniem metody wielokryterialnej jest wyznaczenie, na podstawie przedstawionej powyżej macierzy, relacji umożliwiającej ustalenie sytuacji preferencyjnej pomiędzy wariantami decyzyjnymi. Przy czym Roy [126, s. 93] definiuje **ograniczoną porównywalność** następująco: **„Cztery wykluczające się wzajemnie sytuacje podstawowe: równoważność, silna preferencja, słaba preferencja i nieporównywalność, wystarczają do określenia realnej reprezentacji preferencji uczestnika Z. Bez względu na warianty potencjalne, punkt widzenia przyjęty do ich porównania i dostępną informację, uczestnik Z lub analityk oceniający w jego imieniu może stworzyć lub opisać zadowalający model preferencji Z. Model ten każdej parze wariantów przypisuje jedną, dwie lub trzy spośród sytuacji podstawowych."**

Powyższy aksjomat rozszerza tradycyjne podejście do wspomagania decyzji o relacje słabej preferencji i nieporównywalności. Występowanie tych relacji jest charakterystyczne dla niektórych sytuacji decyzyjnych. Wynika stąd potrzeba oparcia zastosowanego podejścia decyzyjnego o klasę sytuacji decyzyjnych, do której należy decyzja będąca przedmiotem bieżącego wspomagania.

Przedstawiony w niniejszym podrozdziale schemat postępowania przeprowadzony został dla sytuacji decyzyjnych opisanych w literaturze i istotnych z punktu widzenia zakresu objętego rozprawą. Podejście to może być rozszerzone o inne metody wielokryterialne i obszary rzeczywistości w celu objęcia sytuacji decyzyjnych nie rozwiązywanych przez proponowany algorytm. Przy włączaniu kolejnych obszarów należy szczególną uwagę poświęcić kwestii doboru czynników zawartych w zbiorze K. Należy przy tym zauważyć, że mogą się zdarzyć kategorie sytuacji decyzyjnych, które są słabo reprezentowane w literaturze naukowej lub ogólnodostępnych zbiorach danych. W takiej sytuacji należy rozważyć samodzielną konstrukcję bazy wiedzy z pomocą ekspertów dziedzinowych.

4.5. Dokonanie oceny typu problemu bazując na opisie pozyskanym od decydenta

Dokonanie wyboru metody wielokryterialnej do zastosowania do rozwiązania sytuacji decyzyjnej determinowane jest przez szereg parametrów. Praktyka pokazuje, że wybór pomiędzy podejściem funkcji użyteczności (szkoła amerykańska) a podejściem opartym na relacji przewyższania (szkoła europejska) jest jedynie wyznaczeniem kierunku dla dalszego wyboru konkretnej metody [32]. Przedstawione w rozdziale 2.2 studium podejść wielokryterialnych oparte jest na funkcjonującym w literaturze podziale na metody szkoły amerykańskiej i europejskiej. Wyróżnienie to dzieli metody w zależności od podejścia do sposobu wyróżnienia stopnia preferencji decydenta dla poszczególnych elementów opisu wariantów decyzyjnych, jak i globalnie dla samych wariantów.

W związku z powyższym, przyjęto rozróżnienie na podejście amerykańskie i europejskie jako determinant wyższego rzędu (grupujący metody w rozpatrywanej kolekcji metod), określający ujęcie problemu przez decydenta.

Guitouni w pracach [53] i [52] opracował dwa zestawy danych, na podstawie których możliwe jest dokonanie wyboru metody wielokryterialnej odpowiedniej do rozwiązania problemu decyzyjnego. Podejścia te w szczególności służą do badania spełnienia warunków koniecznych dla możliwego zastosowania metody. Nie są to podejścia zorientowane na aspekt trafności dopasowania metody do sytuacji decyzyjnej postrzeganej jako relacja przyczynowo-skutkowa świata rzeczywistego pomiędzy zestawem danych opisujących możliwe akcje, a konsekwencją implementacji jednej z rozważanych akcji.

Ocena sytuacji decyzyjnej dokonywana jest pod kątem spełnienia opracowanych reguł dopasowujących problem decyzyjny do jednej z metod wielokryterialnych. Celem oceny jest wyznaczenie grupy determinant $\{D_1, \ldots, D_{12}, M_1, \ldots, M_{10}\}$, zgodnie z [53], na podstawie zawartości zbiorów C i Φ.

4.5.1. Charakterystyki zbioru C

Oceny wariantów decyzyjnych mogą zostać dokonane na jednej z poniżej wymienionych skal [92].

Skala porządkowa – wartość g_i określona jest na s_j punktowej skali tak, że $X_j := \{g_1^j \prec_j \ldots \prec_j g_{s_j}^j\}$; skala ta zwykle jest stosowana dla danych lingwistycznych.

Rozmyta skala porządkowa – wartość funkcji przynależności $\mu_j(u) \in [0,1], \forall u \in X_j$, określa stopień zgodności danej oceny z pozycją na skali preferencji. Zbiór roz-

myty jest zbiorem normalnym ($sup_u \mu_j(u) = 1$) i wypukłym ($\forall u, v, w \in X_j, v \in [u, w], \mu_j(v) \leqslant min\{\mu_j(u), \mu_j(w)\}$).

Skala ilościowa – określa wartość rzeczywistą g_j wydajności alternatywy; stąd możliwa jest konstrukcja modelu preferencji bazującego na kryteriach rzeczywistych *(true criteria)*.

Rozmyta skala przedziałowa – jest stosowana w przypadku nieprecyzyjnych danych lub preferencji. Funkcja przynależności ma postać wypukłą, a każde λ-odcięcie jest przedziałem postaci $I_j^\lambda = \{u : \mu_j(u) \geqslant \lambda\}$.
Przykładem kształtu funkcji przynależności stosowanej do modelowania tej skali jest funkcja trapezoidalna w postaci przedstawionej we wzorze (4.35).

$$\mu_j(u) = \begin{cases} 1 - \frac{g_j^- - u}{\sigma_j^-} & if\ g_j^- - \sigma_j^- \leqslant u \leqslant g_j^- \\ 1 & if\ g_j^- \leqslant u \leqslant g_j^+ \\ 1 - \frac{u - g_j^+}{\sigma_j^+} & if\ g_j^+ \leqslant u \leqslant g_j^+ + \sigma_j^+ \end{cases} \tag{4.35}$$

gdzie $(g_j^-, g_j^+, \sigma_j^-, \sigma_j^+)$ są parametrami opisującymi zbiór rozmyty opisany funkcją trapezoidalną ze wzoru (4.35). Wartość lingwistyczna opisana tym wzorem interpretowana jest jako pewność przynależności rozważanego wariantu decyzyjnego do przedziału wyznaczonego rdzeniem zbioru $(g_j^- \leqslant u \leqslant g_j^+)$ i określonego przez wartość funkcji przynależności μ stopniem prawdopodobieństwa przynależności alternatywy do przedziałów $(g_j^- - \sigma_j^- \leqslant u \leqslant g_j^-)$ i $(g_j^+ \leqslant u \leqslant g_j^+ + \sigma_j^+)$.

Wyrażona przez decydenta specyfikacja problemu decyzyjnego w postaci funkcji kryterialnych g_i zawiera informację dotyczącą skali, na jakiej zostaną umieszczone wartości wydajności $g_i(A)$. Zgodnie z podziałem zaproponowanym w [53], w niniejszej rozprawie uwzględniono cztery skale, na których opisane są wydajności atrybutów. Przyjęto, że dane problemu decyzyjnego mogą zostać opisane na więcej niż jednej skali – 12 możliwych kombinacji skal przedstawiono w tabeli 4.4.

Tabela 4.4: Możliwe kombinacje skal użytych do opisu problemu decyzyjnego

Kombinacja	Skala porządkowa	Skala przedziałowa	Skala ilorazowa	Rozkłady przynależności
D_1	✓			
D_2		✓		
D_3			✓	
D_4	✓	✓		
D_5	✓		✓	
D_6		✓	✓	
D_7	✓	✓	✓	
D_8				✓
D_9	✓			✓
D_{10}		✓		✓
D_{11}			✓	✓
D_{12}	✓	✓	✓	✓

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [53].

Wartości tabeli 4.4 wyrażane są przez decydenta w momencie określania funkcji wydajności: *explicite* – poprzez określenie rodzaju skali opisującej dane, lub *implicite* – poprzez użyte parametry specyfikujące przekształcenie g. Na podstawie skal, na których opisane są wszystkie funkcje ze zbioru G, sytuacja decyzyjna jest przyporządkowywana do jednej z wymienionych kategorii.

Wynikiem analizy jest przypisanie problemu decyzyjnego do jednej z kategorii wymienionych w tabeli 4.4, w celu analizy zgodnie z wytycznymi z tabeli 4.7. Szczegółowy opis techniki wyboru metody wielokryterialnej odpowiedniej do rozwiązania problemu decyzyjnego zawarty został w podrozdziale 4.6.

4.5.2. Charakterystyki zbioru Φ

Zgodnie ze wzorem (4.9), elementy zbioru Φ definiującego zakres metadanych problemu decyzyjnego wynikają z wyrażonego przez decydenta charakteru relacji międzykryterialnych i z dziedziny rzeczywistości opisywanej przez sytuację decyzyjną. W pracy [53] wyróżniono dziesięć kryteriów oceny sytuacji decyzyjnej, opisujących charakter zależności międzykryterialnej i dostępne informacje charakteryzujące te zależności. W tabeli 4.5 zestawiono te czynniki wraz z wartościami wybranych parametrów klasyfikujących sytuację decyzyjną do odpowiednich klas.

Tabela 4.5: Specyfikacja relacji międzykryterialnych

Kombinacja	Opis	$g_i(\cdot)$	p_i	q_i	v_i	u_i	W_i
M_1	kryteria rzeczywiste		0	0	$\varnothing$		
M_2	próg nierozróżnialności	$g_i(\cdot)$		q_i	$\varnothing$	$\varnothing$	
M_3	próg preferencji	$g_i(\cdot)$	p_i		$\varnothing$	$\varnothing$	
M_4	próg weta	$g_i(\cdot)$			v_i	$\varnothing$	
M_5	funkcja użyteczności na skali przedziałowej	$\varnothing$	$\varnothing$	$\varnothing$	$\varnothing$	u_i	
M_6	funkcja użyteczności na skali stosunkowej	$\varnothing$	$\varnothing$	$\varnothing$	$\varnothing$	u_i	
M_7	porównania parami pozyskane od decydenta (metody AHP, MACBETH)	$\varnothing$					$\varnothing$
M_8	brak dostępnej informacji o wagach względnych kryteriów						$\varnothing$
M_9	dostępna jedynie binarna informacja o wzajemnej ważności par kryteriów						$\{w_{i1}, \ldots, w_{in}\}$ $w_{ij} = \begin{cases} 1 : \succ \\ 0 : \sim \end{cases}$
M_{10}	określony wektor ważności względnych kryteriów						$\{w\}$

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [53].

4.5.3. Charakterystyki zbioru K

Kolejnym istotnym determinantem problemu decyzyjnego jest charakterystyka obszaru rzeczywistości, którego dotyczy sytuacja decyzyjna. Decydent dokonuje wyboru

tematyki ze słownika pojęć, stanowiącego dziedzinę $D(K)$ zbioru K opisującego dziedzinę problemu decyzyjnego. W skład zbioru K wchodzi dziewięć parametrów stanowiących o kontekście sytuacji decyzyjnych. Interpretacja parametrów i dopuszczalne wartości przedstawia tabela 4.6.

Tabela 4.6: Elementy zbioru meta-danych K sytuacji decyzyjnej

Element	Opis	Dziedzina wartości
K_1	Rodzaj wybieranego obiektu	$\{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$
K_2	Dyscyplina decyzji	$\{0,1,2,3\}$
K_3	Czy kryteria są konfliktowe?	$\{0,1\}$
K_4	Czy kryteria dokonują kompletnego opisu przedmiotu decyzji	$\{0,1\}$
K_5	Ilość atrybutów	$\{0,1,2,3\}$
K_6	Ilość wariantów decyzyjnych	$\{0,1,2,3\}$
K_7	Stopień poznania sytuacji decyzyjnej przez decydenta	$\{1,2,3,4,5\}$
K_8	Zasięg decyzji	$\{0,1,2,3\}$
K_9	Cel decyzji	$\{0,1\}$

Źródło: Opracowanie własne.

Kryterium K_4 określa zupełność wymiarów widma konsekwencji w rozumieniu Roya [126], czyli samoocenę decydenta określającą fakt, czy nie zostały pominięte pewne aspekty wariantów decyzyjnych. Zupełność modelowania procesu decyzyjnego jest możliwa do oszacowania w przypadku decyzji organizacyjnych (decydent ma świadomość oparcia procesu decyzyjnego o wąski zakres przesłanek wpływających na całość ewentualnej implementacji decyzji), więc informacja ta przekłada się zarazem na oczekiwania odnośnie rekomendacji a także odnośnie stopnia uwzględnienia otrzymanej odpowiedzi w podjętych działaniach.

Wartości parametrów przedstawionych w tabeli 4.6 określane są na podstawie analizy sytuacji decyzyjnej. Interpretacja dopuszczalnych wartości elementów zbioru K przedstawia się następująco:

— $K_1 \in$ {0 – Wybór przedmiotu (urządzenia), 1 – Wybór techniki produkcji, 2 – Wybór oprogramowania COTS, 3 – Ocena kondycji ekonomicznej, 4 – Lokalizacja, 5 – Wybór człowieka, 6 – Analiza usługi, 7 – Planowanie środowiskowe, 8 – Wybór scenariusza, 9 – Zarządzanie};

— $K_2 \in$ {0 – Techniczna, 1 – Ekonomiczna, 2 – Socjologiczna, 3 – Organizacyjna};

— $K_3, K_4 \in$ {0 – Tak, 1 – Nie};

— $K_5, K_6 \in$ {0 – Mała $(0,10\rangle$, 1 – Średnia $(10,20\rangle$, 2 – Duża $(20,50\rangle$, 3 – Bardzo duża $(50,\infty)$};

— $K_7 \in$ {1 – Wiedza ogólnikowa, 2 – Niski stopień poznania, 3 – Średni stopień poznania, 4 – Wysoki stopień poznania, 5 – Pełne poznanie};

— $K_8 \in \{0$ – Strategiczny, 1 – Taktyczny, 2 – Operacyjny, 3 – Indywidualny$\}$;

— $K_9 \in \{0$ – Implementacja, 1 – Benchmark$\}$.

Analizę wykonano na podstawie zidentyfikowanych w literaturze czynników stanowiących o wyborze danej metody do rozwiązania problemu decyzyjnego. Wykorzystano do tego celu literaturę naukową jako wiarygodne źródło wiedzy eksperckiej. W projektach praktycznych dopuszczalne jest (a często nawet wskazane) wykorzystanie danych historycznych z obranej dziedziny lub danych wewnętrznych organizacji, na potrzeby której projektowany jest system wspomagania decyzji. Elementy zbioru K zidentyfikowano na podstawie przedstawionych w artykułach naukowych opisów sytuacji decyzyjnych. Przeanalizowano zarówno motywację dla wyboru metody wielokryterialnej, werbalny opis kontekstu sytuacji decyzyjnej oraz cele stawiane implementacji wybranego wariantu.

Zidentyfikowane powyżej parametry stanowią kompletną definicję problemu decyzyjnego wynikającego z przedstawionego przez decydenta opisu sytuacji decyzyjnej. Dane te stanowią argumenty wejściowe algorytmu dokonującego wyboru najlepszego przekształcenia i rozwiązania problemu decyzyjnego. Wynikiem rozwiązania jest wskazanie wariantu decyzyjnego a_p, który najlepiej spełnia kryteria C decydenta w kontekście charakterystyk Φ sytuacji decyzyjnej.

Dla symetrycznej funkcji trapezoidalnej występuje $\sigma_j^+ = \sigma_j^-$, i możliwe jest modelowanie progów nierozróżnialności i preferencji przy pomocy takiego kształtu funkcji preferencji, w którym wartości wymienionych progów rzutowane są na funkcje przynależności w sposób przedstawiony we wzorze (4.36).

$$\begin{cases} g_j^+ - g_j^- = q_j & \text{próg nierozróżnialności} \\ g_j^+ + \sigma_j^+ - (g_j^- - \sigma_j^-) = p_j & \text{próg preferencji} \\ \frac{g_j^+ + g_j^-}{2} = g_j & \end{cases} \tag{4.36}$$

Progi nierozróżnialności i preferencji mają zastosowanie nie tylko w przypadku danych nieprecyzyjnych lub lingwistycznych, ale też w przypadku dobrze określonych danych liczbowych. Użyteczność wartości q i p wynika stąd, że często nieznaczne różnice w wartości atrybutów nie powinny wpływać na stopień preferencji wariantu. Zastosowanie zbioru rozmytego do opisu pozycji wariantu na skali umożliwia dokonywanie bardziej realistycznych i praktycznych porównań pomiędzy alternatywami decyzyjnymi [92].

4.6. Dobór metody wielokryterialnej do rozwiązania problemu wyboru

4.6.1. Analiza wejść metod wielokryterialnych

Zebrane od decydenta wartości zbiorów C i Φ stanowią podstawę doboru przedstawionego we wzorze 4.11 przekształcenia F. Przyjęty model konstrukcji wytycznych przedstawiono w tabelach 4.4 i 4.5. Wykorzystanie tych wytycznych pozwala na identyfikację grupy metod zdolnych do rozwiązania problemu decyzyjnego. Identyfikację przeprowadzono na podstawie danych z [53] przedstawionych w tabeli 4.7.

Tabela przekształceń należących do zbioru Ψ jest zbudowana w oparciu o analizę wejść metod. Możliwość zastosowania metody wynika z dostarczenia opisu sytuacji decyzyjnej z danymi opisanymi na skali stosownej dla danej metody oraz z dostarczenia stosownego zestawu meta-danych, do których należą między innymi: progi preferencji, progi nierozróżnialności i progi weta. Przedstawiona w pracy [53] analiza dopasowania metod do rozwiązywanych sytuacji decyzyjnej obejmuje wąski zakres możliwych kombinacji skal danych wejściowych. Znaczna liczba metod możliwych do zastosowania wykazuje, iż rozwiązywane w praktyce sytuacje decyzyjne należą właśnie do tych kategorii.

Należy zaznaczyć, iż tabela 4.7 pozwala na wyznaczenie przekształceń **dopuszczalnych** do rozwiązania zadanej sytuacji decyzyjnej i nie dotyczy aspektu dopasowania modelu obliczeń do odzwierciedlenia wpływu opisu sytuacji na wyniki implementacji wariantów decyzyjnych.

Tabela 4.7: Wytyczne obliczone na postawie relacji z [53]

	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	Borda	Condorcet	Conjonctive	Disjonctive	TOPSIS	MAVT	UTA	SMART	MAUT	AHP	ELECTRE I	ELECTRE II	ELECTRE III	ELECTRE IV	ELECTRE IS	ELECTRE TRI	PROMETHEE I	PROMETHEE II	MELCHIOR	ORESTE	REGIME	NAIADE I	NAIADE II	QUALIFLEX	Maximin	Lexi semiorder	Somme Pond	Som. Pd. Flou	MaxiMin flou	PASSEM I	PASSEM II	F PROMETHEE	Fuzzy TOPSIS	Fuzzy Kuo
I_1	●	●	●	●	●	●	●						●							●			●	●	●	●										χ																				
I_2		●	●	●	●	●	●							●	●					●			Θ	Θ	Θ	Θ																														
I_3		●	●	●	●	●	●							●	●	●				●			Θ	Θ	Θ	Θ										●																				
I_4	●	●	●	●	●	●	●						●				●			●			Θ	Θ	Θ	Θ																				●									
I_5	●	●	●	●	●	●	●						●					●		●			Θ	Θ	Θ	Θ																				Θ									
I_6								●	●	●	●	●	●							●																																				
I_7								●	●	●	●	●		●	●					●																																				
I_8								●	●	●	●	●		●	●	●				●																																				
I_9	●	●	●	●	●	●	●						●								●		Θ	Θ	Θ	Θ														χ		χ	χ		Θ	χ									
I_{10}		●	●	●	●	●	●							●	●						●		Θ	Θ	Θ	Θ														●		χ	χ			●									
I_{11}		●	●	●	●	●	●							●	●	●					●		Θ	Θ	Θ	Θ										Θ					Θ		χ,Θ	χ,Θ			Θ									
I_{12}	●	●	●	●	●	●	●						●				●				●		Θ	Θ	Θ	Θ														●						Θ									
I_{13}	●	●	●	●	●	●	●						●					●			●		Θ	Θ	Θ	Θ																				Θ									
I_{14}								●	●	●	●	●	●								●																						χ,Θ	χ,Θ											
I_{15}								●	●	●	●	●		●	●						●																						χ	χ											
I_{16}								●	●	●	●	●		●	●	●					●																						●	●											
I_{17}	●	●	●	●	●	●	●						●									●	Θ	Θ	Θ	Θ						●	●	χ		χ	χ	χ	χ		Θ	●				●		Θ				χ	χ	χ		
I_{18}		●	●	●	●	●	●							●	●							●	Θ	Θ	Θ	Θ						Θ	Θ	χ		χ	●	●	●		Θ	Θ				Θ		Θ				χ	χ	●		
I_{19}		●	●	●	●	●	●							●	●	●						●	Θ	Θ	Θ	Θ						Θ	Θ	●	Θ	●	Θ	Θ	Θ		Θ	Θ	Θ	Θ	Θ		Θ				χ,Θ	χ,Θ	Θ		
I_{20}	●	●	●	●	●	●	●						●				●					●	Θ	Θ	Θ	Θ	●	●	●	●	●	χ	Θ	Θ						Θ		Θ				Θ	Θ		●	χ	χ					●	Θ
I_{21}	●	●	●	●	●	●	●						●					●	●			●	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	Θ	●	Θ	Θ						Θ		Θ				Θ	Θ		●	●	●					Θ	Θ
I_{22}								●	●	●	●	●	●									●																														χ	χ			
I_{23}								●	●	●	●	●		●	●							●																														χ	χ			
I_{24}								●	●	●	●	●		●	●	●						●																														●	●			

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [53, 48, 45, 144, 26, 75, 76].

Przeprowadzona analiza literatury na temat wyboru najlepszej lokalizacji dla organizacji gospodarczej pozwoliła wyodrębnić podzbiór metod powszechnie stosowanych w sytuacjach decyzyjnych z kategorii sytuacji badanej w niniejszej rozprawie. Dokładny opis przykładowych rozwiązań problemów lokalizacyjnych odnaleźć można w źródłach [76, 38, 26, 20, 14, 91, 6] – wchodzących w skład bazy rozwiązań wzorcowych dla projektowanego narzędzia wspomagającego decyzje lokalizacyjne. Zastosowane w wymienionych publikacjach podejścia do problemów lokalizacyjnych stanowiły przesłankę do konstrukcji podzbioru sześciu metod Ψ' (przedstawionego we wzorze (4.37)), uwzględnionych w dalszych rozważaniach. Dla zapewnienia szerszego zakresu zastosowań wybranych metod, wybrano do bazy rozwiązań wzorcowych również publikacje opisujące zastosowania metod z kolekcji Ψ' w innych niż problem lokalizacyjny sytuacjach decyzyjnych, spotykanych w zarządzaniu organizacją gospodarczą.

Stąd, do przeprowadzenia badań nad algorytmem zaproponowanym w rozprawie wybrano z kolekcji metod Ψ podzbiór Ψ' sześciu metod, zgodnie ze wzorem (4.37).

$$\Psi' = \{A_H, T_P, E_3, P_{T1}, P_{T2}, fP_T, fT_P, fK_O\} \tag{4.37}$$

Ograniczenie kolekcji metod Ψ do podzbioru Ψ' przedstawionego we wzorze (4.37) podyktowane zostało potrzebą uproszczenia obliczeń do poziomu umożliwiającego zobrazowanie schematu postępowania i osiągnięcia naukowego celu rozprawy. Wymienione metody należą do kategorii metod, które reprezentują różne podejścia do obliczeń związanych ze wspomaganiem decyzji. Uwzględnienie metod należących do różnych kategorii pozwoliło na zidentyfikowanie operacji matematycznych, które umożliwiają odzwierciedlenie przewidywanego skutku implementacji w obliczeniach MCDA.

Przyjęte kategorie metod, to: metody oparte na relacji międzykryterialnej Ψ_r (4.38), metody oparte na agregacji wydajności atrybutów do jednego kryterium użyteczności Ψ_u (wzór (4.39)), i metody rozmyte $f\Psi$ (wzór (4.40)):

$$\Psi'_r = \{E_3, P_{T1}, P_{T2}\} \tag{4.38}$$
$$\Psi'_u = \{A_H, T_P\} \tag{4.39}$$
$$f\Psi' = \{fP_T, fT_P, fK_O\} \tag{4.40}$$

Konstrukcję reguł decyzyjnych oparto na zagregowanym rozpatrywaniu metod PROMETHEE I i PROMETHEE II, co przedstawia wzór (4.41). Agregacja symboli wynika ze wspólnego uwzględniania obu metod w literaturze poświęconej rozwiązywaniu problemów decyzyjnych, a także z identycznej konstrukcji obu metod (różnica wyłącznie w fazie eksploatacji, więcej w podrozdziale 2.2).

$$P_T \equiv P_{T1} \cup P_{T2} \tag{4.41}$$

Przedstawiona w tabeli 4.7 analiza wymagań informacyjnych dla metod wielokryterialnych pozwala na wyodrębnienie zastosowań dla metod uwzględnionych w kolekcji Ψ'. W tabeli 4.8 przedstawiono kategorie informacji wejściowej, dla których wybrana metoda uznawana jest za dopasowaną do rozwiązania problemu decyzyjnego. Informacja przedstawia założenia do budowy narzędzia do analizy danych opisanego w podrozdziale 4.7. Założenia te zostały także uwzględnione w konstrukcji agenta programowego opisanego w podrozdziale 5.4.

Tabela 4.8: Zestawienie kryteriów dopasowania informacyjnego metod

Metoda	Kategorie wejść (tabela 4.7)	Wartości słowne
P_{T1}	$I = \{I_{17}, I_{18}, I_{19}\}$	NIE lub m_l do obliczeń ostrych
P_{T2}	$I = \{I_{17}, I_{18}, I_{19}\}$	NIE lub m_l do obliczeń ostrych
fP_T	$I = \{I_{17}, I_{18}, I_{19}\}$	TAK (trapezoidalna liczba LR)
T_P	$I = \{I_{20}, I_{21}\}$	NIE lub m_l do obliczeń ostrych
fT_P	$I = \{I_{20}, I_{21}\}$	TAK (liczba trapezoidalna)
fK_O	$I = \{I_{20}, I_{21}\}$	TAK (trapezoidalna liczba LR)

Źródło: Opracowanie własne.

Charakter wejść jest zaledwie jedną z charakterystyk opisujących sytuację decyzyjną na meta-poziomie. Skutki implementacji wybranego wariantu decyzyjnego determinowane są również przez czynniki środowiskowe, stanowiące kontekst podejmowanej decyzji. Przeprowadzona analiza kontekstu sytuacji decyzyjnych w literaturze, składającej się na bazę wiedzy dla prezentowanego w niniejszej rozprawie algorytmu, przedstawiona jest w tabeli A.2 w załączniku A.

W pracy [52] wyróżnione zostały następujące czynniki, które powinny zostać przeanalizowane w celu doboru metody wielokryterialnej do rozwiązania sytuacji decyzyjnej:

1. uczestnicy procesu decyzyjnego: jeden czy wielu decydentów, w przypadku wielu uczestników wskazane jest zastosowanie metod do grupowego podejmowania decyzji;
2. sposób objaśnianie preferencji przez decydenta: zastosowanie porównań parami lub modelu kompensacyjnego;
3. problematyka sytuacji decyzyjnej: wymagania dla rekomendacji, postać rankingu lub najlepszy wariant;
4. metoda agregacji zależna od dostępnych danych: wybór podyktowany jakością i złożonością informacji związanych z procesem decyzyjnym;
5. akceptacja kompensacji: stopień kompensacji pomiędzy kryteriami pożądany przez decydenta;
6. założenia metody: zgodność sytuacji z założeniami wynikającymi z przekształceń rozważanej metody;
7. dostępne rozwiązania: dostępność narzędzi wykorzystujących metodę.

Wymienione wytyczne podane są przez decydenta w sposób bezpośredni, pośredni lub wynikają bezpośrednio z charakterystyki opisu sytuacji decyzyjnej. Zgodnie z przedstawionymi w rozprawie wynikami, **opracowano zestaw parametrów opisujących problem decyzyjny pod kątem doboru metody wielokryterialnej do wyznaczenia rekomendacji**.

Istotną właściwością związaną z metod opartych na względnej relacji wydajności pomiędzy rozważanymi wariantami decyzyjnymi, jest ich podatność na manipulację poprzez dostarczenie specjalnie przygotowanych zbiorów wariantów decyzyjnych. Niebezpieczeństwo to wynika z wpływu wszystkich wariantów z rozważanej kolekcji na wynik końcowy rankingu. W pracy [143] przeanalizowano problem zmiany rankingu końcowego (odwrócenie rankingu) dla metod ELECTRE I i ELECTRE III. Wykazano, że zmiana wartości wariantów o przeciętnej wydajności (sytuowanych w środku rankingu) powoduje zmianę całego rankingu, w tym wariantów na pierwszych pozycjach. Stąd, możliwe jest przeprowadzenie manipulacji na agencie, polegającej na dostarczeniu zestawów danych, które dokonają odwrócenia rankingu końcowego. Czynnik ten jest istotnym determinan-

tem wiarygodnego wspomagania decyzji. Zabezpieczenie przed możliwymi „atakami" powodowanymi dostarczeniem spreparowanych zestawów danych zagwarantuje rzetelność procesu decyzyjnego przy pozyskiwaniu danych ze środowiska rozproszonego (często znajdującego się poza kontrolą decydenta, na przykład sieć Internet).

Różne działanie metod wyselekcjonowanych do włączenia do algorytmu opracowanego w rozprawie wyrażone jest przez różne wymagania dla danych wejściowych nakładane przez różne metody. Na podstawie definicji metod MCDA należących do kolekcji przekształceń Ψ' zidentyfikowano zakres danych wejściowych wykorzystywanych do wykonania przekształcenia. Wymagania te zestawione zostały we wzorach (4.42) [130, 129], (4.43) [144], (4.44) [42, 10], (4.45) [12], (4.46) [12, 14, 113], (4.47) [48, 45], (4.48) [144] i (4.49) [76].

$$F = A_H \Rightarrow F(g(A)_{m\times m}, \Phi), \qquad \Phi = \{W\} \tag{4.42}$$
$$F = T_P \Rightarrow F(g(A)_{b+c}, \Phi), \qquad \Phi = \{W\} \tag{4.43}$$
$$F = E_3 \Rightarrow F(g(A), \Phi), \qquad \Phi = \{W, P, Q, V\} \tag{4.44}$$
$$F = P_{T1} \Rightarrow F(g(A)_{b+c}, \Phi), \qquad \Phi = \{W, P, Q, U\} \tag{4.45}$$
$$F = P_{T2} \Rightarrow F(g(A)_{b+c}, \Phi), \qquad \Phi = \{W, P, Q, U\} \tag{4.46}$$
$$F = fP_T \Rightarrow F(g(A)_{b+c}, \Phi), \qquad \Phi = \{W, P, Q, U\} \tag{4.47}$$
$$F = fT_P \Rightarrow F(g(A)_{b+c}, \Phi), \qquad \Phi = \{W\} \tag{4.48}$$
$$F = fK_O \Rightarrow F(g(A)_{b+c}, \Phi), \qquad \Phi = \{W, K\} \tag{4.49}$$

Uzasadnienie przedstawionego modelu wejść metod przedstawia tabela A.1 w załączniku A. Należące do kolekcji Ψ' metody umożliwiają rozwiązywanie problemów decyzyjnych odpowiadających następującym klasom wejść przedstawionych w tabeli 4.7:

— A_H : I_{20}, I_{21},
— T_P : I_{20}, I_{21},
— E_3 : I_{17}, I_{18}, I_{19},
— P_{T1} : I_{17}, I_{18}, I_{19},
— P_{T2} : I_{17}, I_{18}, I_{19},
— fP_T : I_{17}, I_{18}, I_{19},
— fT_P : I_{20}, I_{21},
— fK_O : I_{20}, I_{21}.

Na podstawie przedstawionego powyżej opisu możliwe jest ustalenie podzbioru Ψ'' kolekcji przekształceń Ψ', zawierającego przekształcenia **odpowiednie** do zadanej sytuacji decyzyjnej. Kolejnym krokiem jest dobranie przekształcenia najbardziej dopasowanego do zadanego problemu decyzyjnego.

Dobór podzbioru metod polega na identyfikacji kategorii wejść, do której należy problem decyzyjny skonstruowany na podstawie opisu przedstawionego przez decydenta. Identyfikacja kategorii wejść, której odpowiada analizowana sytuacja, pozwala na wyznaczenie podzbioru Ψ'' dla rozważanej sytuacji.

4.6.2. Analiza kontekstu sytuacji decyzyjnej

Dobór metody wielokryterialnej bazuje na opisie kontekstu środowiska decyzyjnego zawartym w zbiorze K, który jest częścią składową opisu sytuacji decyzyjnej. Parametry należące do zbioru K stanowią wejścia modułu interferencyjnego wykorzystującego bazę

wiedzy skonstruowaną na podstawie danych z rozwiązywania sytuacji decyzyjnych przez ekspertów.

Na podstawie literatury naukowej wyznaczono zależności pomiędzy czynnikami środowiskowymi a metodą użytą do rozwiązania problemu decyzyjnego. Przyjęto przy tym założenie, że aplikacja metody wyrana w artykule naukowym stanowi źródło wiedzy eksperckiej. Stąd, zastosowane przez autorów przebadanych artykułów podejścia do rozwiązania opisanych tamże problemów decyzyjnych stanowią wzorcowe zastosowania metody do zadanej sytuacji decyzyjnej w kontekście niniejszej pracy. Wartości parametrów środowiskowych przedstawione zostały zgodnie z notacją zastosowaną przedstawioną we wzorze (4.50).

$$K = \{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8, K_9\} \tag{4.50}$$

Wartości zbioru K dla analizowanych przypadków określoną zgodnie ze znaczeniami przedstawionymi w tabeli 4.6 wraz z komentarzem. Opis werbalny i odniesienia do wykorzystanych artykułów przedstawiono w tabeli A.1 w załączniku A. Przy opracowaniu zbioru K uwzględniono niektóre artykuły więcej niż jednokrotnie, co wynika z zastosowania tej samej metody do rozwiązania więcej niż jednego przykładu, lub z zastosowania więcej niż jednej metody do rozwiązania tej samej sytuacji decyzyjnej. Dokonano również połączenia metod P_{T1} i P_{T2} w jedną klasę P_T, ze względu na identyczny przebieg wnioskowania w obu wariantach metody PROMETHEE. Wynikiem analizy jest kolekcja 33 zbiorów K, wskazujących na wykorzystanie metod z kolekcji Ψ' zgodnie ze wzorami (4.51) - (4.57).

$$\begin{array}{ll}
\{2,0,1,1,0,0,1,0,1\} & \Rightarrow P_T \\
\{6,3,1,1,1,2,1,0,0\} & \Rightarrow P_T \\
\{9,3,1,1,0,0,1,1,0\} & \Rightarrow P_T \\
\{4,0,1,1,0,0,2,0,0\} & \Rightarrow P_T \\
\{9,3,1,1,0,0,1,0,0\} & \Rightarrow P_T \\
\{7,1,0,1,0,0,4,0,0\} & \Rightarrow P_T \\
\{8,1,0,1,1,0,1,0,0\} & \Rightarrow P_T \\
\{6,2,0,1,0,0,2,1,1\} & \Rightarrow P_T
\end{array} \tag{4.51}$$

$$\begin{array}{ll}
\{1,0,1,0,1,0,5,1,0\} & \Rightarrow T_P \\
\{5,3,1,1,0,0,3,1,0\} & \Rightarrow T_P \\
\{9,3,1,1,1,0,1,0,0\} & \Rightarrow T_P
\end{array} \tag{4.52}$$

$$\begin{array}{ll}
\{7,1,0,1,0,0,4,0,0\} & \Rightarrow fP_T \\
\{4,3,1,1,0,0,1,1,0\} & \Rightarrow fP_T \\
\{1,0,1,1,1,0,4,0,0\} & \Rightarrow fP_T
\end{array} \tag{4.53}$$

$$\begin{array}{ll}
\{4,3,1,1,0,0,3,0,0\} & \Rightarrow fT_P \\
\{0,0,1,1,0,0,3,1,0\} & \Rightarrow fT_P \\
\{6,3,1,0,1,0,5,0,1\} & \Rightarrow fT_P \\
\{0,0,1,1,0,0,1,1,0\} & \Rightarrow fT_P \\
\{4,3,1,0,0,0,2,0,0\} & \Rightarrow fT_P \\
\{0,0,1,1,0,0,1,1,0\} & \Rightarrow fT_P \\
\{4,3,1,1,0,0,1,0,0\} & \Rightarrow fT_P
\end{array} \tag{4.54}$$

$$\begin{array}{ll} \{4,3,1,1,0,0,1,0,0\} & \Rightarrow fK_O \\ \{6,3,1,1,0,1,1,0,1\} & \Rightarrow fK_O \end{array} \tag{4.55}$$

$$\begin{array}{ll} \{2,0,0,1,2,0,2,0,0\} & \Rightarrow A_H \\ \{0,0,1,1,0,0,3,2,1\} & \Rightarrow A_H \\ \{0,0,1,1,0,0,2,0,0\} & \Rightarrow A_H \\ \{9,3,1,0,0,0,2,1,1\} & \Rightarrow A_H \\ \{9,1,1,1,0,0,1,0,0\} & \Rightarrow A_H \end{array} \tag{4.56}$$

$$\begin{array}{ll} \{3,1,1,0,0,3,5,0,1\} & \Rightarrow E_3 \\ \{8,1,0,1,1,0,1,0,0\} & \Rightarrow E_3 \\ \{1,0,1,1,0,2,1,0,0\} & \Rightarrow E_3 \\ \{1,0,1,1,0,1,1,0,0\} & \Rightarrow E_3 \\ \{9,1,1,0,0,3,4,0,1\} & \Rightarrow E_3 \end{array} \tag{4.57}$$

4.6.3. Odkrywanie reguł decyzyjnych

Przeprowadzono doświadczenia, które miały na celu wykrycie zależności pomiędzy elementami zbioru K, a wyborem metody lub poszczególnych składowych zbioru Ψ, zgodnie z podziałem wynikającym ze wzorów (4.37) - (4.41). Badanie zależności przeprowadzono zgodnie z metodyką przedstawioną poniżej. Do analizy zależności wykorzystano program SAS Enterprise Miner. Indukcję drzew decyzyjnych wykonano dla wartości wyjściowych Ψ', a także dla zdefiniowanego zbioru T określającego przynależność wybranej metody do podzbiorów Ψ'_u,Ψ'_r i $f\Psi'$.

Doświadczenie przeprowadzono dla dwóch zestawów danych. Zestawem pierwszym jest zestaw rzutujący zastosowanie bezpośrednio na obraną regułę, jak przedstawiono we wzorach (4.38), (4.39) i (4.40). Przy czym schemat kodowania wartości zbioru T przedstawia wzór (4.58).

$$\begin{array}{l} T_i = \{t_{i1}, t_{i2}\} \\ t_{i1} = \begin{cases} 0, & \text{gdy } \Psi'_i \notin f\Psi' \\ 1, & \text{gdy } \Psi'_i \in f\Psi' \end{cases} \\ t_{i2} = \begin{cases} 1, & \text{gdy } \Psi'_i \in \Psi'_r \\ 2, & \text{gdy } \Psi'_i \in \Psi'_u \end{cases} \end{array} \tag{4.58}$$

gdzie $\Psi'_i \in \Psi'$ oznacza rozważaną metodę wielokryterialną.

Analizę wykonano przy użyciu trzech technik podziału dla indukcji drzewa decyzyjnego. Ustawienia programu SAS Enterprise Miner dla indukcji drzew decyzyjnych przedstawia tabela 4.9.

Determinanty środowiskowe zawarte w zbiorze K są zmiennymi dyskretnymi o charakterze, jak przedstawiono w tabeli 4.10.

Tabela 4.10: Rodzaje skal wartości zbioru K

K	Rodzaj
K_1	Nominalna
K_2	Nominalna
K_3	Binarna

Tabela 4.10: Rodzaje skal wartości zbioru K

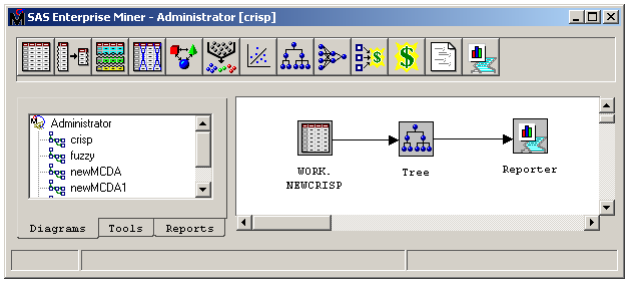
K	Rodzaj
K_4	Binarna
K_5	Porządkowa
K_6	Porządkowa
K_7	Porządkowa
K_8	Porządkowa
K_9	Nominalna

Źródło: Opracowanie własne.

Dla kolejnych kolumn ustawień indukcji drzewa decyzyjnego z tabeli 4.9 wykonano indukcję dla następujących kombinacji danych testowych i wyjść:

1. $\Psi' \rightarrow \Psi'$
2. $\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\}$
3. $\Psi' \rightarrow \{f\Psi', \neg f\Psi;\}$
4. $\neg f\Psi' \rightarrow \neg f\Psi'$
5. $\neg f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap \neg f\Psi'$
6. $f\Psi' \rightarrow f\Psi'$
7. $f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap f\Psi'$

Wyznaczenie drzew decyzyjnych zadano algorytmowi programu SAS Enterprise Miner, tworząc strukturę przepływu, jak przedstawiono na rysunku 4.5.



Rysunek 4.5: Ekran programu SAS

Źródło: Opracowanie własne

Operację wyznaczenia wykonano dla trzech metod podziału:

— χ^2 na poziomie istotności $0,4$,
— minimalizacja entropii,
— redukcja Gini.

Łącznie wyznaczono 63 drzewa decyzyjne. Wykresy wszystkich drzew decyzyjnych dołączono do pracy w formie załącznika B. Wyznaczono współczynniki liczby próbek poprawnie zakwalifikowanych (wartość liścia) w stosunku do wartości przypisanych do danego liścia. Wyznaczone wartości poprawnej kwalifikacji dla całych drzew indukowanych z różnymi ustawieniami, zgodnie z metodologią przedstawioną powyżej, przedstawia tabela 4.11.

Tabela 4.9: Parametry indukcji drzew decyzyjnych programu

Nazwa	1	2	3
Minimum obserwacji w liściu	2	2	2
Ilość obserwacji dla split search	5	5	5
Ilość gałęzi węzła:	2	3	4
Maksymalna głębokość drzewa	10	10	10
Ilość reguł podziału na węzeł	5	5	5
Poziom istotności dla χ^2	0.3	0.3	0.3

Źródło: Opracowanie własne.

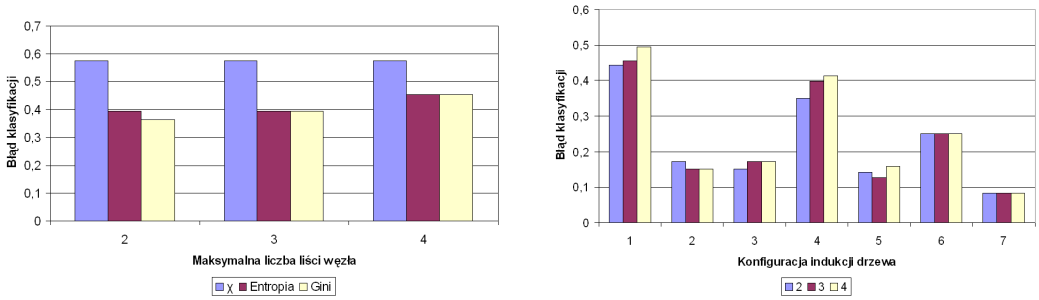
Tabela 4.11: Wyniki analizy zbioru K

	Liście	**2**		**3**		**4**	
1	χ^2	0,42	K3, K6	0,42	K3, K6	0,42	K3, K6
	Entropia	0,61	K1, K6, K7, K8	0,61	K1, K2, K6, K7	0,55	K1, K6, K7
	Gini	0,64	K1, K6, K7, K8	0,61	K1, K6, K7	0,55	K1, K6, K7
2	χ^2	0,76	K3, K6	0,76	K3, K6	0,76	K3, K6
	Entropia	0,85	K1, K2, K7, K8	0,91	K1, K2, K7, K8	0,91	K1, K2, K4, K6, K8
	Gini	0,88	K1, K2, K6, K8	0,88	K1, K2, K6, K8	0,88	K1, K2, K6, K8
3	χ^2	0,79	K1	0,76	K1	0,79	K1
	Entropia	0,88	K1, K2, K7	0,88	K1, K6, K7, K8	0,85	K1, K7
	Gini	0,88	K1, K2, K7	0,85	K1, K7	0,85	K1, K7
4	χ^2	0,57	K5, K6	0,57	K5, K6	0,57	K5, K6
	Entropia	0,71	K2, K6, K7	0,62	K6, K7	0,57	K6, K7
	Gini	0,66	K5, K6	0,62	K6, K7	0,62	K6, K7
5	χ^2	0,76	K7, K8	0,81	K7, K8	0,81	K7, K8
	Entropia	0,90	K1, K6, K7	0,90	K1, K5	0,86	K1, K5
	Gini	0,90	K1, K6, K7	0,90	K1, K5	0,86	K1, K5
6	χ^2	0,75	K7, K9	0,75	K7, K9	0,75	K7, K9
	Entropia	0,75	K7, K8	0,75	K7, K8	0,75	K7, K8
	Gini	0,75	K2, K7	0,75	K7, K8	0,75	K7, K8
7	χ^2	0,92	K1	0,92	K1	0,92	K1
	Entropia	0,92	K1	0,92	K1	0,92	K1
	Gini	0,92	K1	0,92	K1	0,92	K1

Źródło: Opracowanie własne.

Rozważane kategorie zależności pozwalają na wyznaczenie metody odpowiedniej do rozwiązania zadanej sytuacji decyzyjnej na więcej niż jeden sposób. W związku z powyższym przeprowadzono wnioskowanie dla następujących ścieżek wnioskowania:

— kontekst sytuacji decyzyjnej → metoda wielokryterialna,
— kontekst sytuacji decyzyjnej → klasa danych wejściowych (ostre, rozmyte) → metoda wielokryterialna.



(a) Współczynniki błędu klasyfikacji dla przekształcenia $\Psi' \rightarrow \Psi'$

(b) Średni błąd klasyfikacji dla skonstruowanych drzew decyzyjnych

Rysunek 4.6: Błędy klasyfikacji dla odkrytych drzew decyzyjnych

Źródło: Opracowanie własne

Rozkład współczynników źle zakwalifikowanych próbek w stosunku do całości (błąd klasyfikacji), w zależności od dozwolonej maksymalnej liczby liści węzła i dobranej metody podziału, przedstawia wykres na rysunku 4.6a. Odczytując wykres można zaobserwować przesłankę do zastosowania metod opartych na nośności informacyjnej, a nie wartości liczbowej parametrów. Preferencja tego podejścia wynika z charakteru danych wejściowych badanego problemu. Natomiast wyniki indukcji dla badanych kombinacji danych testowych i wyjść w postaci uśrednionych (dla trzech badanych metod podziału) wartości błędów klasyfikacji przedstawia wykres na rysunku 4.6b.

4.6.4. Weryfikacja reguł decyzyjnych

Naturalnym wnioskiem przedstawionego wykresu jest lepsza skuteczność przewidywania bardziej ogólnych kategorii, takich jak rozmytość lub zastosowane podejście decyzyjne. Spośród wyznaczonych drzew decyzyjnych (dołączone do pracy w formie załącznika B) wybrano drzewo na rysunku 4.7, jako drzewo dla przebiegu „kontekst sytuacji decyzyjnej $\rightarrow$ metoda wielokryterialna". Natomiast dla przebiegu „kontekst sytuacji decyzyjnej $\rightarrow$ klasa danych wejściowych (ostre, rozmyte) $\rightarrow$ metoda wielokryterialna" do doboru metody wielokryterialnej wybrano drzewa przedstawione na ilustracjach: 4.8a, 4.8b i 4.8c.

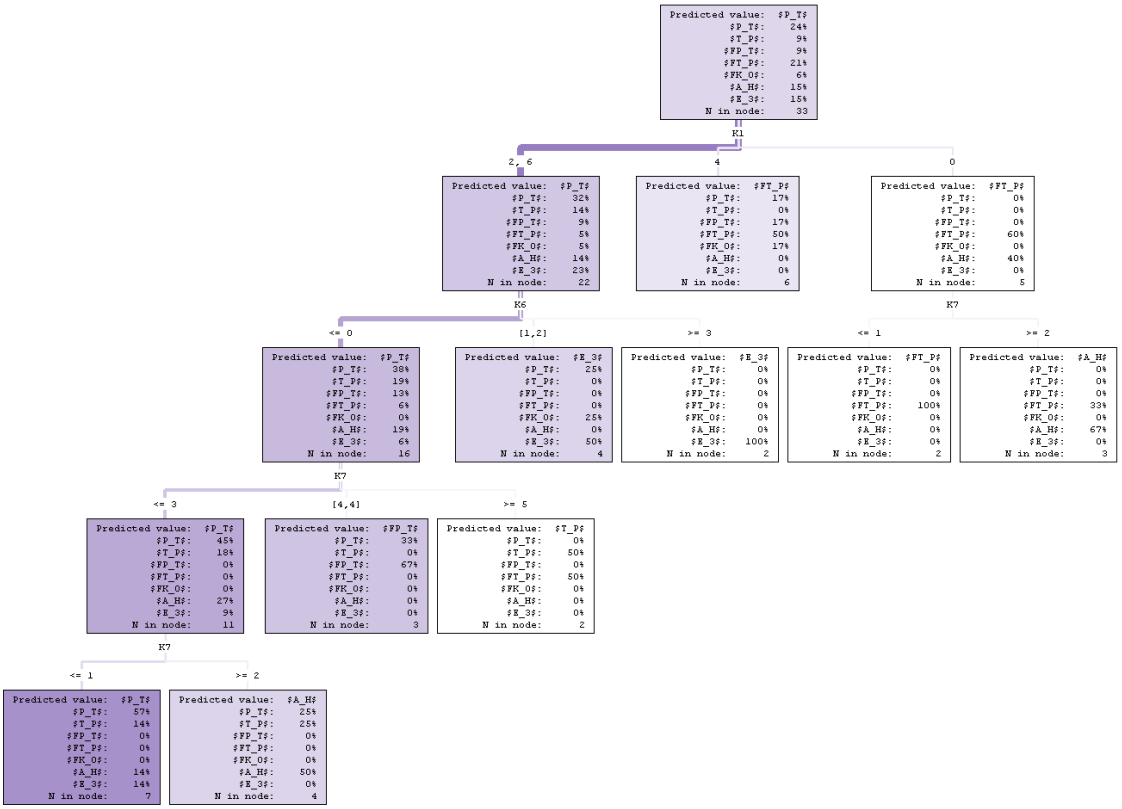
[p]

Przedstawione na rysunku 4.7 drzewo decyzyjne umożliwia wskazanie dopasowania sytuacji decyzyjnej do metody wielokryterialnej dla sześciu z siedmiu metod wchodzących w skład kolekcji Ψ'. Poprawność klasyfikacji wynosi 61%.

Przedstawione na rysunku 4.8a drzewo decyzyjne umożliwia wskazanie dopasowania sytuacji decyzyjnej do kategorii metod wielokryterialnych dla danych rozmytych lub ostrych. Poprawność klasyfikacji wynosi 88%.

Przedstawione na rysunku 4.8b drzewo decyzyjne umożliwia wskazanie dopasowania sytuacji decyzyjnej do metody dla danych ostrych. Reguły umożliwiają dobór dla każdej z czterech metod wchodzących w skład kolekcji $\neg f\Psi'$. Poprawność klasyfikacji wynosi 71%.

Przedstawione na rysunku 4.8c drzewo decyzyjne umożliwia wskazanie dopasowania sytuacji decyzyjnej do metody dla danych rozmytych. Reguły umożliwiają dobór dla



Rysunek 4.7: Drzewo decyzyjne doboru metody wielokryterialnej

Źródło: Opracowanie własne

każdej z trzech metod wchodzących w skład kolekcji $f\Psi'$. Poprawność klasyfikacji wynosi 75%.

Przedstawione reguły drzew decyzyjnych pozwalają na dobranie metody wielokryterialnej najlepiej dopasowanej do zadanej sytuacji decyzyjnej, zgodnie z uwzględnionymi danymi historycznymi (zaczerpniętymi z literatury naukowej).

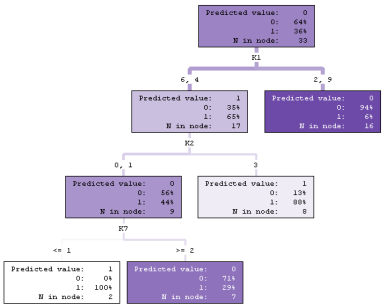
Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono zbiór **istotnych parametrów środowiskowych** K', zgodnie ze wzorem (4.59).

$$K' = \{K_1, K_2, K_6, K_7, K_8\} \tag{4.59}$$

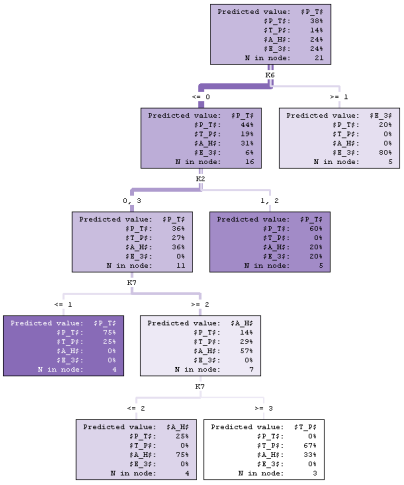
Wybrany schemat wnioskowania identyfikuje jako istotne następujące elementy kontekstu środowiskowego sytuacji decyzyjnej:

— rodzaj wybieranego obiektu,
— dyscyplina decyzji,
— liczba wariantów decyzyjnych,
— stopień poznania sytuacji decyzyjnej przez decydenta,
— zasięg decyzji.

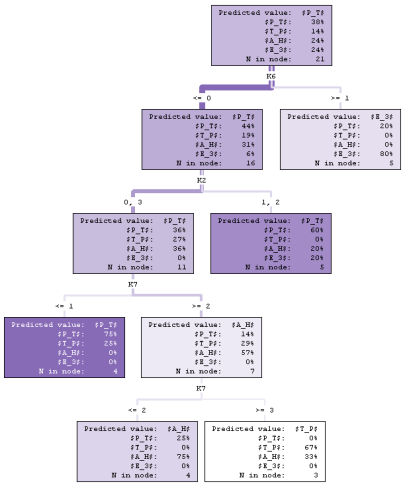
W związku z brakiem pokrycia całości zbioru Ψ' przez zestaw reguł zidentyfikowanych jako jedno drzewo decyzyjne (model $\Psi' \rightarrow \Psi'$), do algorytmu włączono wnioskowanie oparte o trzy drzewa decyzyjne uporządkowane w strukturze hierarchicznej, zgodnie ze schematem 4.9.



(a) Drzewo decyzyjne dla doboru podejścia ostrego lub rozmytego



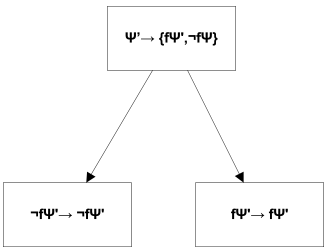
(b) Drzewo decyzyjne dla doboru metody dla danych ostrych



(c) Drzewo decyzyjne dla doboru metody dla danych rozmytych

Rysunek 4.8: Drzewa decyzyjne dla dwuetapowego doboru metody

Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 4.9: Schemat hierarchii drzew decyzyjnych

Źródło: Opracowanie własne

Przedstawiony powyżej zbiór reguł wynikowych procesu uczenia stanowi źródło wiedzy uczącej, zgodnie z modelem przedstawionym na rysunku 4.4. Uzyskane reguły stanowią bazę wiedzy dla doboru metody wielokryterialnej, bazując na kontekście środowiskowym sytuacji decyzyjnej.

Odkryte zależności pozwalają na wyznaczenie **dopasowania** przekształcenia z podzbioru Ψ'' do analizowanej sytuacji decyzyjnej, przy czym w większym stopniu dopasowane przekształcenie skutkuje lepszym odzwierciedleniem rzeczywistych konsekwencji rozważanych wariantów decyzyjnych.

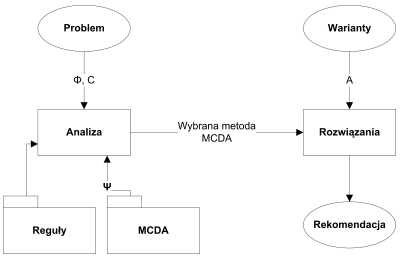
Przedstawiona w niniejszym podrozdziale metodologia pozwala na przeprowadzenie kompletnego procesu wspomagania decyzji dla sytuacji decyzyjnej należącej do zakresu dziedzinowego objętego przez utworzoną bazę wiedzy. Skonstruowanie bazy wiedzy pozwalającej na dobór przekształcenia najbardziej dopasowanego do zadanej sytuacji decyzyjnej pozwala na uzyskanie rekomendacji lepiej dopasowanej do problemu, przed którym stoi decydent, niż zastosowanie podejścia nie uwzględniającego rzeczywistego kontekstu sytuacji decyzyjnej.

Przedstawione na rysunkach 4.7–4.8c drzewa decyzyjne stanowią źródło dla reguł decyzyjnych bazy wiedzy doboru metody wielokryterialnej. Moduł wnioskujący agenta wykorzystuje reguły budowane na podstawie odkrytych drzew decyzyjnych do autonomicznego doboru metody wielokryterialnej właściwej dla analizowanej sytuacji decyzyjnej.

4.7. Konstrukcja algorytmu rozwiązującego model decyzyjny

Modelowanie prowadzi do wyodrębnienia klasy zjawisk, których analiza jest możliwa w aspekcie dostępnych środków technicznych. Wyniki analizy mogą stanowić reprezentację rozważanych zjawisk. Informacja pozyskana na podstawie analizy modelu uznawana jest za wiarygodną i stanowi podstawę podejmowanych akcji [126, s. 25].

Przeprowadzenie rozwiązania modelu decyzyjnego wykonane jest przy pomocy algorytmu funkcjonującego zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4.10. Opis sytuacji decyzyjnej poddawany jest analizie, która obejmuje dostępną kolekcję metod wielokryterialnych oraz reguły bazy wiedzy.



Rysunek 4.10: Algorytm rozwiązania problemu decyzyjnego

Źródło: Opracowanie własne

Następnie sytuacja decyzyjna zapisywana jest w postaci problemu decyzyjnego możliwego do rozwiązania przy pomocy wybranej metody wielokryterialnej. Tak zapisany problem decyzyjny poddawany jest przekształceniu w fazie agregacji oraz eksploatacji zgodnie z dokonanym wyborem. Wynik przekształcenia stanowią zbiór wejściowy dla modułu objaśniającego, który sporządza rekomendacje dla decydenta.

Tak więc konstrukcja modelu decyzyjnego składa się z kolejnych kroków – jak na rysunku 4.10, które prowadzą do określenia determinantów modelowania decyzji.

Kolejne etapy definiowania problemu decyzyjnego przedstawiono poniżej.

1. Opis: Poprzez definiowanie sytuacji decyzyjnej rozumie się nadanie jej nazwy lub oznaczenia kodowego, umożliwiającego dalszą identyfikację sytuacji decyzyjnej w procesach organizacyjnych zachodzących w przedsiębiorstwie. Do opisu sytuacji decyzyjnej wchodzić mogą również informację dodatkowe, istotne z punktu widzenia traktowania sytuacji przez decydenta lub interesariuszy (świadczące o priorytetach decyzji przyznanych przez te osoby), które jednakże nie mają bezpośredniego przełożenia na budowę modelu decyzyjnego.
2. C: Definiowanie kryteriów, które określają postrzeganie sytuacji decyzyjnej przez decydenta; polega na określeniu szeregu czynników określających wpływ wartości atrybutu, odpowiadającego danemu kryterium w analizowanych wariantach decyzyjnych, na stopień preferencji danego wariantu.
   — $g(\tilde{A})$: wytyczne dla przełożenia wartości atrybutów wariantów decyzyjnych na wydajność wariantów względem danego kryterium; funkcja uwzględnia ograniczenia wzrostu wydajności opisane przez następujące wartości (zgodnie ze wzorami (4.18)-(4.21)):
      — a^+ lub $\tilde{a}^+$: wartość górnego ograniczenia, istotna w przypadku kryteriów zyskowych (wzory (4.18) i (4.20));
      — a^- lub $\tilde{a}^-$: wartość dolnego ograniczenia, istotna w przypadku kryteriów kosztowych (wzory (4.19) i (4.21));
   — $D(\tilde{A})$: dziedzina wartości; pełni rolę filtra odrzucającego warianty, nie spełniające warunku koniecznego implementacji.
3. Φ: Definiowanie meta-danych procesu decyzyjnego; określa informacje pozwalające na zdeterminowanie pożądanego sposobu traktowania wartości wariantów decyzyjnych dla atrybutu odpowiadającego danemu kryterium.
   — q: określenie wartości dopuszczalnej różnicy pomiędzy atrybutami, dla której ich wartości uznawane są za nierozróżnialne (różnica określana zgodnie ze wzorami (4.5) i (4.6) w podrozdziale 4.1);
   — p: określenie wartości różnicy pomiędzy atrybutami, dla której jedna z wartości atrybutów uznawana jest za przewyższającą (różnica określana zgodnie ze wzorami (4.7) i (4.8) w podrozdziale 4.1);
   — v: określenie wartości różnicy pomiędzy atrybutami, dla której wetowana jest ewentualna relacja przewyższania dla danego wariantu decyzyjnego (różnica określana zgodnie ze wzorami (4.3) i (4.4) w podrozdziale 4.1);
   — w: określenie ważności danego kryterium, która stanowi o sile, z jaką relacje na danym kryterium determinują globalną preferencję wariantu decyzyjnego;
   — K: istotnym zadaniem z punktu widzenia konstrukcji modelu decyzyjnego jest określenie kontekstu sytuacji decyzyjnej w postaci zbioru parametrów środowiskowych $K' = \{K_1, K_2, K_6, K_7, K_8\}$. Kolejnym krokiem istotnym z punktu widzenia modelowania wag kryteriów jest nadanie sytuacji decyzyjnej struktury tematycznej, tworzącej zbiór kategorii, w których zostaną pogrupowane kryteria. Zgodnie z badaniami przedstawionymi w podrozdziale 4.6, w skład zbioru parametrów środowiskowych sytuacji decyzyjnej wchodzi następujące pięć elementów (znaczenie i dopuszczalne wartości elementów przedstawione w tabeli 4.6 i w treści podrozdziału 4.5):
      — K_1: rodzaj wybieranego obiektu

— K_2: dyscyplina decyzji
— K_6: ilość wariantów decyzyjnych
— K_7: stopień poznania sytuacji decyzyjnej przez decydenta
— K_8: zasięg decyzji

Określanie, a następnie wykorzystywanie preferencji decydenta dla wariantów decyzyjnych do modelowanie sytuacji decyzyjnej, opiera się na założeniach spójności preferencji decydenta. Wiąże się to między innymi z zachowaniem *asymetrii*, która wprowadza wymóg przedstawiony we wzorze (4.60).

$$\neg\exists x, y \in X : x \succ y \vee y \succ x \tag{4.60}$$

gdzie $x, y \in X$ są rozważanymi wariantami decyzyjnymi [35].

Poniżej wymieniono rozważane techniki transformacji różnych formatów preferencji do postaci relacyjnego modelu relacyjnego preferencji [155].

— *Porównanie par* (lub *relacyjny model multiplikatywny*) jest postacią wynikową i określa postać preferencji decydenta jako pozytywne relacje preferencyjne. Siła preferencji wyrażona jest według określonej skali, na przykład skali Saaty'ego [128].
— *Uporządkowany wektor* $O^k = \left(k^k(1), \ldots, o^k(n)\right)$, określający preferencje decydenta e^k dla n kryteriów, gdzie $o^k(i)$ jest preferencją decydenta dla kryterium $C_i, i = 1, \ldots, n$. Transformacja tego modelu na postać multiplikatywną i przebiega według schematu ze wzoru (4.61).

$$p_{ij}^k = 9^{u_i^k - u_j^k}, \qquad i, j = 1, \ldots, n \tag{4.61}$$

gdzie $u_i^k = v(n - o^k(i))$ i $u_j^k = v(n - o^k(j))$ są wartościami użyteczności, przypisanymi odpowiednio kryteriom C_i i C_j jako wynik funkcji rosnącej v, postaci: $u_i^k = \frac{v(n-o^k(i)}{n-1}$.
— *Wartość użyteczności* (lub *wektor użyteczności*) jest sporządzonym przez decydenta e_k wektorem $U^k = \left(u_1^k, u_2^k, \ldots, u_n^k\right)$, gdzie $u_i^k \in [0, 1]$, $i = 1, 2, \ldots, n$, jest indeksem kryterium, a u_i^k jest wartością użyteczności decydenta e_k dla kryterium C_i. Transformacja preferencji przebiega z wykorzystaniem proporcji wartości użyteczności według wzoru (4.62).

$$p_{ij}^k = \frac{u_i^k}{u_j^k}, \qquad i, j = 1, \ldots, n \tag{4.62}$$

— *Wektor ocen lingwistycznych* C jest wektorem $L^k = \left(l_1^k, l_2^k, \ldots, l_n^k\right)$, sporządzonym przez decydenta e_k, a $e_k \in E$, $l_i^k = (u_i, \alpha_i, \beta_i)$, jest oceną lingwistyczną kryterium C_i wyrażoną przez decydenta e_k. Transformacja ocen na multiplikatywną relacje preferencji wykonana jest poprzez mapowanie ocen lingwistycznych na postać liczbową, a następnie sporządzenie modelu multiplikatywnego relacji kryteriów według wzoru (4.63).

$$p_{ij}^k = 9^{u_i - u_j}, \qquad i, j = 1, \ldots, n \tag{4.63}$$

— *Wybrany podzbiór* C jest konstrukcją, gdy ze zbioru C wybierany jest podzbiór $\bar{C} = \{C_{i_1}, C_{i_2}, \ldots, C_{i_t}\}$ preferencji decydenta dla wybranych kryteriów ($\bar{C} \subset C$). Relacja multiplikatywna dla uzyskanego podzbioru kryteriów $\bar{C}$ tworzona jest według wzoru (4.64).

$$\begin{array}{l} p_{ij}^k = 9 \text{ i } p_{ij}^k = \frac{1}{9}, \qquad i, j = 1, \ldots, n \\ \text{jeśli } C_i \in \bar{C}, \quad C_j \in C/\bar{C}, \\ p_{ij}^k = p_{ji}^k = 1, \qquad i, j = 1, \ldots, n, \text{dla pozostałych} \end{array} \tag{4.64}$$

— *Wybrany rozmyty podzbiór* C jest konstrukcją, gdy ze zbioru C wybierany jest rozmyty podzbiór $\tilde{C} = \left\{(C_{i_1}, l^k_{i_1}), (C_{i_2}, l^k_{i_2}), \ldots, (C_{i_q}, l^k_{i_q})\right\}, i_q < n$, wyrażający preferencje dla części kryteriów przy użyciu ocen lingwistycznych; $l^k_{i_r}$ jest oceną lingwistyczną, gdzie $i_r = 1, \ldots, i_q$. Relacja multiplikatywna tworzona jest według wzoru (4.65).

$$\begin{array}{lll} p^k_{ij} = 9^{u_i - u_j}, & i,j = 1,\ldots,n;\ j \neq j, & \text{jeśli } C_i, C_j \in \tilde{C} \\ p^k_{ij} = 1, & i,j = 1,\ldots,n;\ j \neq j, & \text{jeśli } C_i, C_j \notin \tilde{C} \\ p^k_{ij} = 9^{u_i - 0,5}, & i,j = 1,\ldots,n;\ j \neq j, & \text{jeśli } C_i \in \tilde{C}, C_j \notin \tilde{C} \end{array} \tag{4.65}$$

— *Normalna relacja preferencji* jest dostarczona przez decydenta w formie ścisłych preferencji odnośnie kryteriów. Decydent e_k określa fakt preferencji kryterium C_i ponad C_j. Model multiplikatywny budowany jest, jak podano we wzorze (4.66).

$$\begin{array}{lll} p^k_{ij} = 9, p^k_{ij} = \frac{1}{9}, & i,j = 1, & \text{jeśli } C_i \text{ jest preferowane ponad } C_j \\ p^k_{ij} = 1, p^k_{ij} = 1, & i,j = 1, & \text{jeśli brak określonej preferencji} \end{array} \tag{4.66}$$

— *Rozmyta relacja preferencji* oznacza preferencje decydenta zapisane jako binarna relacja rozmyta F w zbiorze C, gdzie $F : C \times C \to [0,1]$ i f_{ij} oznacza stopień preferencji kryterium C_i nad C_j. Relacja F jest relacją wzajemną, $f_{ij} + f_{ji} = 1$ i $f_{ii} = \varnothing$. Transformację do postaci multiplikatywnej relacji preferencji zapisano we wzorze (4.67).

$$p^k_{ij} = \frac{f^k_{ij}}{f^k_{ji}}, \qquad i,j = 1,\ldots,n. \tag{4.67}$$

Określenie problemu decyzyjnego pozwala na przeprowadzenie operacji poszukiwania wariantów decyzyjnych $\tilde{A}$, a następnie wyznaczenie kompletnego zasobu informacyjnego definiującego problem decyzyjny zgodnie ze wzorem (4.68).

$$\left(C, \Phi, \tilde{A}\right) \tag{4.68}$$

Definicje poszczególnych składowych przedstawiono we wzorach (4.1), (4.2) i (4.9).

Kolejnym krokiem jest odrzucanie wariantów niespełniających wymagań decydenta (kryterium odrzucenia na podstawie dziedziny D wartości atrybutów). Prowadzi to do obrazu sytuacji decyzyjnej zgodnej ze wzorem (4.69).

$$(C, \Phi, A) \tag{4.69}$$

Uwzględnienie dostępnej kolekcji metod wielokryterialnych Ψ' jest wstępnym krokiem doboru metody spełniającej warunek przedstawiony we wzorze (4.11). Warto zauważyć, że przeprowadzenie wnioskowania na problemie decyzyjnym w postaci przedstawionej we wzorze (4.10) może zostać usprawnione. Stąd, przyjęto postać modelu decyzyjnego, jak we wzorze (4.70).

$$(C, \Phi, A, \Psi') \tag{4.70}$$

Postać problemu przedstawiona we wzorze (4.70) pozwala na przeprowadzenie analizy dopasowania problemu decyzyjnego do metod wielokryterialnych kolekcji Ψ'. Proces analizy polega na zastosowanie wnioskowania przy użyciu reguł bazy wiedzy, zbudowanych w oparciu o wiedzę ekspercką pozyskaną z wiarygodnego źródła, na przykład z praktycznych zastosowań przedsiębiorstwa. W niniejszej rozprawie wykorzystano literaturę naukową jako źródło wiedzy, co opisano w podrozdziałach 4.5 i 4.6. Wykonanie

wnioskowania przy użyciu bazy reguł, gdzie źródłem danych wejściowych jest zbiór Φ' sytuacji decyzyjnej, podzielone jest na dwa niezależne etapy. Wynikami obu etapów są niezależne wskazania podzbiorów zbioru Ψ'' dopasowanych metod wielokryterialnych.

Pierwszym etapem jest analiza struktury wartości przedstawionych przez decydenta w kontekście wytycznych przedstawionych w podrozdziale 4.5 (na podstawie [53] i [52]). Wynikiem ten analizy jest wyznaczenie zbiorów spełniających **kryteria wejściowe**.

Drugim etapem jest przeprowadzenie wnioskowania przy pomocy systemu interferencyjnego wykorzystującego bazę wiedzy opartą o reguły drzew decyzyjnych przedstawionych w podrozdziale 4.6 (ilustracje B.3b, B.3d i B.4b). Wynikiem działania systemu interferencyjnego jest podzbiór Ψ'' metod wielokryterialnych dopasowanych do rozwiązania problemu decyzyjnego, wraz z przypisanym każdej metodzie stopniem dopasowania.

Przedstawiona we wzorze (4.71) postać modelu decyzyjnego jest rozwiązywana przy użyciu metody przekształcenia F z podzbioru Ψ'' o najwyższym stopniu dopasowania.

$$(C, \Phi, A, \Psi'') \tag{4.71}$$

Porównanie wariantów decyzyjnych według ilościowej skali preferencji reprezentującej atrakcyjność alternatywy dla decydenta polega na przyporządkowaniu wariantowi x takiej liczby rzeczywistej $v(x)$, że z implikacji $v(x) = v(y)$ jednoznacznie wynika, że warianty x i y są w równym stopniu preferowane, a z implikacji $v(x) > v(y)$ jednoznacznie wynika, że wariant x jest w większym stopniu atrakcyjny, niż wariant y. Z powyższych stwierdzeń nie wynika jednak możliwość oceny stopnia preferencji, a jedynie jej kolejność [36].

Konstrukcja globalnej relacji przewyższania wymaga dokonania porównań każdej pary akcji pod kątem każdego kryterium. Wynik tego działania ma postać globalnego schematu przewyższania i służy sporządzeniu rezultatu końcowego w postaci określenia wariantu preferowanego lub sporządzenia rankingu wszystkich wariantów. Determinacja relacji przewyższania pomiędzy wariantami decyzyjnymi wiąże się z uwzględnieniem współczynników korygujących osąd. Czynnikiem takim są następujące progi [42]:

— próg preferencji, określający minimalną różnicę wartości kryterium wystarczającą do potwierdzenia preferencji jednego z wariantów;
— próg nierozróżnialności, określający maksymalną różnicę wartości kryterium, dla których wartości uznawane są za nierozróżnialne;
— wartości pośrednie pomiędzy wyżej wymienionymi progami, oznaczają zakres wahania pomiędzy nierozróżnialnością a preferencją;
— próg weta, określający minimalną różnicę, dla której twierdzenie o preferencji danego wariantu nad innym jest odrzucane.

Wymienione powyżej progi mogą być określone w postaci wartości liczbowych lub w postaci współczynników liniowej funkcji wartości parametru. Wartości progów określane są przez decydenta przy udziale analityka. Istnieją również opracowania próbujące zdefiniować schemat określania tych wartości [125, 108].

Wektor funkcji wydajności G, będący zbiorem funkcji przekształcających wartości atrybutów wariantów decyzyjnych na wartości wydajności kryteriów, stanowi podstawowy determinant poszukiwania wariantów decyzyjnych. W niniejszej rozprawie przyjęto, że środowisko rozproszone dostarcza opisy wariantów decyzyjnych w postaci zgodnej ze zdefiniowanymi skalami wartości atrybutów. Należy jednak zaznaczyć, że konstrukcja algorytmu umożliwia pozyskiwanie danych drogą ekstrakcji i przy pomocy metod „data

mining". Zaimplementowanie słowników meta-danych pozwoli na wyszukiwanie danych niezależnie od konwencji nazewniczej, zastosowanej przez podmioty udostępniające opisy przedmiotów, lub od akcji stanowiących warianty decyzyjne.

Specyfikacja funkcji kryterialnej polega na określeniu przez decydenta kształtu preferencji jako funkcji matematycznej, zależnej od wartości atrybutu odpowiadającego danemu kryterium. Wyrażenie funkcji g dla wszystkich kryteriów oraz dziedzin wartości atrybutów uwzględnianych w procesie decyzyjnym (D_i) umożliwia konstrukcję zbioru C, zgodnie ze wzorem (4.2), i stanowi pierwszy etap procesu decyzyjnego przedstawionego na rysunku 4.2.

Zaprezentowane podejście pozwala na przeprowadzenie procesu wspomagania decyzji, dysponując wiedzą dotyczącą jedynie sytuacji decyzyjnej i jej otoczenia (kontekst). Nie jest wymagana od decydenta wiedza na temat istniejących metod MCDA i narzędzi wspomagających decyzje. Dobór metody dokonywany jest na podstawie opisu sytuacji decyzyjnej, zgodnie z wiedzą zawartą w bazie wiedzy algorytmu. Istotnym elementem opisu sytuacji decyzyjnej jest meta-informacja zawarta w zbiorze K. Zawartość zbioru K pozwala na wykorzystanie doświadczenia z prac naukowych, przeanalizowanych w celu budowy bazy wiedzy na potrzeby zaproponowanego algorytmu.

Taka konstrukcja algorytmu pozwala na wyodrębnienie faz, wymagających interakcji decydenta, z całości procesu decyzyjnego. Działanie takie umożliwia wykorzystanie bazy wiedzy, zamiast kolejnych konsultacji z decydentem lub analitykiem w trakcie procesu decyzyjnego – tworząc w ten sposób zautomatyzowany przebieg procesu. Jest to zgodne z celem rozprawy, **którym jest opracowanie autonomicznego algorytmu dla agenta programowego wspomagającego podejmowanie decyzji**.

4.8. Rozwiązanie złożonego problemu wyboru przy pomocy utworzonego algorytmu

Zasadniczym elementem wyboru najlepszego wariantu decyzyjnego jest ustalenie wzajemnej relacji pomiędzy dostępnymi wariantami. W zależności od wybranej metody przyjąć należy następujące założenie:

— podejście oparte na relacji przewyższania polega na ustaleniu wzajemnej relacji zgodności [42]:

  zgodność relacji aSb gdy *wystarczająca* liczba kryteriów (koalicja) wspiera to twierdzenie

  nie-zgodność (brak zgodności) silna opozycja mniejszości kryterium do twierdzenia aSb

  W ten sposób ustalana jest wzajemna relacja pomiędzy wszystkimi parami alternatyw dla rozważanej sytuacji decyzyjnej.

Struktura kryteriów problemu decyzyjnego jest podstawą dla konstrukcji struktury poszukiwanych wariantów decyzyjnych. Poszukiwanie wariantów decyzyjnych jest fazą nienadzorowaną algorytmu, stąd możliwe jest wykonanie działań tej fazy przez autonomicznego agenta programowego. W podejściu autonomicznym agent programowy dokonuje przeszukania dostępnego środowiska informatycznego (w tym odległych źródeł danych) w poszukiwaniu opisów, zgodnie ze strukturą poszukiwanych wariantów. Elementy spełniające wymagania zadanej struktury stanowią elementy zbioru wariantów decyzyjnych A. Przedstawienie problemu decyzyjnego w postaci sformalizowanej pozwala

na wyszukanie wariantów decyzyjnych, które są możliwe do implementacji. Proces przeszukiwania przestrzeni decyzyjnej (przestrzeni opisów wariantów decyzyjnych) jest czynnością czasochłonną. Długi czas przeszukiwania wynika z rozproszenia źródeł danych. Oszacowanie czasu potrzebnego na przeszukanie rozproszonych zasobów informacyjnych jest niezwykle trudne. Z tego powodu wynika konieczność ponawianych konsultacji z analitykiem, co prowadzi do znacznego wydłużenia procesu decyzyjnego. W przypadku zaproponowanego algorytmu wnioskowanie przebiega bez cyklu oczekiwania, gdyż w konstrukcji autonomicznej moduł wnioskujący uruchomiony jest natychmiast po wypełnieniu zbioru rozważanych wariantów decyzyjnych.

Dla zbioru wariantów decyzyjnych A konstruowana jest macierz decyzyjna na podstawie kształtów funkcji G dla poszczególnych kryteriów. W przypadku, gdy $G = \varnothing$, do macierzy decyzyjnej zapisywane są wartości odpowiednich atrybutów wariantów decyzyjnych. Skonstruowana macierz decyzyjna zapisana jest w postaci zgodnej ze wzorem (4.72).

$$\begin{array}{c|cccc} A, G & g_1 & g_2 & \dots & g_n \\ \hline a_1 & g_1(a_1) & g_2(a_1) & \dots & g_n(a_1) \\ a_2 & g_1(a_2) & g_2(a_2) & \dots & g_n(a_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_m & g_1(a_m) & g_2(a_m) & \dots & g_n(a_m) \end{array} \tag{4.72}$$

Konstrukcja macierzy decyzyjnej uwzględnia progi „miękkiego" i „ostrego" ograniczenia preferencji, zgodnie ze wzorem (4.17). Specyfikacja tych progów przez decydenta ma na celu uwzględnienie zakresu wartości obojętnych dla decydenta (tak samo niepreferowanych, jak wartość najgorsza, i tak samo preferowanych, jak wartość najlepsza). Wartości te umożliwiają zastosowanie metod opartych o badanie dystansu do rozwiązania idealnego, w przypadku danych nie poddanych normalizacji.

Wynikowa macierz wydajności, przedstawiona we wzorze (4.72), stanowi argument wejściowy przekształcenia (4.11), gdzie $F \in \Psi''$ jest przekształceniem wielokryterialnym o najwyższym stopniu dopasowania do problemu decyzyjnego.

W zależności od dobranego przekształcenia, obliczenia przebiegają w sposób przedstawiony poniżej.

Jeżeli $F = A_H$, model zgodny ze wzorem (4.42) rozwiązany jest przy pomocy metody AHP, zgodnie z definicją metody przedstawioną w pracach [130, 129].

Jeżeli $F = T_P$, model zgodny ze wzorem (4.43) rozwiązany jest przy pomocy metody TOPSIS, zgodnie z definicją metody przedstawioną w pracy [144].

Jeżeli $F = E_3$, model zgodny ze wzorem (4.44) rozwiązany jest przy pomocy metody ELECTRE III, zgodnie z definicją metody przedstawioną w pracach [10, 42].

Jeżeli $F = P_T$, model zgodny ze wzorami (4.45) i (4.46) rozwiązany jest przy pomocy metody PROMETHEE I/II, zgodnie z definicją metod przedstawioną w pracach [113, 14, 12].

Jeżeli $F = fP_T$, model zgodny ze wzorem (4.47) rozwiązany jest przy pomocy metody Fuzzy PROMETHEE, zgodnie z definicją metody przedstawioną w pracach [48, 45].

Jeżeli $F = fT_P$, model zgodny ze wzorem (4.48) rozwiązany jest przy pomocy metody Fuzzy TOPSIS, zgodnie z definicją metody przedstawioną w pracy [144].

Jeżeli $F = fK_O$, model zgodny ze wzorem (4.49) rozwiązany jest przy pomocy metody Fuzzy Kuo, zgodnie z definicją metody przedstawioną w pracy [76].

Wynikiem obliczeń jest rekomendacja w postaci uporządkowanego rankingu wariantów decyzyjnych („rezultat wspomagania") oraz informacji towarzyszącej, na którą składają się elementy wartościujące poszczególne elementy rankingu (takie, jak dystanse dla metod opartych o odległość od punktów idealnych, przepływy dla metod PROMETHEE, lub graf przewyższania, dla ELECTRE III). Dodatkowa informacja procesu decyzyjnego jest wymagana do konstrukcji rekomendacji, która może dla pewnych przypadków uzależnić konkretne pozycje rankingu od postrzegania przez decydenta wprowadzonych wartości przybliżonych.

Istnieje możliwość, że w trakcie przeszukiwania przestrzeni poszukiwań zostanie znaleziony wariant o wartościach równych rozwiązaniu idealnemu; w takiej sytuacji poszukiwania można uznać za zakończone. Sytuacja taka możliwa jest w przypadku proponowanego algorytmu w sytuacji, gdy dla wszystkich kryteriów zostały określone ograniczenia na wartość atrybutów lub na wzrost preferencji.

Dokładne przedstawienie procesu wspomagania decyzji, zgodnie z algorytmem przedstawionym w niniejszym rozdziale, **zawarto w opisie agenta programowego wykorzystującego wymieniony algorytm**. Opis implementacji algorytmu w postaci autonomicznego agenta programowego przedstawia podrozdział 5.3.

4.9. Interpretacja rozwiązania

Rekomendacja dostarczona przez metodę wielokryterialną jest ściśle uzależniona od dobranej metody. Prezentacja rekomendacji jest rezultatem definicji schematu eksploatacji. Zakres podejść obejmuje porównywanie wartości użyteczności, wybór przewyższającej większości poprzez zliczanie relacji, identyfikację rdzeni przewyższania, ważone zliczanie relacji i sumę punktacji relacji [11].

Rozwiązanie problemu decyzyjnego składa się z dwóch wyróżnionych elementów. Pierwszym elementem jest zasadniczy ranking wariantów decyzyjnych według stopnia spełnienia oczekiwań decydenta. Otrzymany wariant stanowi rekomendację dla decydenta, co jest oczekiwanym rezultatem problemów rankingu γ.

Ranking służy wskazaniu decydentowi wariantu, którego implementacja najlepiej spełni jego oczekiwania – bazując na dostarczonej przez niego informacji definiującej sytuację decyzyjną, a także na podstawie doświadczenia zebranego w bazie wiedzy wykorzystanej przy procesie wspomagania.

W zależności od zastosowanej metody, wynik może stanowić porządek częściowy lub całkowity, tak więc ostatnim zadaniem agenta jest dokonanie uporządkowania wyników. W przypadku metod dostarczających punktowane wyniki relacji, takie jak przepływy lub odległości od punktu idealnego, układ rankingu jest wynikiem uporządkowania wartości relacji zgodnie z ich znaczeniem. Odnośnie bliskości od rozwiązania idealnego uporządkowanie będzie przebiegało od wartości najmniejszej (pozycja pierwsza w rankingu) do największej. W przypadku przepływów netto natomiast uporządkowanie przebiega od największej wartości (pozycja pierwsza w rankingu) do najmniejszej.

Zgodnie z obraną tematyką ZWPW, celem wspomagania jest **wybór** najlepszego wariantu (problematyka α), stąd wskazywany jest wariant zajmujący pierwszą pozycję w rankingu.

Natomiast porządkowanie (γ), to przypisanie „rzędu klasyfikacji" każdemu z wariantów ze zbioru A. Stąd tworzony jest szereg wzajemnie uporządkowanych (w postaci porządku zupełnego lub częściowego) klas. Porządek zupełny jednakże może być mało znaczący i nieużyteczny, stąd przyjęte w algorytmie założenie wyłącznie wyboru najlepszego wariantu [126, s. 72]

W związku z powyższym, wynikiem działanie agenta jest rozwiązanie spełniające równanie ze wzoru (4.11), gdzie reguły decyzyjne zapewniają taki dobór przekształcenia F, że uzyskane spełnienie kryteriów decydenta będzie maksymalne względem kolekcji metod wielokryterialnych Ψ'.

Zaistnienie sytuacji decyzyjnej oznacza, że nastąpiła konieczność wyboru jednego scenariusza (lub kilku) spośród większego zbioru. Rozpatrywany w niniejszej rozprawie zakres obejmuje sytuacje decyzyjne klasy ZWPW, a więc takie, gdzie należy wybrać jeden scenariusz (przedmiot, akcję, projekt, technologię) spośród dyskretnego zbioru scenariuszy. Co więcej, wybór dokonywany jest na potrzeby określonej organizacji (i w jej ramach), stąd oparty jest o pewne stałe schematy zachowań.

Celem algorytmu jest wykorzystanie wiedzy o zachowaniu organizacji do zautomatyzowania przebiegu procesu decyzyjnego. Rozproszenie źródeł decyzyjnych jest głównym argumentem przemawiającym za potrzebą automatyzacji procesu. Przeszukiwanie wielu źródeł w poszukiwaniu opisu wariantów decyzyjnych jest czynnością czasochłonną i żmudną. Również problematyczne jest oszacowanie czasu trwania takiej operacji. Stąd, przy wykorzystaniu standardowego podejścia decyzyjnego, gdzie metoda dobierana jest po zakończeniu fazy analizy decyzyjnej, decydent ma dwie możliwości:

— oczekiwać na sygnał zakończenia kompletowania zbioru wariantów decyzyjnych i dokonać (wspólnie z analitykiem) doboru metody wielokryterialnej,
— ustalić „a priori" moment, w którym dokona doboru metody wraz z analitykiem, przerywając w ten sposób kompletowanie zbioru wariantów decyzyjnych (i godząc się w ten sposób na wykluczenie nieznanych wariantów).

Pierwsze podejście jest kosztowne i niekorzystne ze względu na wagę aspektu czasu w decyzjach ekonomicznych. Podejście drugie natomiast może wykluczyć pewne warianty o znacznym wpływie na działanie organizacji (definicja ZWPW w podrozdziale 1). Z tego względu zaproponowany algorytm, który pozwala na automatyczny dobór metody i dostarczenie decydentowi rekomendacji bez oczekiwania na powtórną współpracę analityka, **stanowi wkład do zwiększenia efektywności organizacji poprzez szybsze podejmowanie decyzji**.

Drzewa decyzyjne odkryte w ramach badań przeprowadzonych zgodnie ze schematem 4.4, stanowiły źródło budowy bazy wiedzy doboru metody wielokryterialnej, bazując na kontekście sytuacji decyzyjnej. Przedstawiony schemat postępowania stanowi rdzeń budowy narzędzi wspomagających proces podejmowania decyzji z różnych dziedzin. **Cechą charakterystyczną zaproponowanego rozwiązania jest autonomiczny dobór metody obliczania preferencji wariantów decyzyjnych** (metody wielokryterialnej). Autonomia algorytmu obejmuje również poszukiwanie wariantów decyzyjnych $\tilde{A}$, i wyznaczenie kompletnego zasobu informacyjnego definiującego problem decyzyjny.

Wyodrębnienie faz interaktywnych i autonomicznych algorytmu jest podyktowane koniecznością implementacji rozwiązania w postaci agenta progra-

mowego. Pozwala to na zwiększenie wygody ze stosowania komputerowego wspomagania decyzji, a także skrócenie czasu podejmowania decyzji. Efektywna implementacja skróci nie tylko czas od definicji problemu decyzyjnego do pozyskania rekomendacji, ale również zmniejszy pracochłonność procesu.

5. Implementacja zaproponowanego algorytmu

Cechą charakterystyczną ZWPW (Złożonych Wielokryterialnych Problemów Wyboru) zdefiniowanych w rozdziale 1 jest wielość źródeł opisów wariantów decyzyjnych. Konieczność przeszukania wielu źródeł wiąże się z czasochłonnym procesem zbierania danych w celu sporządzenia opisów wariantów decyzyjnych. Co więcej, zebranie opisów wariantów decyzyjnych kończy jedynie proces konstrukcji definicji problemu decyzyjnego, po którym następuje etap analizy i doboru metody wielokryterialnej. W praktyce oznacza to konieczność kolejnej interakcji z decydentem w celu wyboru metody wielokryterialnej najlepiej dopasowanej do analizowanej sytuacji decyzyjnej.

Algorytm zaprezentowany w rozdziale 4 pozwala na autonomiczne przeprowadzenie procesu decyzyjnego. Celem konstrukcji algorytmu było uzyskanie procedury niewymagającej interakcji decydenta po sporządzeniu definicji parametrów opisujących sytuację decyzyjną.

Stąd, wykorzystanie zalet wymienionego algorytmu wymaga dokonania jego implementacji w postaci oprogramowania komputerowego możliwego do wykorzystania przez decydenta. Implementacja algorytmu powinna uwzględnić bezinterakcyjny schemat działania algorytmu, a także umożliwić wykorzystanie algorytmu w warunkach, w których użytkownik odniesie największe korzyści z jego wykorzystania. Zgodnie z problemem wprowadzonym w podrozdziale 1.4, oprogramowanie powinno umożliwiać pozyskiwanie danych z rozproszonych źródeł wariantów decyzyjnych. Umożliwi to decydentowi zautomatyzowanie najbardziej czasochłonnej, i często o niemożliwym do oszacowania czasie wykonania, fazy procesu decyzyjnego.

Zadania oprogramowania wspomagającego decydenta w rozwiązywaniu ZWPW wynikają z zadań objętych procesem decyzyjnym. Cechą charakterystyczną podejścia zaproponowanego w rozprawie jest przeniesienie wybranych działań do fazy autonomicznej narzędzia wspomagającego. Oprogramowanie wykorzystujące algorytm zaproponowany w rozprawie do wspomagania decyzji ma zadanie wykonać następujące grupy czynności:

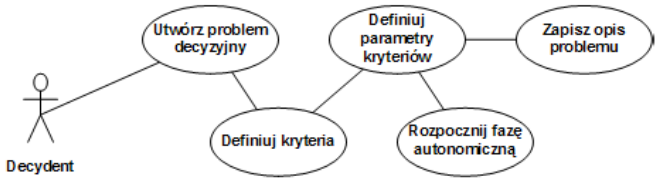
1. pobranie od decydenta definicji problemu decyzyjnego,
2. wyszukanie wariantów decyzyjnych w dostępnych źródłach danych,
3. dobranie najlepiej dopasowanego przekształcenia wielokryterialnego,
4. konstrukcja modelu decyzyjnego,
5. rozwiązanie modelu decyzyjnego,
6. przekazanie rekomendacji decydentowi.

Wobec przedstawionego schematu funkcjonowania, za środowisko implementacji dla proponowanego algorytmu przyjęto agentowy model oprogramowania. Zidentyfikowano następujące dwie grupy czynności wykonywanych przez decydenta:

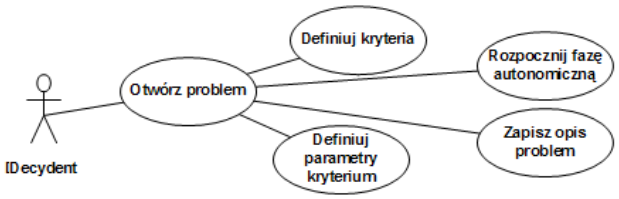
— czynności fazy interaktywnej,
— czynności fazy autonomicznej.

W związku z powyższym podziałem, czynności fazy interaktywnej polegają na zdefiniowaniu problemu decyzyjnego do rozwiązania w trakcie fazy autonomicznej. Zadanie utworzenia nowego problemu decyzyjnego jest zadaniem nastawczym i realizowane jest przez program interfejsu użytkownika przygotowującego plik nastawczy problemu decyzyjnego. Program interfejsu funkcjonuje w środowisku operacyjnym użytkownika i pozwala na utworzenie lub edycję problemów decyzyjnych, określanie ich struktury, definiowanie kryteriów i informacji kryterialnej, a także wyrażenie opisu sytuacji decyzyjnej w warstwie meta-danych Φ. Opis problemu decyzyjnego stanowi dane wejściowe do wygenerowania pliku nastawczego problemu decyzyjnego. Diagram przypadków użycia programu dla scenariusza definicji nowego problemu decyzyjnego przedstawia rysunek 5.1a.

Funkcje interfejsu użytkownika zawierają również odczyt i edycję parametrów problemów decyzyjnych zdefiniowanych w trakcie wcześniejszych interakcji z programem. Sytuacja tego typu uwzględniona została w scenariuszu edycji istniejącego problemu decyzyjnego i przedstawiona jest na rysunku 5.1b. Operacja „Rozpocznij fazę autonomiczną" oznacza inicjalizację algorytmu w fazie autonomicznej, która zostaje zakończona po przeszukaniu całej przestrzeni poszukiwań i sporządzeniu rekomendacji dla decydenta (rysunek 5.1c).



(a) Definicja nowego problemu decyzyjnego



(b) Edycja istniejącego problemu decyzyjnego

(c) Pozyskanie rekomendacji

Rysunek 5.1: Diagramy przypadków użycia agenta programowego

Źródło: Opracowanie własne

Bezinterakcyjny schemat działania jest działaniem charakterystycznym dla agentów programowych. W związku z tym implementacja oparta na technologii agentów programowych jest najtrafniejszym podejściem do budowy narzędzia wspomagającego decydenta, zgodnie z algorytmem przedstawionym w niniejszej rozprawie. W kolejnych podrozdziałach bieżącego rozdziału przedstawiono implementację agenta programowego rozwiązującego Złożony Wielokryterialny Problem Wyboru.

5.1. Paradygmat agenta programowego

Badania nad teorią agentów prowadzone w obszarze informatyki poruszają wiele dziedzin nie związanych bezpośrednio z techniką komputerową. Wynika stąd pewna nieprecyzyjność i interdyscyplinarność przedstawianych definicji agenta. Spośród dostępnych w

literaturze wielu interpretacji pojęcia „agent", wybrano następujące, jako tworzące spójny obraz terminu, tak jak zostało to przyjęte w pracy [43][1]:

— *„(..) postrzegający otoczenie przy pomocy sensorów i reagujący na bodźce otoczenia poprzez efektory."*
— *„Agent autonomiczny, to system liczący funkcjonujący w pewnym złożonym środowisku, dokonujący samodzielnego odkrywania stanów tego otoczenia i wykonujący działania prowadzące do wypełnienia wiązki celów lub zadań, do wypełnienia których został zaprojektowany."*
— *„Inteligentny agent pełni w sposób nieprzerwany trzy funkcje: percepcja dynamicznych parametrów otoczenia, wykonywanie akcji wpływających na parametry otoczenia, i wnioskowanie służące interpretacji odczytów, rozwiązywaniu problemów, wykrywaniu zależności i określaniu akcji."*
— *„Inteligentni agenci to programy, które wykonują pewne operacje w imieniu ich użytkowników lub innych programów, przy pewnym stopniu swobody lub autonomii, stosując przy tym pewien zasób wiedzy lub reprezentację celów lub żądań użytkownika."*
— *„Agent autonomiczny to system usytuowany w części otoczenia, odczuwający otoczenie i działający na nie w sposób pozwalający na realizację własnych celów, i w efekcie na odniesienie wpływu na przyszłe odczyty z otoczenia."*
— *„Autonomiczny agent jest systemem zdolnym do autonomicznych i celowych akcji w świecie rzeczywistym."*

Na podstawie przedstawionych powyżej definicji określa się następujące składowe agenta autonomicznego:

— otoczenie,
— zdolność percepcji,
— akcje,
— cele,
— sposób wyboru akcji.

Stąd, działanie agenta można przedstawić jako składową A zbioru $T \subseteq \{A, P\}$ systemu dynamicznego przedstawionego we wzorze (5.1) w otoczeniu E, gdzie X jest przestrzenią wszystkich możliwych stanów otoczenia E, a T jest wymiarem globalnym zmieniającym stan otoczenia E. Przestrzeń stanów X może być przestrzenią wektorową lub formą nieciągłą, jak na przykład drzewo stanów. Stan T może być uzależniony zarówno od momentów czasu lub być funkcją ciągłą czasu, przy czym zależność może być liniowa lub stochastyczna. Zmiany stanów otoczenia E są wywoływane również przez akcje agenta, jako że agent jest również składową swojego otoczenia. Wymagane jest zadanie stanu początkowego $E(0)$ (inicjalizacja agenta), a następnie $E(t)$ jest stanem otoczenia w chwili t [43].

$$T : X \rightarrow X \tag{5.1}$$

Agent programowy może zostać zdefiniowany jako wysoce autonomiczna, proaktywna, zlokalizowana i ukierunkowana jednostka oprogramowania. Rozwijając definicję o mobilnego agenta autonomicznego, należy dodać jego mobilność i zdolność do samodzielnego stawiania sobie celów. W kontekście niniejszej pracy istotne jest rozróżnienie agenta „reaktywnego", którego działanie skupione jest na odpowiedzi na określone bodźce, od agenta „proaktywnego", który działa niezależnie od zewnętrznego pobudzenia [57, s. 2-3].

[1] tłumaczenie własne

Paradygmat agentów programowych określa podejście do obliczeń, gdzie mobilny kod wykonywany jest w różnych systemach. Cztery podstawowe cechy agenta programowego wyróżnione zostały w pracy [148]:

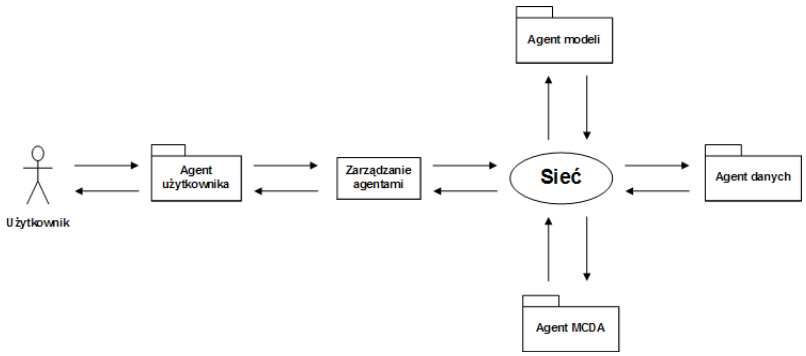
— inteligencja – zdolność do dostosowania się do zmiennego środowiska pracy,
— współpraca – zdolność do negocjacji i współdzielenia informacji z innymi agentami,
— autonomia – wykonywanie określonych zadań bez interakcji użytkownika,
— mobilność – zdolność do przechodzenia pomiędzy różnymi systemami komputerowymi.

Agenci programowi zostali zastosowani w wielu obszarach, które skupiają się wokół aspektu gromadzenia i selekcji informacji oraz wspomagania decyzji. Zadania te wspomagają operacje handlu elektronicznego (e-commerce), w tym reklamę produktu, dopasowanie produktów do potrzeb klientów, negocjacje cenowe, dobór usług dodatkowych. Najpowszechniejszym zastosowaniem agenta programowego w środowisku Business-to-Customer (B2C) są tak zwane „shop bots" i „auction bots" [56].

Przegląd zastosowań agentów programowych obejmuje wiele dziedzin codziennego życia indywidualnych osób oraz funkcjonowanie grup społecznych i organizacji. Wspomaganie transakcji biznesowych przy pomocy agentów opracowane zostało dla wszystkich typów relacji pomiędzy przedsiębiorcami i konsumentami (relacje: B2B, B2C, C2C i C2B) [21]. Istnieją również rozwiązania wykorzystujące system wieloagentowy jako narzędzie wspomagania operacji wewnątrz organizacji, takie jak agentowy system klasy ERP [79]

Zastosowanie agentów do wspomagania decyzji realizuje się poprzez stosowanie zarówno pojedynczego agenta poszukującego zadanego rozwiązania (agenci typu „shop bot" [141], osobiści asystenci [120]), jak i systemu wieloagentowego, gdzie każda funkcjonalność systemu klasy DSS realizowana jest przez właściwego agenta [58, 34].

Koncepcją agentowego systemu wspomagającego decyzje przyjętą w niniejszej pracy jest koncepcja opracowana na podstawie założeń przedstawionych w pracach [120, 34], gdzie tworzenie właściwego modelu decyzyjnego (systemu wspomagania, agenta wspomagającego) dokonywane jest przy pomocy trzech klas agentów. Przedstawiona na rys. 5.2 konstrukcja oparta jest o trzech agentów: agent modeli decyzyjnych (zbiory C, Φ), agent danych wyszukujący opisy wariantów decyzyjnych (zbiór A), agent MCDA obliczający rozwiązanie modelu decyzyjnego (styl decyzji, zbiór Ψ).



Rysunek 5.2: Tworzenie systemów DSS opartych o agentów programowych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [34]

Tak więc agent programowy, pełniący funkcję „*agencji* nieruchomości" i wspomagający przedsiębiorstwo w poszukiwaniu najlepszej lokalizacji, powinien wykonać następującą grupę zadań:

1. identyfikacja potrzeb organizacji,
2. opracowanie struktury parametrów poszukiwania nowej lokalizacji,
3. analiza dostępnych lokalizacji (przeszukanie wszystkich dostępnych źródeł danych),
4. dokonanie rankingu dopuszczalnych lokalizacji (warianty potencjalne – za Roy [126]),
5. sporządzenie rekomendacji dla decydenta.

Na realizację zadania pierwszego składa się przede wszystkim zebranie oczekiwań od decydenta (menedżer lub grupa menedżerów) w przedsiębiorstwie. Oczekiwania związane są z charakterem planowanej inwestycji, ze strategią organizacji i możliwymi (antycypowanymi) zmianami w otoczeniu. Drugie zadanie polega na przełożeniu oczekiwań organizacji (klienta) na dostępne parametry opisu lokalizacji (takie, jak między innymi: parametry fizyczne, dane opisowe, statystyczne). W zadaniu trzecim należy pozyskać opisy największej możliwej liczby wariantów decyzyjnych (celem zwiększenia prawdopodobieństwa wyboru najlepszego). Poprzez lokalizacje dopuszczalne rozumie się takie, które spełniają wymagania decydenta wyznaczone przez dziedziny wartości atrybutów (parametrów). Kolejnym zadaniem jest uporządkowanie dostępnych lokalizacji według stopnia spełnienia oczekiwań decydenta. Ostatnim zadaniem jest przedstawienie decydentowi rekomendacji w postaci najlepszej lokalizacji (lub kilku najlepszych lokalizacji).

Środowiskiem funkcjonowania proponowanego agenta jest przestrzeń dostawców nieruchomości, którzy udostępniają opisy dostępnych lokalizacji. W ten sposób osiągnięty zostanie przedstawiony w [116] cel paradygmatu agentowego, jako efektywniejszego następcy paradygmatu klient-dostawca. Wzrost efektywności zapewniony zostanie poprzez dokonywanie obliczeń w tej samej lokalizacji, co źródło danych, co jest szczególnie istotne w problemach decyzyjnych opisanych znacznymi wolumenami danych (takich, jak dane geograficzne). Implementacja rozwiązań opartych o agentów programowych dokonujących obliczenia na danych przestrzennych może napotkać trudności, związane z brakiem wystarczających mocy obliczeniowych w lokalizacjach przechowujących dane. Jest to spowodowane faktem, że projekty takich systemów są nakierowane na efektywne przechowywanie i udostępnianie danych, a nie na dostarczenie mocy obliczeniowej algorytmom decyzyjnym.

Zbyt wysoki stopień autonomii przyznany agentowi ze swoim własnym zestawem reguł może prowadzić do dokonania (i implementacji) przez agenta decyzji niepożądanych przez decydenta. Sytuacja taka może mieć miejsce, gdy zostaną aktywowane błędne reguły. Wystąpienie takiego zdarzenia jest bardzo prawdopodobne, gdyż ludzie nie kierują się jednym i spójnym schematem w swoich działaniach [17]

5.2. Agentowe systemy szkieletowe

Systemy szkieletowe pozwalają na wykorzystanie gotowej funkcjonalności agentowej dla dostarczonej logiki obliczeniowej. Przykładami gotowych platform agentowych są między innymi: Tryllian ADK [139], AKIRA (Artificial Knowledge Interface for Reasoning Applications) [9], AMETAS (Asynchronous MEssage Transfer Agent System) [154].

JADE (Java Agent DEvelopment Framework) [69] jest systemem warstwy pośredniej, zgodnym ze specyfikacją FIPA (opracowaną przez IEEE) [66], określającą standardy wymiany informacji w ramach infrastruktury agentowej oraz pomiędzy agentem a otoczeniem. System JADE bazuje na środowisku programistycznym i uruchomieniowym

Java, stąd zapewnia zgodność z większością stosowanych obecnie platform serwerowych. Również zadowalająca jest wydajność i skalowalność tej technologii [23]

Dostępne są również biblioteki funkcji rozszerzające możliwości systemów agentowych o obsługę ontologii (AgentOWL [77]), obsługę rozmytych regułowych baz wiedzy [84], a wykorzystanie komunikacji opartej o język XML pozwala na ustandaryzowanie interakcji pomiędzy agentami tworzonymi za pomocą różnych rozwiązań. Rolę standardu przejął język DAML (DARPA Agent Markup Language) [28].

Istotnym parametrem delegacji działań w warunkach konkurencji ekonomicznej jest wiarygodność agenta i gwarancja poufności. Dla przedsiębiorstwa istotne jest, aby konkurencja nie poznała jego zamiarów na etapie prac przygotowawczych w postaci podejmowania decyzji. Czynnik ten jest szczególnie istotny przy decyzjach podejmowanych na poziomie strategicznym. Powyższy problem adresowany jest przez protokół gwarantujący anonimowość, przedstawiony w [80] i zaimplementowany w postaci biblioteki do systemu JADE.

System AGLET [65] modeluje agenta mobilnego zgodnie z koncepcją apletów Java. Programista tworzący własne rozwiązanie na bazie AGLET przesłania metody szkieletowe własnymi metodami z pożądaną funkcjonalnością. Agent pracuje we własnym wątku w systemie, na którym jest uruchomiony. Spełnia również warunki reaktywności. Oparcie rozwiązania całkowicie na środowisku Java gwarantuje zgodność ze wszystkimi środowiskami obsługującymi tę technologię [116].

System szkieletowy ARA (Agent for Remote Action) [115] oparty jest o warstwę usługową wspierającą wiele języków poprzez interpretery. Celem twórców było uzyskanie rozwiązania pozwalającego na „mobilne programowanie". Przenosząc swój kod pomiędzy systemami agent ARA może korzystać zarówno z usług udostępnianych przez system hosta, jak i przez innych agentów [116].

Oparty o środowisko Java system Concordia [147] modelowany jest jako kolekcja obiektów. Agent utworzony przy pomocy Concordia korzysta z usług udostępnionych przez komponenty serwera. Agent posiada zarówno stany wewnętrzne, jak i zewnętrzne, co pozwala na zdefiniowanie różnych punktów startu agenta, w odróżnieniu od bezwarunkowego wykonania „po przemieszczeniu", mającego miejsce w przypadku innych systemów [116].

Projekt TACOMA [138] poświęcony był problemowi agentów i aspektowi wsparcia agentów przez systemy operacyjne. Skonstruowano agenta programowego pozwalającego na przejęcie wybranych funkcjonalności systemu operacyjnego. Zastosowania agenta oparto o architekturę brokerską [116, 70].

Bazujący na koncepcji kolekcji obiektów Java system Voyager [123] pozwala nie tylko na przenoszenie kodu agenta, ale także na przenoszenie obiektów. Oparty jest na architekturze własnego brokera zapytań i autorskiej technologii „Voyager Space", grupującej zdarzenia i komunikaty. System zapewnia skalowalność, a kwestia złożoności tworzonego rozwiązania pozostaje całkowicie w gestii użytkownika [116].

Wielość przedstawionych propozycji dopełnia system Internet Direct (Indy) [67], oparty o technologię .NET firmy Microsoft. Środowisko zostało opracowane przy użyciu języka Object Pascal, jednakże może być wykorzystywane w kodzie napidanym w jednym z następujących języków: C#, C++, Delphi, J# .NET, Visual Basic .NET i inny język zgodny z .NET. Przykład szkieletu wykonania agenta przedstawia fragment pseudokodu, pokazany poniżej [67]:

```
with AnIndyClient do
begin
Connect;
try
// ......Logika biznesowa
finally
Disconnect;
end;
end;
```

Funkcjonowanie agenta zbudowanego przy użyciu bibliotek Indy oparte jest o transmisję kodu poprzez otwarte porty TCP/IP w formie komunikatów.

5.3. Implementacja algorytmu za pomocą agentowego systemu szkieletowego

Pozyskanie definicji problemu decyzyjnego wymaga dokonania przyjaznej użytkownikowi interakcji w sposób pozwalający na wyrażenie pożądanych cech implementacji wariantu decyzyjnego. Cechy te powinny zostać zebrane w sposób umożliwiający ich bezpośrednie przełożenie na definicję problemu decyzyjnego, zgodnie ze wzorem (4.68), i wykorzystanie algorytmu przedstawionego w podrozdziałach 4.7 - 4.8.

Celem implementacji jest utworzenie agenta programowego wykonującego zadania przedstawione w podrozdziale 5. Poprzez wykonanie zadań rozumiane są następujące czynności:

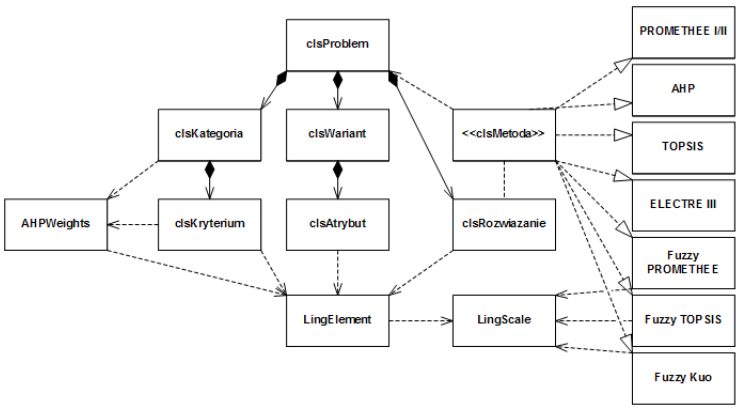
1. ułatwienie decydentowi dokonania definicji problemu decyzyjnego poprzez udostępnienie mu przyjaznego interfejsu,
2. wykonanie analizy problemu decyzyjnego w celu opracowania kryteriów wyszukiwania wariantów decyzyjnych,
3. autonomiczne wyszukanie wariantów decyzyjnych w wielu lokalizacjach,
4. przemieszczanie kodu do zdalnych lokalizacji,
5. dobór metody wielokryterialnej najlepiej dopasowanej do zadanego problemu,
6. rozwiązanie modelu decyzyjnego,
7. przedstawienie rekomendacji dla wprowadzonego problemu decyzyjnego.

Przy czym działania 2–4 wykonane są bez interakcji decydenta. Stąd należy wypełnić następujące warunki projektowe, aby implementacja w formie agenta programowego odniosła oczekiwane skutki i spełniła cel niniejszej rozprawy:

— komunikacja z wieloma lokalizacjami w celu analizy zasobów informacyjnych,
— autonomiczna ocena opisów akcji w celu zakwalifikowania do zbioru wariantów potencjalnych,
— autonomiczny dobór metody wielokryterialnej na podstawie opisu kontekstu i kryteriów sytuacji decyzyjnej,
— implementacja algorytmów obliczeniowych wszystkich metod wielokryterialnych uwzględnionych przy doborze.

5.3.1. Obrane podejście implementacji

W ramach niniejszej rozprawy wykonano oprogramowanie wspomagające podejmowanie decyzji w postaci symulowanego środowiska agentowego. Agent programowy stworzony został przy użyciu technologii C#. Implementację wykonano wykorzystując środowisko programistyczne Microsoft Visual Studio 2005 i biblioteki wykonawcze Microsoft .NET Framework w wersjach 2.0 i 3.0. Pokazany na rysunku 5.3 diagram klas przedstawia podstawowe funkcjonalności agenta. Szczegółowy diagram klas wraz z listą metod i właściwości zaprezentowany został na rysunku D.2 w załączniku D. Obiekty dla problemu (klasa **clsProblem**), kategorii kryteriów (klasa **clsKategoria**) i kryteriów (klasa **clsKryterium**) tworzone są na podstawie pliku konfiguracyjnego wygenerowanego przez program nastawczy. Specyfikacje sytuacji decyzyjnych przechowywane są w bazie danych pracującej pod kontrolą SZDB Microsoft SQL Server 2005. Model danych przedstawia rysunek D.1 w załączniku D.



Rysunek 5.3: Diagram klas agenta programowego

Źródło: Opracowanie własne

Wymagania dla agenta programowego zawierają możliwość autonomicznego rozwiązania problemu decyzyjnego na podstawie definicji zadanej przez decydenta. Agent programowy pozwoli więc na samodzielne przeprowadzenie całego procesu decyzyjnego od nastawienia parametrów modelu (na podstawie zdefiniowanej sytuacji decyzyjnej) do przekazania wyników do odczytu (prezentacja rekomendacji).

Podstawowe funkcje agenta wypełniane są przez klasy opisane w dalszej części rozdziału. Klasa clsProblem zawiera dane o problemie decyzyjnym zdefiniowanym przez decydenta. Obiekt klasy clsProblem zawiera obiekty z kategoriami kryteriów (clsCategory), które z kolei zawierają definicje kryteriów (clsCriterion). Obiekty tworzone są w przestrzeni oadresowej agenta na podstawie informacji odczytanych z bazy danych (dostęp ADO.NET).

Definicja problemu decyzyjnego zawiera zdefiniowany podzbiór atrybutów, zgodnie z tym przedstawionym w tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Zmienne definiujące problem decyzyjny

Zmienna	Składowa zmiennej	Typ danych	Opis
	parent_id	Int	Identyfikator nadrzędnej kategorii

Tabela 5.1: Zmienne definiujące problem decyzyjny

Zmienna	Składowa zmiennej	Typ danych	Opis
	name	Text	Nazwa kategorii
g		Text	Równanie funkcji wydajności, które jest interpretowane przez moduł obliczeniowy wybranej metody wielokryetrialnej. Równanie określone jest jako funkcja zmiennej x - wartości rozważanego parametru dla danego wariantu decyzyjnego.
d		Bool	Prawda – kryterium maksymalizowane, Fałsz – kryterium minimalizowane
w	Bezwzględna	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Cztery wartości rzeczywiste definiujące trapezoidalny zbiór rozmyty (na wymienionych wartościach może zostać zamodelowany również zbiór trójkątny lub wartość ostra). Ostatnia wartość to identyfikator słownika etykiet lingwistycznych opisanych na danych zbiorach rozmytych. Pole określa bezwzględną ważność kryterium.
	Względna	Wektor AHP	Wektor względnych wag AHP.
p	α	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Współczynnik liniowy progu preferencji p.
	β	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Wyraz wolny progu preferencji p.
q	α	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Współczynnik liniowy progu nierozróżnialności q.
	β	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Wyraz wolny progu nierozróżnialności q.
v	α	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Współczynnik liniowy progu weta v.
	β	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Wyraz wolny progu weta v.
a^*		$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Dolny próg ograniczenia akceptowalności dla wartości atrybutów.
a^{**}		$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Górny próg ograniczenia akceptowalności dla wartości atrybutów.
a^-	Value	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Dolny próg ograniczenia preferencji dla wartości atrybutów.
	Is_soft	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Prawda – ograniczenie miękkie, Fałsz – ograniczenie twarde.
a^+	Value	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Górny próg ograniczenia akceptowalności dla wartości atrybutów.
	Is_soft	$(m_L, m_U, \alpha, \beta, dic_id)$	Prawda – ograniczenie miękkie, Fałsz – ograniczenie twarde.

Źródło: Opracowanie własne.

Agent pozwala na użycie zarówno wartości ostrych, jak i lingwistycznych, we wszystkich kategoriach wyrażanej informacji wartościowej. Możliwe jest podanie danych o wymaganiach (kryteria problemu decyzyjnego) z progami (preferencji, nierozróżnialności i weta), jako wartości lingwistycznych lub ostrych. Dla osiągnięcia największej korzyści z

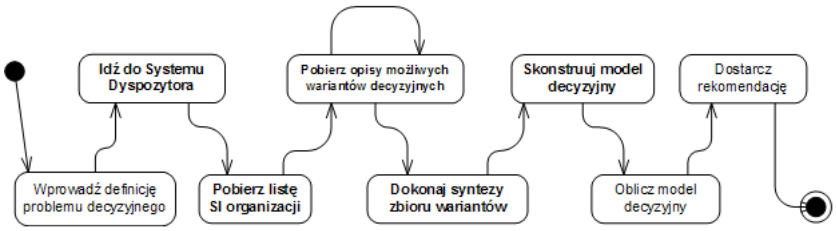
wykorzystania danych słownych, sugerowane jest określenie słowników lingwistycznych dla różnych domen określanych przez dane słowne. Agent wspiera wykorzystanie wielu słowników, gdzie etykiety określone są przy pomocy programu nastawiającego i przechowywane w bazie danych.

Sztandarową zaletą z zastosowania architektury agentowej jest zdolność programu do przenoszenia kodu wraz z danymi pomiędzy zdalnymi systemami hostującymi. Przeprowadzenie obliczeń w zdalnych lokalizacjach (na przykład serwery jednostek samorządowych zarządzających gruntami) optymalizuje wykorzystanie sieci informatycznej (ograniczenie przesyłanych danych do tych istotnych z punktu widzenia rozważanej decyzji), przyspiesza proces i zapewnia bezpieczeństwo i poufność danych. Na zmniejszenie użycia sieci transmisji dodatkowo wpływa „wycinanie" wariantów decyzyjnych nie spełniających „twardych" kryteriów problemu decyzyjnego.

Należy przy tym wspomnieć, że niektóre metody nie wykorzystują pełnego zakresu wprowadzonej przez decydenta informacji wejściowej. Dla przykładu, metoda TOPSIS nie uwzględnia progów weta, preferencji i nierozróżnialności. Stąd, badania powinny być kontynuowane w kierunku uwzględnienia całości informacji wprowadzonej przez decydenta w sposób pozwalający na jeszcze lepsze dopasowanie metody wielokryterialnej do zadanego problemu decyzyjnego. Badania powinny zostać również rozszerzone na analizę zysków i strat związanych z wykorzystania metody nieuwzględniającej pełnej informacji decyzyjnej. Również zbiór dostępnych metod wielokryterialnych powinien uwzględnić pełen zestaw metod stosowanych w sytuacjach o naturze zbliżonej do sytuacji, występujących najczęściej w organizacji, w której wdrażane jest rozwiązanie. Takie podejście pozwoli na dokonanie doboru metody na podstawie rzeczywistych przesłanek, w sposób nieobciążony ograniczeniami dostępnych narzędzi.

5.3.2. Opis funkcjonalny agenta

Głównym zadaniem agenta jest wspomaganie decydenta i przejęcie części jego zadań w autonomicznych etapach procesu decyzyjnego. Całkowite przejęcie zadań dostarcza szczególnie wyraźnych korzyści dla działań powtarzalnych i żmudnych, takich jak przeszukiwanie zdalnych źródeł danych w poszukiwaniu dostępnych terenów dla nowej jednostki. Realizacja przejść pomiędzy stanami fazy manualnej i autonomicznej przebiega zgodnie z cyklem życia agenta, przedstawionym na diagramie stanów na rysunku 5.4.



Rysunek 5.4: Diagram przepływu agenta programowego

Źródło: Opracowanie własne

Pierwszą akcją procesu decyzyjnego wspomaganego proponowanym agentem programowym jest utworzenie nowego obiektu problemu decyzyjnego. Obiekt problemu decyzyjnego zawiera pola opisowe przeznaczone na określenie nazwy i opisu identyfikujących problem.

Elementem charakteryzującym problem decyzyjny jest również definicja informacji kontekstowej, która obejmuje zarządzanie determinantami sytuacji decyzyjnej, a także określanie słowników możliwych wartości dla każdej z determinant. Ekran definicji słownika wartości dla determinanty środowiskowej K_1 przedstawia rysunek 5.5e.

W celu ułatwienia wprowadzania danych kryteria pogrupowano w kategorie określone przez decydenta, z tymże problem decyzyjny musi zawierać co najmniej jedną kategorię. Na etapie tworzenia problemu decyzyjnego dokonywane jest grupowanie kryteriów w kategorie (kategorie przykładowego problemu decyzyjnego przedstawia rysunek 5.5c). Natomiast na rysunku 5.5d przedstawiono definiowanie zbioru kryteriów wybranej kategorii.

Wykonany program pozwala na określenie sytuacji decyzyjnej w formie zbioru kryteriów, dla których określone są charakterystyki zgodnie z tabelą 4.1. Wartości te mogą być wartościami ostrymi lub lingwistycznymi, w zależności od charakteru danych wyrażonych przez decydenta. Ekran definicji kryterium przedstawiony został na rysunku 5.5b. Wprowadzanie danych lingwistycznych wykonywane jest przy pomocy kontrolki, jak przedstawione na rysunku 5.5f, odpowiednio dla wartości ostrych i rozmytych. Wprowadzenie wartości lingwistycznej wymaga określenia słownika, do którego nalezy wpisywana wartość. Zaimplementowane słowniki obejmują wprowadzanie wartości definiowanych przez funkcje przynależności, w postaci przytoczonej we wzorach: (3.4) i (3.5).

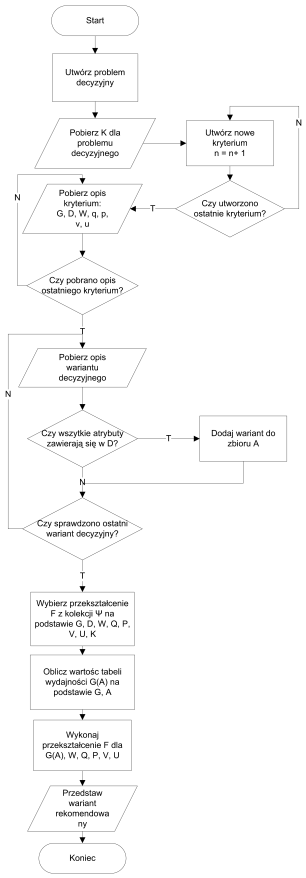
Zastosowanie architektury agentowej pozwala na przeniesienie kodu wraz z danymi o problemie decyzyjnym do zdalnej lokalizacji i wykonanie obliczeń w ramach systemu goszczącego (hosting system). Przenoszenie kodu umożliwia zmniejszenie ilości przesyłanych danych, zwłaszcza na linii decydent – źródła danych. Oszczędność wolumenu przesyłanych danych wynika z wyeliminowania konieczności przesyłu wszystkich akcji określonych kategorii, co miałoby miejsce w sytuacji, jeśli filtrowanie akcji do zbioru wariantów potencjalnych wykonywane byłoby przez oprogramowanie klienckie na lokalnym systemie decydenta.

Dopasowanie metody wielokryterialnej dokonywane jest przy pomocy reguł decyzyjnych zawartych w bazie wiedzy agenta. Treść reguł środowiskowych przedstawiono w załączniku C rozprawy. Kryteria wejściowe natomiast przedstawia tabela 4.7, umieszczona w rozdziale 4 rozprawy.

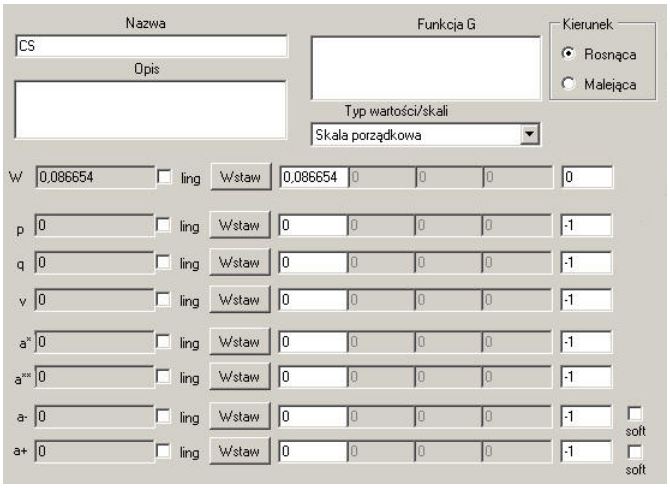
Rozwiązanie sytuacji decyzyjnej według zaproponowanego algorytmu przedstawiono poniżej. Zadaniem decydenta (i współpracującego z nim analityka) jest dokonanie formalizacji opisu zaistniałej sytuacji decyzyjnej na język struktury kryteriów i wartości ograniczających, a następnie wprowadzenie tych danych do programu nastawczego. Przebieg algorytmu wspomagania procesu decyzyjnego przedstawiono na rysunku 5.5a.

W dalszej części bieżącego podrozdziału dokonano szczegółowego opisu każdego kroku algorytmu przedstawionego na rysunku 5.5a.

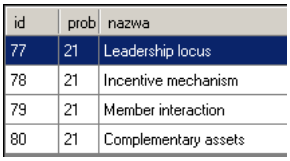
Utwórz problem decyzyjny — decydent tworzy nowy problem decyzyjny, odpowiadający sytuacji decyzyjnej, przed którą stanął decydent. Wspomaganie rozwiązania tego problemu jest celem wykonania algorytmu. Utworzenie problemu decyzyjnego powiązane jest z określeniem obszaru, którego dotyczy sytuacja decyzyjna, utworzeniem opisu w języku naturalnym i nakreśleniem ewentualnych ograniczeń. W kontekście zastosowania proponowanego systemu agentowego, sytuacja ta oznacza utworzenie obiektu klasy **Problem** dla wprowadzenia wartości definiujących problem decyzyjny, i nadanie utworzonemu obiektowi identyfikatora umożliwiającego decydentowi odwoływanie się do



(a) Algorytm rozwiązywania problemu decyzyjnego

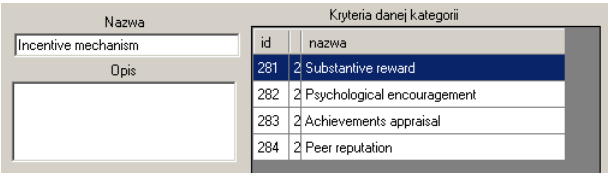


(b) Ekran definicji kryterium

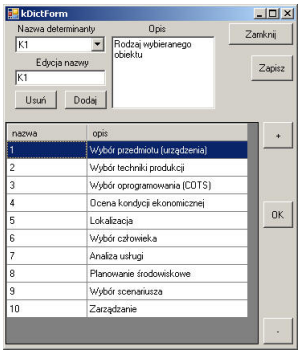


id	prob	nazwa
77	21	Leadership locus
78	21	Incentive mechanism
79	21	Member interaction
80	21	Complementary assets

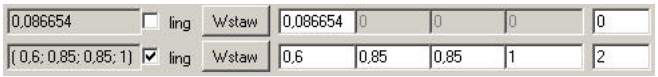
(c) Kategorie problemu decyzyjnego



(d) Wybór kryterium należącego do bieżącej kategorii



(e) Definicja słownika determinanty środowiskowej



(f) Kontrolka wprowadzania wartości – liczba ostra (wyżej) i rozmyta (niżej)

Rysunek 5.5: Schemat procesu rozwiązywania problemu decyzyjnego i ekrany aplikacji nastawczej agenta

Źródło: Opracowanie własne

tego problemu (do pliku danych).

Pobierz informację K dla bieżącego problemu decyzyjnego — decydent określa wartości parametrów opisujących dziedzinę rzeczywistości, w której zawiera się modelowana sytuacja decyzyjna.

Dopóki (bieżące kryterium nie jest ostatnie) — kolejna operacja będzie wykonywana iteracyjnie, dopóki decydent nie zdefiniuje ostatniego kryterium składającego się na sytuację decyzyjną. Decydent definiuje kolejne kryteria sytuacji decyzyjnej, co w algorytmie odzwierciedlone jest jako zwiększanie wartości n (oznaczającej liczbę kryteriów problemu decyzyjnego) o jeden i tworzenie kolejnych obiektów klasy **Kryterium**.

Utwórz nowe kryterium – zwiększ n o 1 — do zbioru kryteriów C dodawany jest nowy element. W zbiorze definiującym sytuację decyzyjną dodawany jest nowy element, co w aspekcie implementacji oznacza dodanie utworzonego kryterium do listy kryteriów bieżącego problemu decyzyjnego.

Dla każdego kryterium C_i bieżącego problemu decyzyjnego — kolejne operacje zostaną wykonane sekwencyjnie dla wszystkich kryteriów bieżącego problemu decyzyjnego. Operator **Dla każdego** określa wykonanie tylu iteracji, ile jest elementów w zbiorze, co w kontekście niniejszego algorytmu oznacza liczbę kryteriów C definiujących problem decyzyjny. W kontekście implementacji odpowiada to pętli z indeksem inkrementowanym $+1$ od 0 do n.

Pobierz kształt funkcji g_i — decydent definiuje kształt funkcji g dla danego kryterium. Określany jest kształt funkcji zależnej od wartości atrybutu wariantu decyzyjnego. Wraz z definicją funkcji określona jest skala, na jaką rzutowane są wartości. Stąd przy funkcji niedokonującej przekształceń wartości atrybutu (postać $g_i(a_i) = a_i$), kryterium i jest kryterium rzeczywistym. Brak określenia funkcji g_i oznacza przyjęcie $g_i = \varnothing$.

Pobierz dziedzinę D_i — decydent definiuje dziedzinę wartości dla atrybutów potencjalnych wariantów decyzyjnych. Wariant potencjalny a^*, spełniający warunek $a_i^* \in D_i$, dla $i = 1, \ldots, n$, jest włączany do zbioru A (staje się wariantem rzeczywistym).

Pobierz wartości W_i — decydent definiuje wartość ważności lub wektor ważności dla bieżącego kryterium. Decydent ma możliwość określenia wagi dla kryterium jako zbiór pusty $\varnothing$, wartość ważności kryterium w lub jako wektor przewyższania ważności względem pozostałych kryteriów.

Pobierz wartość q_i — decydent określa wartość progu nierozróżnialności lub funkcję liniową zależną od wartości atrybutu, określającą próg nierozróżnialności. Wyrażona zostaje przez decydenta jedna wartość q_i (wzór (4.5)) lub dwie wartości α i β (wzór (4.6)), definiujące próg nierozróżnialności. Brak wyrażenia wartości oznacza przyjęcie $q_i = \varnothing$.

Pobierz wartość p_i — decydent określa wartość progu preferencji lub funkcję liniową zależną od wartości atrybutu, określającą próg preferencji. Wyrażona zostaje przez decydenta jedna wartość p_i (wzór (4.7)) lub dwie wartości α i β (wzór (4.8)), definiujące próg preferencji. Brak wyrażenia wartości oznacza przyjęcie $p_i = \varnothing$.

Pobierz wartość v_i — decydent określa wartość progu weta lub funkcję liniową zależną od wartości atrybutu, określającą próg weta. Wyrażona zostaje przez decydenta jedna wartość v_i (wzór (4.3)) lub dwie wartości α i β (wzór (4.4)), definiujące próg weta. Brak wyrażenia wartości oznacza przyjęcie $v_i = \varnothing$.

Dopóki (dostępne są opisy potencjalnych wariantów decyzyjnych $\tilde{A}$) —

kolejne operacje będą wykonywane iteracyjnie w kolejnych lokalizacjach agenta, do momentu wyczerpania dostępnej przestrzeni poszukiwań.

Pobierz opis wariantu decyzyjnego — pobranie opisu wariantu decyzyjnego ze źródła danych.

Jeżeli (wszystkie wartości $\tilde{a}_i$ zawarte są w D_i) — porównanie wartości wszystkich atrybutów bieżącego wariantu decyzyjnego z dziedzinami wartości określonymi dla kolejnych kryteriów.

Dodaj bieżący wariant decyzyjny do zbioru A – zwiększ m o 1 — jeżeli wartości wszystkich atrybutów zawierają się w odpowiadających im dziedzinami, wariant decyzyjny dodawany jest do zbioru A wariantów problemu decyzyjnego. Następuje zwiększenie o jeden liczności zbioru wariantów decyzyjnych. W warunkach implementacyjnych oznacza to utworzenie nowego obiektu klasy **Wariant**.

F=**Wybierz F z kolekcji Ψ' na podstawie G, D, W, Q, P, V, K** — dokonanie wyboru jednego przekształcenia z kolekcji Ψ' na podstawie wartości parametrów składających się na elementy zbiorów: G, D, W, Q, P, V, K. Wybór przekształcenia dokonywany jest poprzez reguły decyzyjne zaimplementowane w bazie wiedzy agenta.

Oblicz wartości tabeli wydajności $G(A)$ na podstawie G, A — konstruowana jest tabela wydajności na podstawie wzorów funkcji g i wartości atrybutów opisujących warianty decyzyjne A. Konstrukcja tabeli wykonywana jest z uwzględnieniem dobranego przekształcenia wielokryterialnego.

a_p=**Oblicz wynik F dla argumentów $A, G(A), W, Q, P, V$** — wykonywane są operacje arytmetyczne wchodzące w skład przekształcenia F na zbiorach danych stanowiących definicję problemu decyzyjnego. Wynikiem przeprowadzonych operacji jest wybór wariantu decyzyjnego najlepiej spełniającego kryteria zadane przez decydenta.

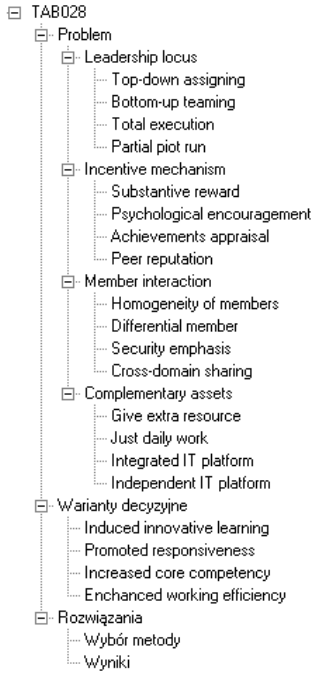
Zwróć a_p jako rekomendowany wariant decyzyjny — wyznaczony przy pomocy przekształcenia F wariant decyzyjny o najwyższej lokacie rankingowej jest zwracany jako rekomendacja dla decydenta stanowiąca wynik działania algorytmu.

Wynikowy wariant a_p jest wariantem decyzyjnym, któremu została przyznana pierwsza pozycja w rankingu wynikowym funkcjonowania agenta.

Zgodnie z przedstawionym podejściem obiektowym, każda metoda wielokryterialna z kolekcji Ψ' zaimplementowana jest w postaci klasy C#, której funkcje dokonują analizy i rozwiązania modelu decyzyjnego podanego jako parametr wywołania. W ramach analizy dokonywana jest ocena dopasowania modelu decyzyjnego do danej metody wielokryterialnej. Funkcja `isValid()` zwraca wartość logiczną (prawda lub fałsz) określającą fakt możliwości zastosowania wywołanej metody wielokryterialnej do rozwiązania modelu decyzyjnego. W rezultacie metody wielokryterialne stopniowane są według ich stopnia dopasowania do zadanej sytuacji decyzyjnej. Następnie, agent programowy wybiera metodę najbardziej dopasowaną do rozwiązania sytuacji decyzyjnej i dostarczenia rekomendacji, lub implementacji decyzji.

Program umożliwia opis i nawigację pomiędzy kryteriami przy pomocy zdefiniowanych przez użytkownika etykiet tekstowych. Rysunek 5.6 przedstawia hierarchiczną strukturę definiowanego problemu decyzyjnego.

Przedstawiony program pozwala na zdefiniowanie problemu decyzyjnego, opisanego zgodnie z założeniami przedstawionymi w podrozdziale 4.1 rozprawy. Stąd, zadany problem decyzyjny jest opisany przez:



Rysunek 5.6: Struktura problemu decyzyjnego

Źródło: Opracowanie własne

1. zbiór kryteriów C, gdzie na opis każdego kryterium C_i składa się kształt funkcji g_i i dziedzina dopuszczalnych wartości $D_i(A)$ atrybutów A;
2. zbiór meta-danych Φ, na który składają się: ważności kryteriów W, progi nierozróżnialności Q, preferencji P, weta V, funkcja użyteczności U i zbiór czynników środowiskowych K.

5.3.3. Cele użytkowe implementacji

Opracowany agent programowy wykorzystany został do przedstawienia działania w kontekście wyboru lokalizacji dla nowej jednostki przedsiębiorstwa. Działanie programu polega na sporządzeniu rankingu lokalizacji, zgodnie z najlepszą zgodnością z kryteriami decydenta. Decydent może wyrazić swoje kryteria w formie liczbowej, lingwistycznej lub mieszanej.

Dialog prowadzący do definicji problemu decyzyjnego jest zawarty w funkcjonalności interfejsu użytkownika — samodzielnego programu do nastawiania parametrów agenta. W trakcie fazy dialogu wymagana jest współpraca analityka przy tłumaczeniu opisu sytuacji decyzyjnej, wyrażonej przez decydenta przy użyciu niesformalizowanych określeń. Opisy sytuacji decyzyjnych wyrażane w trakcie interakcji z decydentem pozwalają na włączenie meta-opisów do fazy budowy bazy wiedzy. Co więcej, informacja kontekstowa, zgodna ze strukturą reguł zawartych w bazie wiedzy, pozwala na rozpoczęcie procesu wnioskowania natychmiast po zebraniu satysfakcjonującego (kompletnego) zbioru parametrów opisujących warianty decyzyjne. Zakończony przebieg procesu wnioskowania skutkuje wyborem techniki obliczeniowej najlepiej dopasowanej do wspomagania procesu decyzyjnego dla analizowanej sytuacji. Wybór metody wielokryterialnej wraz z samym procesem wspomagania odbywa się podczas autonomicznej fazy operacji agenta programowego. W rezultacie wymagana jest jedna faza współpracy z analitykiem. Zebranie

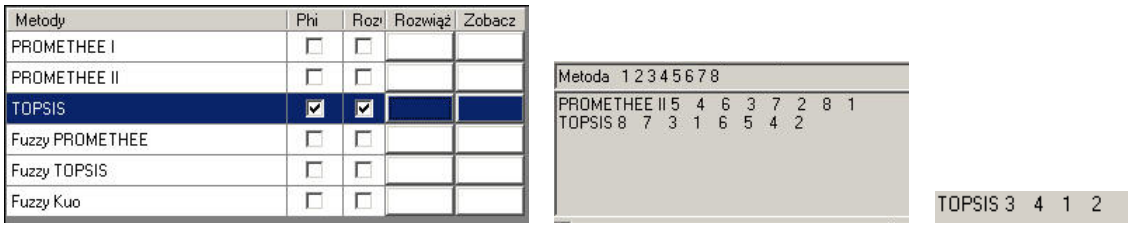
opisów wariantów decyzyjnych, dobór odpowiedniej metody wielokryterialnej, obliczenia procesu wspomagania decyzji i sporządzenie końcowej rekomendacji są fazami automatycznymi w danym procesie.

Wartym nadmienienia jest fakt, iż prace prowadzące do wytworzenia wymienionego rozwiązania zostały przeprowadzone zgodnie z zasadami prowadzenia projektów informatycznych. Zebranie wymagań dla oprogramowania, a następnie modelowanie przypadków użycia, zostało przeprowadzone w sposób właściwy dla projektów deweloperskich. Obrany obszar zastosowań obejmował wykorzystanie najlepszych praktyk usługi EULIS (integracja informacji katastralnej) z krajów Unii Europejskiej do wspomagania wyboru najlepszej lokalizacji dla nowej inwestycji komercyjnej. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem danych projektu WeGo, którego celem było promowanie usług e-government w krajach Zachodnich Bałkanów, aspirujących do członkostwa w Unii Europejskiej. Proponowany agent pozwala na konkurowanie o atrakcyjnych inwestorów na poziomie regionów, a nie całych krajów. Agent dokonuje zebrania danych o dostępnych lokalizacjach na poziomie lokalnych baz danych prowadzonych przez samorządy, co wpasowuje się w zasadę swobodnego przepływu ludzi i kapitału, będącą jednym z fundamentów Unii Europejskiej. Dostosowanie prac badawczych do rzeczywistych potrzeb wprowadzania nowych usług e-government, pozwoliło potraktować prace badawcze jako wkład do rozwoju informatyki w zakresie lepszego i łatwiej dostępnego komputerowego wspomagania decyzji.

5.4. Metodyka przeprowadzonych doświadczeń

W celu wykazania poprawności algorytmu, opracowano środowisko testowe umożliwiające przeprowadzenie eksperymentów testujących trafność dopasowania metody przez agenta. Program testujący umożliwia prezentację dopasowania sytuacji decyzyjnej do modelu, a także zlecenie rozwiązania problemu przez agenta (w tym także rozwiązanie przez metody niedopasowane do problemu decyzyjnego) i porównanie rankingów wynikowych. Poniżej przedstawiono schemat wykonanych eksperymentów, a w kolejnym podrozdziale przedstawiono uzyskane rezultaty.

Zdefiniowany problem decyzyjny poddawany jest procesowi wnioskowania, a następnie wywoływane jest rozwiązanie problemu decyzyjnego przy użyciu rekomendowanej metody wielokryterialnej. Kolejnym krokiem jest wywołanie rozwiązania problemu decyzyjnego przy pomocy jednej z pozostałych metod wielokryterialnych. Rysunek 5.7a przedstawia ekran wyboru metody w programie wykonanym do przeprowadzenia badań.



(a) Wybór metody do rozwiązania problemu decyzyjnego

(b) Rezultat wspomagania

(c) Przykładowe rozwiązanie

Rysunek 5.7: Rezultaty wspomagania decyzji przy pomocy opracowanej aplikacji

Źródło: Opracowanie własne

Aplikacja umożliwia zapoznanie się zarówno z przebiegiem procesu obliczeniowego (w tym z wartościami ϕ, z dystansem do rozwiązania idealnego), jak i z samą wartością rankingu. Finalny ranking rozważanych wariantów decyzyjnych, uzyskany przy pomocy wybranych metod wielokryterialnych, prezentowany jest, jak na rysunku 5.7b.

Wyniki uzyskane przy pomocy opracowanego programu zestawiane są z wzorcowymi wynikami przedstawionymi w literaturze (lub zestawach danych testowych). Następnie przeanalizowano występujące różnice w wynikach uzyskanych przy pomocy metody wskazanej przez literaturę naukową, nazywaną dalej **metodą referencyjną**, zgodnie z rysunkiem 5.7c, dla danej sytuacji decyzyjnej, a innymi metodami możliwymi do użycia, uwzględniając przybliżony charakter wnioskowania udostępnionego przez reguły decyzyjne. Porównanie prezentowane jest zgodnie ze przykładem zawartym w tabeli 5.2.

Tabela 5.2: Porównanie rozwiązań problemu testowego

Metoda	A1	A2	A3
Fuzzy TOPSIS	**3**	**2**	**1**
Fuzzy Kuo	3	2	1
Fuzzy PROMETHEE	2	3	1

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 5.2 przedstawia porównanie wyniku referencyjnego (otrzymanego przy użyciu metody Fuzzy TOPSIS) z wynikami uzyskanymi pozostałymi metodami kolekcji Ψ' dla liczb rozmytych ($f\Psi'$). W celu zobrazowania różnic, rozwiązano problem decyzyjny przy pomocy trzech metod wielokryterialnych. Zgodnie z tezą, na której oparta jest rozprawa, otrzymano dwa różne rankingi wyjściowe.

Funkcjonowanie agenta w środowisku rozproszonym przetestowano z wykorzystaniem maszyn wirtualnych VMware. Na maszynach wirtualnych zainstalowany został system operacyjny Microsoft Windows 2003, platforma Microsoft .NET Framework i baza danych Microsoft SQL Server. Opisy wariantów decyzyjnych zostały zapisane w bazie danych systemów hostujących agenta. Na systemie klienckim uruchomiono program nastawczy, przy pomocy którego wprowadzono definicję problemu decyzyjnego do bazy danych. Uruchomienie serwera polega na wykonaniu aplikacji konsoli Windows nasłuchującej na porcie TCP/IP. Protokół TCP/IP wykorzystany jest do załadowania kodu agenta do systemu hosta.

Inicjalizacja agenta programowego polega na uruchomieniu aplikacji konsolowej na stacji klienckiej (innej niż stacja hostująca). Agent programowy odczytuje plik konfiguracyjny (plik tekstowy typu CSV) z adresami stacji hostów z opisami wariantów decyzyjnych, a także odczytuje problem decyzyjny z bazy danych.

Praca agenta w środowisku rozproszonym przebiega bez zakłóceń. Kod agenta dokonuje kolejnych przemieszczeń pomiędzy stacjami hostującymi i w momencie, gdy załaduje opisy wariantów decyzyjnych z ostatniego hosta na liście, przeprowadza obliczenia. Stąd, proces wspomagania decyzji wykonany jest w czasie potrzebnym na transfer kodu i odczytanie opisów wariantów decyzyjnych, bez oczekiwania na interakcję człowieka.

5.5. Dyskusja wyników doświadczeń

5.5.1. Przykład 1: Outsourcing systemu informatycznego

Pierwszy przykład zastosowania algorytmu opracowanego w rozprawie został zaczerpnięty z literatury. Zgodnie z opisem przedstawionym w [39], sytuacja decyzyjna obejmuje problem alokacji obsługi systemu informatycznego zgodnie z potrzebami informacyjnymi różnych działów przedsiębiorstwa. Autor pracy dobrał metodę PROMETHEE do wspomagania sytuacji decyzyjnej. W dalszej części opisu przykładu zostaną przeanalizowane przesłanki, jakimi kierował się autor, a także zostanie przytoczony opis wspomagania procesu decyzyjnego. Podana sytuacja jest przykładem decyzji w obszarze nauk stosowanych i inżynierskich (szerzej w przytoczonej pracy).

Sytuacja decyzyjna polega na wyborze oprogramowania COTS i jest to techniczna kategoria problemów decyzyjnych. Rozważono kryteria niekonfliktowe i nieopisujące w sposób kompletny sytuacji decyzyjnej. Wedle przyjętej w rozprawie skali dotyczącej rozmiarów badanych problemów, analizowana sytuacja jest opisana małą liczbą kryteriów i obejmuje małą liczbę wariantów decyzyjnych. Decydent dysponuje jedynie ogólną wiedzą na temat przedmiotu wyboru, co wynika ze strategicznego poziomu rozważanej decyzji. Celem dokonania wyboru jest dokonanie ewaluacji dostępnych scenariuszy.

Formalny zapis problemu decyzyjnego zawarty został we wzorach (5.2)–(5.9), gdzie model problemu decyzyjnego przedstawia uporządkowana czwórka zgodnie ze wzorem (5.10).

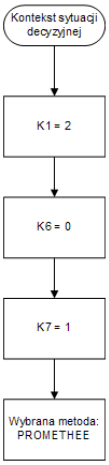
$$C = \{C_1, \ldots, C_7\} \tag{5.2}$$
$$W = \{10, 17, 27, 23, 20, 40, 38\} \tag{5.3}$$
$$P = \{3, 5, 0, 0, 05, 40, 5, 5\} \tag{5.4}$$
$$Q = \{1, 2, 0, 0, 20, 0, 0\} \tag{5.5}$$
$$V = \emptyset \tag{5.6}$$
$$U = \emptyset \tag{5.7}$$
$$K = \{2, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1\} \tag{5.8}$$
$$\Phi = \{W, P, Q, V, U, K\} \tag{5.9}$$

$$(C, \Phi, A, \Psi) \tag{5.10}$$

Autor pracy [39] wybrał metodę PROMETHEE do rozwiązania przedstawionej sytuacji decyzyjnej. Zgodnie z przedstawioną motywacja w artykule, głównymi przesłankami

doboru tej metody było uwzględnienie kompromisów („trade-offs") do analiz „what-if" i brak ograniczeń dla definicji problemu decyzyjnego.

Weryfikację rozwiązania wykonano przy pomocy aplikacji opracowanej w ramach pracy nad rozprawą. Zgodnie z zaimplementowanymi regułami do rozwiązania sytuacji decyzyjnej dobrana dostała metoda PROMETHEE. Aktywowane reguły przedstawiono na rysunku 5.8.



Rysunek 5.8: Przykład 1: Aktywowane reguły drzewa decyzyjnego

Źródło: Opracowanie własne

Obliczenia wykonane przez autora pracy, zgodnie ze schematem PROMETHEE II, a także obliczenia wykonane za pomocą aplikacji opisanej w podrozdziale 5.3, wyznaczyły następujący ranking wariantów decyzyjnych (wzór (5.11)).

$$a_4 \succ a_1 \succ a_2 \succ a_3 \tag{5.11}$$

Zgodnie z wykonanymi obliczeniami, dla rankingu przedstawionego we wzorze (5.12) spełniony jest warunek maksymalizacji dopasowania do preferencji decydenta, zgodnie ze wzorem (4.11). W celu uwypuklenia znaczenia dopasowania metody wielokryteialnej do sytuacji decyzyjnej, wykorzystano oprogramowanie badawcze do obliczenia alternatywnego rankingu przy użyciu metody TOPSIS. Przy użyciu alternatywnej metody, badany problem decyzyjny dostarcza innej rekomendacji, niż dla metody PROMETHEE II, co obrazuje tabela 5.3. Różnica ta wynika z tezy postawionej w pracy [143] i ujętej w niniejszej rozprawie. Stanowi ona o różnych rezultatach wspomagania w przypadku zastosowania różnych metod wielokryterialnych. Należy przy tym zaznaczyć, że dla badanego przypadku różnica nie jest istotna w aspekcie dokonywanego wyboru, gdyż występuje na trzeciej i czwartej lokacie rankingu. Należy jednakże mieć na uwagę fakt, że dla innych danych wejściowych różnica może dotyczyć pierwszej lokaty rankingu, a więc stanowić o dostarczeniu innej rekomendacji dla wyboru dokonywanego przez decydenta.

$$a_4 \succ a_1 \succ a_3 \succ a_2 \tag{5.12}$$

Tabela 5.3: Porównanie rozwiązań problemu testowego

Metoda	A1	A2	A3	A4
PROMETHEE II	**2**	**3**	**4**	**1**
TOPSIS	2	4	3	1

Źródło: Opracowanie własne.

Rozważając reguły decyzyjne, zgodnie z którymi metoda PROMETHEE jest właściwą metodą do rozwiązania przedstawionej sytuacji decyzyjnej, należy zwrócić uwagę na czynniki środowiskowe, które zadecydowały o użyciu tej metody. Zgodnie z regułami przedstawionymi podrozdziale 4.6, są to: rodzaj wybieranego obiektu – oprogramowanie COTS, liczba atrybutów – mała, stopień poznania sytuacji decyzyjnej przez decydenta – wiedza ogólnikowa.

Z analizy drzewa decyzyjnego przedstawionego na rysunku 4.7 można odczytać, że użycie metody PROMETHEE, a nie TOPSIS, jest właściwe ze względu na jedynie ogólnikowy stopień poznania sytuacji decyzyjnej przez decydenta. Metoda TOPSIS może być właściwą metodą w sytuacji o podobnej charakterystyce, ale przy lepszym poznaniu sytuacji decyzyjnej przez decydenta.

5.5.2. Przykład 2: Wybór materiału do wykonania produktu

Kolejny przeanalizowany przykład został również przytoczony za literaturą naukową poświęconą tematyce wspomagania decyzji. Przedstawiona w pracy [122] sytuacja decyzyjna polega na analizie i doborze materiału konstrukcyjnego na podstawie właściwości fizycznych. Opisany problem przedstawia wybór materiałów do wykonania zbiornika kriogenicznego na ciekły azot.

Sytuacja decyzyjna należy do kategorii sytuacji wyboru techniki produkcji. Co więcej sytuacja charakteryzuje się dobrze poznanym przedmiotem podejmowania decyzji, co wynika z przewidywalności praw fizyki i znajomości właściwości fizycznych rozważanych składników.

Zapis formalny problemu decyzyjnego przedstawiają wzory (5.13)–(5.20). Uporządkowana czwórka reprezentująca model problemu decyzyjnego zawarta jest we wzorze (5.21).

$$C = \{C_1, \ldots, C_12\} \tag{5.13}$$

$$W = \{0,016, 0,087, 0,058, 0,114, 0,114, 0,068, 0,105, 0,105, 0,016, 0,034, 0,107, 0,178\} \tag{5.14}$$

$$P = \emptyset \tag{5.15}$$

$$Q = \emptyset \tag{5.16}$$

$$V = \emptyset \tag{5.17}$$

$$U = \emptyset \tag{5.18}$$

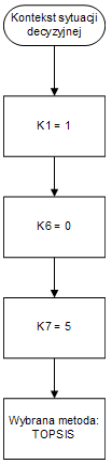
$$K = \{1, 0, 1, 0, 1, 0, 5, 1, 0\} \tag{5.19}$$

$$\Phi = \{W, P, Q, V, U, K\} \tag{5.20}$$

$$(C, \Phi, A, \Psi) \tag{5.21}$$

Obliczenia w pracy [122] zostały wykonane przy pomocy metody TOPSIS, co autor umotywował wymogiem dobrego zrozumienia funkcji wybieranego przedmiotu. Metoda TOPSIS jest uznana za trafniejszą w sytuacjach, gdy badany przedmiot decyzji jest namacalny i dobrze poznany.

Weryfikację podejścia zastosowanego przez autora przytoczonej pracy wykonany przy użyciu aplikacji badawczej opisanej w podrozdziale 5.3. Opis sytuacji decyzyjnej aktywował reguły jak przedstawiono na rysunku 5.9, co doprowadziło do zastosowania metody TOPSIS.



Rysunek 5.9: Przykład 2: Aktywowane reguły drzewa decyzyjnego

Źródło: Opracowanie własne

W wyniku przeprowadzonych obliczenia zgodnie ze schematem TOPSIS, powstał ranking wariantów decyzyjnych przedstawiony we wzorze (5.22).

$$a_4 \succ a_8 \succ a_3 \succ a_7 \succ a_6 \succ a_5 \succ a_2 \succ a_1 \tag{5.22}$$

Wykorzystując oprogramowanie badawcze, wykonano również obliczenia przy użyciu metody alternatywnej — PROMETHEE II. Rezultat przedstawia wzór (5.23). Użycie metody PROMETHEE dostarcza diametralnie innego rezultatu, co potwierdza tezę o wpływie doboru metody wielokryterialnej na rezultat wspomagania.

$$a_8 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_2 \succ a_1 \succ a_3 \succ a_5 \succ a_7 \tag{5.23}$$

Na podstawie pierwszych trzech pozycji rankingu można zauważyć, że dwa z trzech wariantów decyzyjnych obecne są w czołówce obu rankingów. Natomiast dla dalszej części rankingu układ jest całkowicie inny. Nie bez znaczenie jest fakt, że autor artykułu [122] dokonał podobnego porównania z rezultatem metody ELECETREE, która operuje na tych samych pryncypiach, co PROMETHEE. Przy użyciu metody ELECTREE, rekomendowany został ten sam wariant, co w przypadku metody PROMETHEE (wariant a_8).

Rozważając reguły decyzyjne, zgodnie z którymi metoda TOPSIS jest właściwą metodą do rozwiązania przedstawionej sytuacji decyzyjnej, należy zwrócić uwagę na czynniki środowiskowe, które zadecydowały o użyciu tej metody. Zgodnie z regułami przedstawionymi w podrozdziale 4.6, są to: rodzaj wybieranego obiektu – wybór techniki produkcji, liczba atrybutów – mała, stopień poznania sytuacji decyzyjnej przez decydenta – pełne poznanie.

Z analizy drzewa decyzyjnego przedstawionego na rysunku 4.7 można odczytać, że użycie metody TOPSIS jest właściwym podejściem ze względu na kompletne poznanie sytuacji decyzyjnej. W dobrze poznanych sytuacjach, możliwe jest poszukiwanie rozwiązania zgodnie z naturalnym rozumowaniem człowieka — poszukiwanie wariantu najbardziej idealnego i najmniej niepożądanego. Połączenie wag i ocen atrybutów w użytej metodzie dostarcza lepszej dokładności ewaluacji. W efekcie świadomego doboru metody, wybór materiału do produkcji następuje bardziej obiektywnie i logicznie.

5.5.3. Przykład 3: Wybór maszyny produkcyjnej

Kolejny przykład, a zarazem ostatni z przykładów z literatury naukowej, przedstawia sytuację decyzyjną opisaną w pracy [50]. Jest to problem wyboru wyboru maszyny drukującej dla firmy tekstylnej, zgodnie z założoną strategią funkcjonowania organizacji. Autor pracy dobrał metodę TOPSIS do podjęcia zadanej decyzji.

Przedstawiona sytuacja jest przykładem decyzji polegającej na wyborze konkretnego przedmiotu, w tym wypadku urządzenia, na podstawie jego parametrów technicznych. Sytuacja decyzyjna jest opisana przez wiele kryteriów subiektywnych i lingwistycznych. Wybór maszyny produkcyjnej jest szczególnym przypadkiem decyzji, gdzie wybierany jest dobrze opisany przedmiot, jednakże nieznane jest jego przyszłe zachowanie, gdy zostanie wdrożony do procesu technologicznego.

Wykorzystując schemat formalizacji wprowadzony w niniejszym rozdziale, zapis problemu decyzyjnego przedstawia się, jak we wzorach (5.24)–(5.28). Zapis modelu problemu decyzyjnego przedstawia uporządkowana czwórka pokazana we wzorze (5.29).

$$C = \{C_1, \ldots, C_5\} \tag{5.24}$$

$$\begin{aligned} W = \{&(0.8, 0.9, 1, 1), (0.5, 0.67, 0.73, 0.9), \\ &(0.7, 0.8, 0.8, 0.9), (0.5, 0.67, 0.73, 0.9), \\ &(0.7, 0.87, 0.93, 1)\} \end{aligned} \tag{5.25}$$

$$P = Q = V = U = \emptyset \tag{5.26}$$

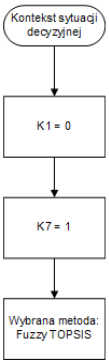
$$K = \{0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0\} \tag{5.27}$$

$$\Phi = \{W, P, Q, V, U, K\} \tag{5.28}$$

$$(C, \Phi, A, \Psi) \tag{5.29}$$

Obliczeń opisane w pracy [50] zostały wykonane przy pomocy schematu TOPSIS dla wartości rozmytych. Weryfikację zgodności obranego w przytoczonej pracy podejścia i reguł wnioskowania opracowanych w rozprawie wykonano przy użyciu aplikacji badawczej, której opis znajduje się w podrozdziale 5.3 rozprawy.

Opisywana sytuacja decyzyjna dokonała aktywacji reguł zgodnie ze schematem 5.10, co doprowadziło do zastosowania metody TOPSIS.



Rysunek 5.10: Przykład 3: Aktywowane reguły drzewa decyzyjnego

Źródło: Opracowanie własne

W wyniku obliczeń schematu Fuzzy TOPSIS, powstał ranking wariantów decyzyjnych przedstawiony we wzorze (5.30).

$$a_2 \succ a_1 \succ a_3 \tag{5.30}$$

Wykorzystując oprogramowanie badawcze, wykonano alternatywne obliczenia dla przedstawionej sytuacji decyzyjnej, przy użyciu metody rozmytej Kuo. Rezultat przedstawia wzór (5.31). Pomimo, ze metoda nie została wykazana jako sugerowana dla danej sytuacji decyzyjnej, wynik wspomagania jest tożsamy z rezultatem uzyskanym przy pomocy metody rozmytej TOPSIS.

$$a_2 \succ a_1 \succ a_3 \tag{5.31}$$

Natomiast użycie metody rozmytej PROMETHEE dostarcza innego rezultatu, co obrazuje wzór (5.32).

$$a_1 \succ a_2 \succ a_3 \tag{5.32}$$

Rozważając reguły decyzyjne, zgodnie z którymi metoda rozmyta TOPSIS jest właściwą metodą do rozwiązania przedstawionej sytuacji decyzyjnej, należy zwrócić uwagę na czynniki środowiskowe, które zadecydowały o użyciu tej metody. Zgodnie z regułami przedstawionymi w podrozdziale 4.6, są to: rodzaj wybieranego obiektu – wybór przedmiotu, stopień poznania sytuacji decyzyjnej przez decydenta – wiedza ogólnikowa. Z tego względu został zastosowany rozmyty wariant metody TOPSIS. Cechą charakterystyczną przytoczonej sytuacji decyzyjnej jest niedoprecyzowanie informacji decyzyjnej zarówno w aspekcie doboru kryteriów, jak i wyrażonych wartości.

Zgodnie z regułami drzewa decyzyjnego przedstawionego na rysunku 4.7, użycie metody rozmytej TOPSIS jest zalecane dla problemów decyzyjnych polegających na wyborze przedmiotu (obiektu). Stanowi to niewątpliwie znaczne uproszczenie, wynikające ze względnie niedużej liczności danych użytych do konstrukcji bazy reguł, i pozwala jedynie nakreślić pewien trend, który jest odzwierciedlony w publikowanej wiedzy naukowej.

5.5.4. Przykład 4: Wybór lokalizacji dla siedziby przedsiębiorstwa

Kolejny przykład omawiany w rozprawie jest przykładem praktycznym, opracowanym na podstawie danych zebranych przez autora rozprawy w trakcie projektu badawczego. Dotyczy on wyboru lokalizacji dla siedziby przedsiębiorstwa.

Wybór lokalizacji jest złożonym problemem, zarówno pod względem ilości rozważanych kryteriów, jak i wpływu, jaki obrana decyzja wywiera na funkcjonowanie organizacji. W szczególności każda decyzja tego typu posiada szereg unikalnych charakterystyk, co sprawia, że problem ten obejmuje więcej niż jeden kierunek preferencji. Dotyczą one aspektów kosztowych, dostępu do siły roboczej, a także komfortu zatrudnionych pracowników. Można wyróżnić osobny dział nauki związany z wyborem najlepszej lokalizacji w zależności od wielu klas czynników, a także od specjalizacji, na przykład lokalizacji obiektów logistycznych. Czynniki dotyczą nie tylko samej lokalizacji, rozumianej jako położenie geograficzne, ale też wielu aspektów ekonomicznych, społecznych, infrastrukturalnych, a nawet politycznych. Także osoba decydenta ma krytyczne znaczenie dla obranego podejścia decyzyjnego.

Zwiększona swoboda przepływów finansowych i nabywania nieruchomości, w ramach Unii Europejskiej, znacznie zwiększa możliwości wyboru. Zwielokrotnia to przestrzeń decyzyjną wyboru terenu pod inwestycję, a także niedoprecyzowanie opisów rozważanych wariantów decyzyjnych. W szczególności dochodzą nowe atrybuty, o których wiedza decydenta jest ograniczona. Istotną cechą niektórych atrybutów jest, że te same wartości mogą dostarczać różnej interpretacji. Różnie interpretowane mogą być wartości, na przykład, różnic w regulacjach prawnych lub kulturze prowadzenia biznesu. Równocześnie rosnąca swoboda dostępu do informacji, wraz z cyfryzacją samorządów lokalnych w państwach członkowskich UE, wymaga przeszukania zasobów dostępnych w wielu lokalizacjach. Narzędziem integracji danych z rejestrów ziemskich w wielu samorządach, rozsianych po całym kontynencie europejskim, może być agent programowy.

Niniejszy przykład przedstawia zastosowanie agenta programowego, wyposażonego w algorytm opracowany w rozprawie, do podjęcia decyzji lokalizacyjnej. W celu zobrazowania złożoności problemu wyboru siedziby dla przedsiębiorstwa, zbudowano model decyzyjny obejmujący 146 kryteriów zgrupowanych w 20 kategorii. Przy budowie modelu wykorzystano wytyczne opisu terenowego programu ArcGIS[2], dane z instytutu MetroGIS[3], a także prace [33, 1]. Następnie model został uproszczony poprzez agregowanie kryteriów w ramach każdej kategorii do jednego kryterium lingwistycznego opisującego każdą kategorię, z dodatkowym kryterium rozmytym Koszt. W rezultacie powstał zbiór kryteriów C jak w tabeli 5.4.

Tabela 5.4: Kryteria wyboru lokalizacji dla siedziby przedsiębiorstwa

C	Nazwa	Skala	Preferencja	Waga
C_1	Właściwości geograficzne	lingwistyczna	rosnąca	3
C_2	Przeznaczenie	lingwistyczna	rosnąca	5
C_3	Uregulowana własność	lingwistyczna	rosnąca	5
C_4	Uzbrojenie terenu	lingwistyczna	rosnąca	4
C_5	Zanieczyszczenia	lingwistyczna	rosnąca	4
C_6	Dostęp do infrastruktury transportowej	lingwistyczna	rosnąca	3

[2] http:www.esri.com/software/arcgis/
[3] http:www.metrogis.org/

Tabela 5.4: Kryteria wyboru lokalizacji dla siedziby przedsiębiorstwa

C	Nazwa	Skala	Preferencja	Waga
C_7	Przyroda	lingwistyczna	rosnąca	2
C_8	Krajobraz	lingwistyczna	rosnąca	1
C_9	Atrybuty administracyjne	lingwistyczna	rosnąca	3
C_{10}	Intensywność transportu	lingwistyczna	rosnąca	3
C_{11}	Obiekty użyteczności publicznej	lingwistyczna	rosnąca	2
C_{12}	Niepożądane obiekty w sąsiedztwie	lingwistyczna	rosnąca	4
C_{13}	Warunki finansowe otoczenia	lingwistyczna	rosnąca	2
C_{14}	Czynniki demograficzne	lingwistyczna	rosnąca	1
C_{15}	Otoczenie prawne	lingwistyczna	rosnąca	3
C_{16}	Klimat	lingwistyczna	rosnąca	1
C_{17}	Rozwój regionalny	lingwistyczna	rosnąca	1
C_{18}	Czynniki socjologiczne	lingwistyczna	rosnąca	1
C_{19}	Przyjazność dla przedsiębiorców	lingwistyczna	rosnąca	4
C_{20}	Jakość życia	lingwistyczna	rosnąca	3
C_{21}	Cena	ilorazowa	malejąca	5

Źródło: Opracowanie własne.

Wartości wag kryteriów odpowiadają ocenom lingwistycznym modelowanymi pomocy trójkątnych zbiorów przynależności, zgodnie z tabelą 5.5.

Tabela 5.5: Zastosowane oceny lingwistyczne

Ocena	Wartości
1	$(1, 1, 2)$
2	$(1, 2, 3)$
3	$(2, 3, 4)$
4	$(3, 4, 5)$
5	$(4, 5, 5)$

Źródło: Opracowanie własne.

Te same oceny lingwistyczne zostały użyte przy modelowaniu wartości atrybutów rozważanych wariantów decyzyjnych. Na potrzeby prezentowanego przykładu uwzględniono cztery warianty decyzyjne opisujące cztery różne lokalizacje dla siedziby przedsiębiorstwa. Warianty opisano przy pomocy atrybutów zgodnie z przyjętym uproszczonym zbiorem kryteriów. Zbiór wariantów decyzyjnych A przedstawiono w tabeli 5.6.

Tabela 5.6: Rozważane warianty decyzyjne

C	W_1	W_2	W_3	W_4
C_1	5	2	2	5
C_2	4	5	2	4
C_3	5	5	5	5
C_4	5	4	1	5
C_5	3	3	4	3
C_6	4	3	2	4

Tabela 5.6: Rozważane warianty decyzyjne

C	W_1	W_2	W_3	W_4
C_7	3	3	5	4
C_8	1	1	2	1
C_9	2	2	2	2
C_{10}	3	2	5	2
C_{11}	3	3	1	4
C_{12}	5	4	5	5
C_{13}	4	4	5	3
C_{14}	3	3	3	3
C_{15}	3	3	3	3
C_{16}	4	4	4	4
C_{17}	3	3	2	5
C_{18}	3	3	2	3
C_{19}	4	4	4	4
C_{20}	3	3	2	2
C_{21}	18	12	9	19

Źródło: Opracowanie własne.

Przystępując do identyfikacji kontekstu sytuacji decyzyjnej, zastosowano schemat zgodny z przyjętym w rozprawie. Przedmiotem prezentowanego tutaj problemu decyzyjnego jest wybór lokalizacji. Jest to problem organizacyjny, gdyż wybór siedziby firmy wykracza poza jedynie ekonomiczne aspekty decyzji. Funkcjonowanie przedsiębiorstwa determinowane jest przez działalność pracowników, stąd kryteria czysto ekonomiczne są niewystarczające do opisu problemu. Co więcej, rozważane kryteria są często konfliktowe, dla przykładu korzystne otoczenie i dobry dostęp do infrastruktury transportowej. Także niemożliwe jest opisanie rozważanej lokalizacji w sposób zupełny. Charakterystyką wyboru lokalizacji jest relatywnie łatwy dostęp do informacji związanej z rozważanej lokalizacji. Natomiast względy praktyczne, w szczególności szeroki zakres problemu, powodują, że pewne aspekty się pomija. Stąd, zgodnie z przyjętą metodologią oceny problemów decyzyjnych, przyjmuje się średni stopień poznania dla opisywanego problemu. Ostatnie analizowane elementy kontekstu sytuacji decyzyjnej to charakter decyzji, który przy wyborze siedziby dla przedsiębiorstwa jest decyzją strategiczną, a także cel rozważanej decyzji, którą jest implementacja jednego z analizowanych scenariuszy. Zgodnie z tym, co przedstawiono powyżej, kontekst opisywanej sytuacji decyzyjnej przedstawia się następująco.

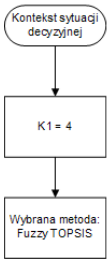
$$K = \{4, 3, 0, 1, 2, 0, 3, 0, 0\} \tag{5.33}$$

Zapis formalny problemu decyzyjnego przedstawiają wzory (5.34)–(5.38). Uporządkowana czwórka reprezentująca model problemu decyzyjnego zawarta jest we wzorze (5.39).

$$
\begin{aligned}
C &= \{C_1, \ldots, C_5\} && (5.34)\\
W &= \{(2,3,4),(4,5,5),(4,5,5),\\
&\quad (3,4,5),(3,4,5),(2,3,4),\\
&\quad (1,2,3),(1,1,2),(2,3,4),\\
&\quad (2,3,4),(1,2,3),(3,4,5),\\
&\quad (1,2,3),(1,1,2),(2,3,4),\\
&\quad (1,1,2),(1,1,2),(1,1,2),\\
&\quad (3,4,5),(2,3,4),(4,5,5)\} && (5.35)\\
P &= Q = V = U = \emptyset && (5.36)\\
K &= \{4,3,0,1,2,0,3,0,0\} && (5.37)\\
\Phi &= \{W,P,Q,V,U,K\} && (5.38)
\end{aligned}
$$

$$(C, \Phi, A, \Psi) \tag{5.39}$$

Przeprowadzony dobór metody wielokryterialnej do sytuacji decyzyjnej wykonano zgodnie z kontekstem przedstawionym we wzorze 5.33. Aktywowane reguły przedstawia schemat 5.11.



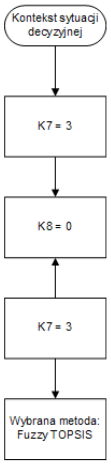
Rysunek 5.11: Przykład 4: Aktywowane reguły drzewa decyzyjnego

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przedstawionego schematu można zaobserwować, że została aktywowana jedna reguła decyzyjna. Wynika to z faktu, że dla skonstruowanej bazy wiedzy, lokalizacyjny charakter problemu wskazuje na zastosowanie metody Fuzzy TOPSIS. Ma to odzwierciedlenie w danych źródłowych, które posłużyły do wyznaczenia reguł decyzyjnych. Dokładana analiza drzewa decyzyjnego przedstawionego na rysunku 4.7 pokazuje, że wskazany węzeł zawiera 3 metody rozmyte, z których najsilniejsze wskazanie dotyczy istotnie Fuzzy TOPSIS. Z tego względu przeprowadzono walidację uzyskanego rezultatu z zastosowaniem drzewa wyznaczonego dla podzbioru metod wielokryterialnych operujących na danych rozmytych. Aktywowane reguły dla tego drzewa przedstawia rysunek 5.12.

Zgodnie z aktywowanymi regułami, gdy rozważany problem jest opisany danymi nieostrymi, wybrana zostaje metoda Fuzzy TOPSIS. Jest to wynikiem średniego stopnia poznania sytuacji decyzyjnej przez decydenta i strategicznego zasięgu decyzji.

Kolejnym etapem doświadczenia jest rozwiązanie problemu decyzyjnego przy pomocy dobranej metody wielokryterialnej. Obliczenia zostały wykonane zgodnie ze schematem



Rysunek 5.12: Przykład 4: Aktywowane reguły poddrzewa decyzyjnego dla danych rozmytych

Źródło: Opracowanie własne

Fuzzy TOPSIS, w implementacji wykonanej w ramach prac nad rozprawą, i opisanej w podrozdziale 5.3. Uzyskany ranking przedstawia wzór 5.40.

$$a_4 \succ a_1 \succ a_2 \succ a_3 \tag{5.40}$$

Wybrana została lokalizacja oznaczona jako a_4. Kontynuując doświadczenie obliczono rankingi porównawcze dla pozostałych dwóch rozważanych metod. Wyniki przedstawiają wzory 5.41 i 5.42, odpowiednio dla metod — Fuzzy PROMETHEE i Fuzzy Kuo.

$$a_1 \succ a_4 \succ a_2 \succ a_3 \tag{5.41}$$

$$a_1 \succ a_4 \succ a_2 \succ a_3 \tag{5.42}$$

Wyniki przy użyciu alternatywnych metod wielokryterialnych dostarczyły różnych rekomendacji niż uzyskana przy pomocy dobranej metody. Analizując dane wejściowe można zauważyć, że metoda Kuo, oparta na podobnych pryncypiach do metody TOPSIS, wykorzystuje inną miarę odległości od punktu idealnego. Stąd, zamiana miejsc wariantów a_1 i a_4, których opisy charakteryzują się bardzo zbliżonymi wartościami atrybutów. Inne miary dystansów powodują niewielkie różnice w interpretacji bilansu waga-wartość atrybutu, co powoduje zmiany miejsc rankingowych w przypadku zbliżonych wariantów decyzyjnych. Warto zauważyć, że relacja $a_2 \succ a_3$ zachowana jest zarówno przez Fuzzy TOPSIS, jak i Fuzzy Kuo. Wynika to z wyraźnych różnic w wartościach atrybutów pomiędzy tymi wariantami.

Metoda Fuzzy PROMETHEE dostarczyła rankingu tożsamego z wynikiem uzyskanym metodą Fuzzy Kuo. Różnice w metodzie PROMETHEE maja jednak inne podłoże. Metoda ta bazuje na liczbie przeważających kryteriów, i w tym wypadku wariant wykazuje przewagę w znaczniej mniejszej ilości kryteriów niż wariant a_4. Jednakże wariant a_4 zarazem charakteryzuje się również najgorszymi wartościami w znacznej większej ilości kryteriów.

Interpretując wyniki nie sposób pominąć wpływ kontekstu sytuacji decyzyjnej na dobór metody, a w konsekwencji na rekomendację dostarczoną decydentowi. Analizując drzewo decyzyjne służące do doboru metody, należy zwrócić uwagę na fakt, że metody Fuzzy Kuo oraz Fuzzy PROMETHEE są preferowane w przypadku decyzji o niepełnym poznaniu, a także o charakterze taktycznym. W przypadku bazy wiedzy zbudowanej w oparciu o publikacje naukowe, wynika to preferencji naukowców do wyboru tych metod w warunkach decyzji obejmujących jedynie pewien aspekt analizowanej sytuacji, w warunkach ograniczonego dostępu do wiedzy, lub w warunkach ograniczeń czasowych. Metoda TOPSIS natomiast jest preferowana w sytuacjach, gdy dostępny jest pełniejszy opis, co wynika z metodologii metody dążącej do dokładnego zmierzenie wariantów decyzyjnych w perspektywie ich odległości od punktów pozytywnie i negatywnie idealnych.

Powyższy przykład uwypukla powiązanie kontekstu sytuacji decyzyjnej z przebiegiem obliczeń w metodzie wielokryterialnej wybranej do wspomagania decyzji. Co więcej, widoczne jest istnienie pewnych schematów, które możliwe są do przewidzenia.

5.5.5. Przykład 5: Wybór systemu informatycznego Business Intelligence

Ostatni z przedstawionych przykładów obejmuje złożony problem wyboru strategicznego systemu informatycznego, jakim są systemy Business Intelligence. Problem operuje na zbiorze kryteriów opracowanym na podstawie wywiadów z decydentem.

Wybór systemu informatycznego dostarczającego informację decyzyjną zarówno na poziomie zarządczym jak i liniowym, jest problemem skomplikowanym i o daleko sięgających skutkach. Dokonanie wyboru jest charakteryzowane szeregiem unikalnych związków przyczynowo-skutkowych. Co więcej, konstrukcja ofert dostawców uniemożliwia prostą ocenę potencjalnych skutków implementacji. Konfliktowość kierunków preferencji obejmuje nie tylko powszechną relację koszt-funkcjonalność, ale także komfort użytkowania i dopasowanie rozwiązania do istniejących danych. Analizowany problem decyzyjny wymaga operowania na niedoprecyzowanej informacji decyzyjnej, gdzie skutki implementacji są trudne do przewidzenia, a przy tym będą silnie oddziaływać na funkcjonowanie przedsiębiorstwa na wszystkich płaszczyznach.

Niniejsza sytuacja decyzyjna została rozwiązana przy zastosowaniu algorytmu opracowanego w rozprawie. W celu zobrazowania złożoności problemu wyboru analitycznego systemu informacyjnego, zbudowano model decyzyjny obejmujący 16 kryteriów. Wszystkie kryteria to oceny lingwistyczne, zgodnie ze skalą przedstawioną w tabeli 5.8. Wynikowy zbiór kryteriów C przedstawia tabela 5.7.

Tabela 5.7: Kryteria wyboru systemu informatycznego klasy Business Intelligence

C	Nazwa	Skala	Preferencja	Waga
C_1	Możliwości transformacji danych źródłowych	lingwistyczna	rosnąca	$(4, 5, 5)$
C_2	Zgodność z istniejącymi danymi źródłowymi	lingwistyczna	rosnąca	$(4, 5, 5)$
C_3	Możliwości analityczne	lingwistyczna	rosnąca	$(3, 4, 5)$
C_4	Zaawansowane funkcje matematyczne	lingwistyczna	rosnąca	$(2, 3, 4)$
C_5	Wizualizacja	lingwistyczna	rosnąca	$(2, 3, 4)$
C_6	Możliwości konfiguracji administratora	lingwistyczna	rosnąca	$(3, 4, 5)$
C_7	Możliwości dostosowania przez użytkownika	lingwistyczna	rosnąca	$(1, 2, 3)$
C_8	Łatwość obsługi	lingwistyczna	rosnąca	$(3, 4, 5)$
C_9	Wymagania sprzętowe	lingwistyczna	rosnąca	$(1, 2, 3)$

Tabela 5.7: Kryteria wyboru systemu informatycznego klasy Business Intelligence

C	Nazwa	Skala	Preferencja	Waga
C_{10}	Jakość wsparcia technicznego	lingwistyczna	rosnąca	$(3, 4, 5)$
C_{11}	Opinia o producencie	lingwistyczna	rosnąca	$(1, 1, 2)$
C_{12}	Stabilność producenta	lingwistyczna	rosnąca	$(2, 3, 4)$
C_{13}	Opinia o dostawcy	lingwistyczna	rosnąca	$(2, 3, 4)$
C_{14}	Cena zakupu	lingwistyczna	rosnąca	$(2, 3, 4)$
C_{15}	Koszt wdrożenia	lingwistyczna	rosnąca	$(4, 5, 5)$
C_{16}	Koszt wsparcia technicznego i odnowienia licencji	lingwistyczna	rosnąca	$(4, 5, 5)$

Źródło: Opracowanie własne.

Wagi kryteriów zostały przedstawione jako zbiory trójkątne odpowiadające ocenom lingwistycznym. Skalę ocen lingwistycznych użyte do modelowaniu wag i wartości atrybutów przedstawia tabela 5.8. Prezentowany przykładu uwzględnia pięć wariantów decyzyjnych opisujących cztery różne oferty wdrożenia systemów Business Intelligence. Każda oferta została przedstawiona przez innego dostawce i obejmuje system innego producenta. Każdy dostawca przedstawił tylko jedną ofertę. Warianty opisano przy pomocy atrybutów zgodnym z przyjętym zbiorem kryteriów. Zbiór wariantów decyzyjnych A przedstawiono w tabeli 5.9.

Tabela 5.8: Zastosowane oceny lingwistyczne

Ocena	Wartości
Bardzo słabo	$(1, 1, 2)$
Słabo	$(1, 2, 3)$
Przeciętnie	$(2, 3, 4)$
Dobrze	$(3, 4, 5)$
Bardzo dobrze	$(4, 5, 5)$

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 5.9: Rozważane warianty decyzyjne

C	A	B	C	D	E
C_1	bardzo dobrze	dobrze	przeciętnie	dobrze	dobrze
C_2	przeciętnie	przeciętnie	przeciętnie	słabo	bardzo dobrze
C_3	dobrze	przeciętnie	dobrze	bardzo dobrze	przeciętnie
C_4	przeciętnie	dobrze	przeciętnie	bardzo dobrze	przeciętnie
C_5	bardzo dobrze	dobrze	bardzo dobrze	przeciętnie	dobrze
C_6	słabo	dobrze	dobrze	bardzo dobrze	dobrze
C_7	przeciętnie	dobrze	bardzo dobrze	przeciętnie	bardzo dobrze
C_8	dobrze	przeciętnie	dobrze	słabo	bardzo dobrze
C_9	słabo	słabo	dobrze	bardzo słabo	bardzo dobrze
C_{10}	bardzo słabo	przeciętnie	dobrze	dobrze	dobrze
C_{11}	przeciętnie	bardzo dobrze	przeciętnie	bardzo dobrze	dobrze
C_{12}	dobrze	bardzo dobrze	dobrze	bardzo dobrze	bardzo dobrze

Tabela 5.9: Rozważane warianty decyzyjne

C	A	B	C	D	E
C_{13}	przeciętnie	dobrze	przeciętnie	dobrze	bardzo dobrze
C_{14}	przeciętnie	słabo	słabo	bardzo dobrze	dobrze
C_{15}	przeciętnie	dobrze	przeciętnie	słabo	słabo
C_{16}	słabo	przeciętnie	słabo	bardzo słabo	dobrze

Źródło: Opracowanie własne.

Identyfikacji kontekstu sytuacji decyzyjnej dokonano zgodnie ze schematem przyjętym w rozprawie. Przedmiotem prezentowanego problemu decyzyjnego jest wybór systemu informatycznego. Jest to problem natury ekonomicznej, gdyż celem zakupu programu jest poprawa wyników ekonomicznych przedsiębiorstwa. Rozważane kryteria są często konfliktowe, tak jak łatwość obsługi i możliwości techniczne, czy też koszt zakupu licencji i koszt wsparcia technicznego. Ostatni konflikt wynika z polityki rabatowej dostawców, którzy obniżoną cenę zakupu rekompensują sobie zwiększonymi kosztami wsparcia technicznego. Także niemożliwa jest identyfikacja *a priori* skutków wdrożenia systemu informatycznego, gdyż w praktyce wymagałoby to zakupu i wdrożenia wszystkich rozważanych systemów w celu porównania działania. Z kolei charakterystyki techniczne dostępnych systemów informatycznych są bardzo dobrze opisane, a dostawcy chętnie przedstawiają wszelkie aspekty proponowanych rozwiązań. Również dostępne są studia przypadków z funkcjonowania rozważanych systemów. Stąd, zgodnie z przyjętą metodologią oceny problemów decyzyjnych, przyjmuje się wysoki stopień poznania dla opisywanego problemu. Ostatnie analizowane elementy kontekstu sytuacji decyzyjnej to strategiczny charakter decyzji, wynikający z późniejszego wykorzystania systemu jako podstawowe źródło informacji decyzyjnej, a także implementacyjny cel rozważanej decyzji. Zgodnie z tym, co przedstawiono powyżej, kontekst opisywanej sytuacji decyzyjnej przedstawia się następująco.

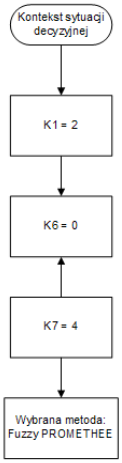
$$K = \{2, 1, 0, 1, 1, 0, 4, 0, 0\} \tag{5.43}$$

Zapis formalny problemu decyzyjnego przedstawiają wzory (5.44)–(5.48). Uporządkowana czwórka reprezentująca model problemu decyzyjnego zawarta jest we wzorze (5.49).

$$\begin{aligned}
C &= \{C_1, \ldots, C_5\} && (5.44)\\
W &= \{(4,5,5),(4,5,5),(3,4,5),\\
&\quad (2,3,4),(2,3,4),(3,4,5),\\
&\quad (1,2,3),(3,4,5),(1,2,3),\\
&\quad (3,4,5),(1,1,2),(2,3,4),\\
&\quad (2,3,4),(2,3,4)\} && (5.45)\\
P &= Q = V = U = \emptyset && (5.46)\\
K &= \{2,1,0,1,1,0,4,0,0\} && (5.47)\\
\Phi &= \{W, P, Q, V, U, K\} && (5.48)
\end{aligned}$$

$$(C, \Phi, A, \Psi) \tag{5.49}$$

Przeprowadzony dobór metody wielokryterialnej do sytuacji decyzyjnej wykonano zgodnie z kontekstem przedstawionym we wzorze 5.43. Aktywowane reguły przedstawia schemat 5.13.



Rysunek 5.13: Przykład 5: Aktywowane reguły drzewa decyzyjnego

Źródło: Opracowanie własne

Zgodnie z aktywowanymi regułami, wybrana zostaje metoda Fuzzy PROMETHEE, co jest wynikiem ekonomicznego charakteru decyzji, małej liczby wariantów decyzyjnych, a także wysokiego stopnia poznania sytuacji decyzyjnej przez decydenta.

Kolejnym etapem doświadczenia jest rozwiązanie problemu decyzyjnego przy pomocy dobranej metody wielokryterialnej. Obliczenia zostały wykonane zgodnie ze schematem Fuzzy PROMETHEE w implementacji wykonanej w ramach prac nad rozprawą, i opisanej w podrozdziale 5.3. Uzyskany ranking przedstawia wzór 5.50.

$$E \succ B \succ D \succ C \succ A \tag{5.50}$$

Rekomendowane zostało wdrożenie systemu oznaczona jako wariant decyzyjny E. Kontynuując doświadczenie obliczono rankingi porównawcze dla pozostałych dwóch rozważanych metod. Wyniki przedstawiają wzory 5.51 i 5.52, odpowiednio dla metod — Fuzzy TOPSIS i Fuzzy Kuo.

$$E \succ B \succ D \succ C \succ A \tag{5.51}$$

$$E \succ D \succ B \succ C \succ A \tag{5.52}$$

Wyniki metody Fuzzy TOPSIS są zgodne z wynikami uzyskanymi rekomendowaną metodą. Natomiast wynik metody Kuo wykazuje różnicę na drugim i trzecim miejscu rankingu. Analizując dane wejściowe można zauważyć, że metoda Kuo, oparta na podobnych pryncypiach do metody TOPSIS, wykorzystuje jednak inną miarę odległości od punktu idealnego. Stąd, zamiana miejsc wariantów D i B względem pozostałych metod. Inne miary dystansów powodują niewielkie różnice w interpretacji bilansu waga-wartość

atrybutu, co powoduje zmiany miejsc rankingowych w przypadku zbliżonych wariantów decyzyjnych.

Interpretacja wyników wykazuje, że uzyskanie tożsamych lub różnych rekomendacji w zależności od użytej metody wielokryterialnej, uzależnione jest zarówno od układu wag kryteriów, jak i od konfiguracji rozważanych wariantów decyzyjnych. Analizując drzewo decyzyjne służące do doboru metody, należy zwrócić uwagę na fakt, że wskazanie metody wielokryterialnej najlepiej dopasowanej do problemu jest wskazaniem przekształcenia najlepiej odzwierciedlającego oczekiwania decydenta. Wariant decyzyjny E charakteryzuje się dominującymi właściwościami w przeważającej liczbie atrybutów. Również analiza odległości od punktu idealnego stawia ten wariant jako wariant preferowany.

Powyższy przykład wykazuje, że różnice w rankingach wariantów decyzyjnych nie muszą wynikać z doboru innej szkoły wspomaga1nia decyzji (relacja przewyższania lub wartość użyteczności), ale może wynikać z konkretnych założeń przyjętych w wykorzystanej metodzie wielokryterialnej. Przykładem takiego założenia jest zastosowana miara dystansu, użyta do oceny odległości od punktu idealnego.

Wyniki eksperymentów potwierdzają słuszność obranego kierunku. Dobór metody na podstawie kontekstu sytuacji decyzyjnej pozwala na usprawnienie procesu decyzyjnego poprzez uwzględnienie szerszego horyzontu poszukiwań wariantów decyzyjnych i skrócenie procesu. Główna korzyść algorytmu to skrócenie czasu procesu decyzyjnego poprzez eliminację ręcznego przeszukiwania wariantów decyzyjnych, a także eliminacja oczekiwania na konsultację z analitykiem celem doboru metody wielokryterialnej. Właściwa metoda jest dobierana przy wykorzystaniu bazy wiedzy agenta.

Aspekt praktyczny proponowanego zastosowania agenta jest istotny dla poprawy konkurencyjności rynków, które są gotowe do obsługi agentów programowych. Regionalne administracje mogą zwiększyć swoje wsparcie dla inwestorów poprzez ułatwienie im poszukiwania terenów pod inwestycje. Co więcej, analiza zapytań do baz danych terenowych pozwala na wyciągnięcie wniosków o potrzebach przedsiębiorstw. Dane te są niezwykle wartościowe, natomiast przedsiębiorstwa niechętnie je publikują w obawie przed wykorzystaniem ich przez konkurencję.

Celem implementacji algorytmu w postaci agenta programowego jest konstrukcja systemu decyzyjnego, pozwalającego na masowe wspomaganie decyzji przy ograniczonej do niezbędnego minimum interakcji decydenta (i wymaganej pomocy analityka). Co więcej, zastosowanie agenta umożliwia zautomatyzowanie czynności wyszukiwania wariantów decyzyjnych w zdalnych lokalizacjach. W tabeli 5.10 przedstawiono analizę mocnych i słabych stron (analiza SWOT) zaprojektowanego agenta programowego.

Tabela 5.10: Analiza SWOT agenta programowego

Mocne strony	Szanse
— brak konieczności oczekiwania na interakcję z decydentem w celu doboru metody wielokryterialnej — automatyczny wybór metody wielokryterialnej umożliwia autonomiczne rozwiązanie modelu decyzyjnego — możliwość przeprowadzenie obliczeń w lokalizacji źródła danych (zdalnie względem decydenta)	— zastosowanie analizy text-mining dokumentów towarzyszących procesowi decyzyjnemu w celu pozyskiwania opisów wariantów decyzyjnych ze źródeł niestrukturyzowanych — wzrastające rozproszenie źródeł informacji decyzyjnej w sieci Internet uwypukli korzyści z zastosowania agenta — przeszukiwanie sformalizowanych struktur informacji zarządczej w przedsiębiorstwach (normy ISO, powszechne stosowanie hurtowni danych) pozwali na wykorzystanie ukrytej informacji do definiowania sytuacji decyzyjnych
Słabe strony	**Zagrożenia**
— dobór metody jest efektywny tylko dla kategorii sytuacji decyzyjnych opisanych w bazie wiedzy — nadal wymagany jest udział analityka w formalizacji opisu sytuacji decyzyjnej — w obecnej wersji wymaga ustrukturyzowanej postaci opisów wariantów decyzyjnych	— sytuacje decyzyjne mogą dotyczyć różnorodnych sytuacji, które nie będą przystawać do zawartości bazy wiedzy — nagłe i znaczące zmiany otoczenia uniemożliwią budowę i zastosowanie bazy wiedzy — brak zaufania decydenta do delegowania odpowiedzialności na agenta programowego

Źródło: Opracowanie własne.

5.6. Zastosowania dla zaproponowanego rozwiązania

Rozwiązanie zaprezentowane w rozprawie – składające się z agenta programowego (przedstawionego w bieżącym rozdziale, który wykorzystuje autorski algorytm (opisany w rozdziale 4) zostało utworzone pod wpływem przesłanek wynikających z istnienia wyróżnionej kategorii problemów decyzyjnych (ZWPW zdefiniowane w rozdziale 1).

Zadanie wspomagania decydenta w sytuacjach, gdy istotne jest dokładne przeszukanie rozproszonej przestrzeni źródeł danych i dobranie metody o wykazanym dopasowaniu do rozważanej sytuacji decyzyjnej, występuje w organizacjach gospodarczych, i niedopełnienie dowolnej z wymienionych czynności może spowodować poważne reperkusje zarówno w wymiarze kosztów, jak i działalności organizacji.

Przedstawiona literatura [47, 83, 59, 41, 137, 82] opisująca wielopłaszczyznowe i złożone problemy wykazuje, że proponowane rozwiązanie może znaleźć szerokie zastosowania, a przedstawione wytyczne mogą służyć budowie baz wiedzy dla różnych organizacji.

Przedstawiony agent decyzyjny przeznaczony jest do wspomagania decydenta w sytuacjach wyboru jednego z wielu wariantów decyzyjnych. Pomimo wykorzystania metod rangowania (problematyka γ), przyjęte uproszczenia dla przebiegu fazy eksploatacji sytuują agenta w klasie narzędzi wspomagających problemy wyboru (problematyka α).

Praktyczne zastosowanie algorytmu wymaga zbudowania bazy wiedzy o doborze metod wielokryterialnych w zależności od kontekstu sytuacji decyzyjnej. Co więcej, dobór ten musi wykazywać zależność od wybranych atrybutów opisu kontekstów sytuacji. Stąd, wskazane jest zastosowanie proponowanego rozwiązania w dużych organizacjach, gdzie nieustannie podejmowane są decyzje, a wszelkie operacje, w tym również decyzje, podlegają wytyczonym schematom.

W związku z powyższym, proponuje się zastosowanie algorytmu w organizacjach o sformalizowanej strukturze organizacyjnej i o rozproszonej strukturze informacyjnej. Połączenie dwóch wymienionych elementów stanowi środowisko pozwalające odnieść największe korzyści z agenta programowego wspomagającego rozwiązywanie ZWPW. Korzyści te wynikają z jednej strony z masowości występowania decyzji typu ZWPW (o znaczącym wpływie niekoniecznie na całą korporację, ale na przykład na wyniki komórki organizacyjnej), a z drugiej strony z krytycznej roli, jaką odgrywa możliwość szybkiego reagowania na bodźce otoczenia organizacji (a więc na szybkie podejmowanie decyzji).

Uwzględnienie obliczeń na danych lingwistycznych poszerza obszary zastosowań agenta na działania o niekompletnej lub uszkodzonej informacji. Podkreśla to rosnąca popularność badań nad zastosowaniem przetwarzania „miękkiego" w finansach [94].

Stąd, agent programowy pozwoli na przyspieszenie procesu decyzyjnego i zmniejszenie obciążenia decydenta i analityka przy podejmowaniu decyzji tam, gdzie opisy wariantów decyzyjnych z różnych względów nie mogą być przesyłane do komputera decydenta. Sytuacja taka występuję w przypadku decydenta korzystającego z urządzeń mobilnych, a także gdy kontakt z systemami przechowującymi opisy jest utrudniony lub kosztowny (na przykład, odległe lokalizacje na statkach morskich lub platformach wiertniczych). Trafniejszym podejściem w takiej sytuacji jest wysłanie kodu agenta, który może przeprowadzić obliczenia na miejscu, a transmisja przeprowadzana jest tylko dla kodu i danych agenta. Co ważne – dane agenta obejmują jedynie informację istotną z punktu widzenia procesu decyzyjnego, w miejsce znacznie obszerniejszego opisu wariantu decyzyjnego (jak to ma miejsce w przypadku statycznego zapytania SQL).

Podstawowym ograniczeniem zastosowania prezentowanego agenta – a zarazem i algorytmu – jest konstrukcja oparta o bazę wiedzy. Reguły decyzyjne dla doboru metody wielokryterialnej budowane są na podstawie danych historycznych. Stąd, otoczenie charakteryzujące się znaczną dynamiką i zmiennością znaczeń kontekstu nie pozwoli na efektywne wykorzystanie zaproponowanego narzędzia.

Występuję również grupa sytuacji, gdzie dodatkowy narzut operacyjny związany z wprowadzeniem opisu kontekstu sytuacji nie zostanie zrekompensowany znaczącym ułatwieniem procesu decyzyjnego. W sytuacjach o niewielkiej liczbie wariantów decyzyjnych, zadania: definiowania problemu, wprowadzenia wariantów decyzyjnych i dobrania metody wielokryterialnej, mogą zostać wykonane w ramach jednej sesji współpracy z analitykiem. Zastosowanie proponowanego algorytmu w takiej sytuacji nie tylko nie przyniesie oczekiwanych korzyści, ale też może obniżyć jakość doboru metody (zakładając nieomylność analityka i mniejszą niż 100% dokładność klasyfikacji reguł decyzyjnych).

Problemem nie uwzględnionym w implementacji agenta opisanej w rozprawie jest ewentualna niedostępność jednego z hostów. Zaprezentowane rozwiązanie zakłada dostępność wszystkich serwerów, zgodnie z listą w pliku konfiguracyjnym. Problem z przeniesieniem kodu do jednego z serwerów skutkuje zniszczeniem agenta. W celu uniknięcia utraty danych należałoby wprowadzić mechanizmy kopiowania kodu (kopia bezpieczeństwa) i mechanizm pomijania i powracania do niedostępnych hostów („skip and check later").

Szczególny kierunek dla zastosowania przedstawionego rozwiązania nakreślony został przez Roy'a w [126], gdzie przedstawiono charakterystyczną różnicę pomiędzy wspomaganiem decyzji, a innymi dziedzinami, gdzie osoba odpowiedzialna za proces posiłkuje się pomocą technika lub analityka. W przypadku podejmowania decyzji – ze względu na znaczną skalę konsekwencji procesu – istnieje tendencja do nieufności wobec analityka. Brak zaufania przejawia się w skromnym dawkowaniu informacji analitykowi, co utrudnia rzetelne wspomaganie procesu. Siłą proponowanego agenta jest brak bariery psychologicznej we wprowadzaniu danych do bezpiecznego (w założeniu) programu, które przeprowadzi proces analityczny uwzględniając wiedzę historyczną.

Zaproponowane rozwiązanie wspomoże rozwiązywanie problemów z kategorii ZWPW wszędzie tam, gdzie spełnione są warunki przedstawione w podrozdziale 5.6. Jedną z kategorii problemów kwalifikujących się do kategorii ZWPW są problemy wyboru lokalizacji. Dopasowanie metody wielokryterialnej często jest uzależnione od charakteru planowanej inwestycji. W przypadku jednostki logistycznej łatwiejsze jest przeliczanie korzyści i kosztów na parametry czasu i kosztu transportu [18, 110, 109]. Przeciwna sytuacja ma miejsce przy budowie ośrodków badawczych, gdzie dużo większe znaczenie mają parametry subiektywne, określające szeroko rozumianą „jakość pracy" („quality of work") [1]. Jeszcze inna sytuacja występuje przy budowie jednostek uciążliwych dla otoczenia, takich jak na przykład przetwórnie odpadów [106].

Badanie przedstawione w [62] wykazało, że wybór parametrów do podjęcia decyzji o lokalizacji jednostki logistycznej również może być zmienny w zależności od charakteru firmy (rodzaj kapitału, struktury organizacyjnej). Stąd, celowe jest prowadzenie badań – jak opisano w wymienionej pracy, a także w pracy [33] – i wykorzystanie wniosków do utworzenia bazy wiedzy dla rozwiązania agentowego, typu zaproponowanego w niniejszej rozprawie.

Kierunkiem dalszego rozwoju przedstawionego rozwiązania może być konstrukcja systemu wieloagentowego, gdzie każdy agent będzie miał za zadanie rozwiązania pewnego wybranego aspektu sytuacji decyzyjnej. Każdy agent zatem dobierze technikę rozwiązania złożonej sytuacji decyzyjnej zależnie od aspektu, który obejmuje jego obszar analizy. Wieloagentowe podejście do wspomagania decyzji zasygnalizowane zostało w pracy [16].

Zastosowanie systemów agentowych w planowaniu przestrzennym w pracy [40] potwierdza dopasowanie tej technologii do wspomagania decyzji związanych z gruntami.

Istnieją przykłady sukcesów odniesionych poprzez przydzielenie autonomii agentowi programowemu. Przykładowe studium przypadku przedstawione zostało w pracy [17], gdzie agent zarządza organizacją spotkań pracowników biura i uczestników projektów. Autorzy pracy zwrócili także uwagę na zagrożenia związane ze zbyt wysokim stopniem autonomii agenta w przypadku, gdy jego reguły nie są zgodne z preferencją właściciela.

Decyzje w złożonych organizacjach często podejmowane są przez ciała kolegialne, gdzie każdy decydent odpowiada za pewien obszar tematyczny decyzji. Tego typu sytuacje są również sprzyjające dla zastosowania agentów programowych do wspomagania procesu decyzyjnego [124].

Nowe trendy związane z wykorzystaniem wiedzy w funkcjonowaniu organizacji zostały zarysowane w literaturze w różnych kierunkach. W szczególności rozproszenie źródeł decyzyjnych i waga autonomicznego funkcjonowania agenta jest szczególnie wyraźna w działalności mobilnych pracowników. Konwencjonalny System Wspomagania Decyzji (DSS) zaproponowany w pracy [54] może zostać wzbogacony o dynamiczną konstrukcję modeli, zgodnie z propozycją przedstawioną w niniejszej rozprawie.

Zastosowanie wartości lingwistycznych można poszerzyć o zagadnienie wyszukiwania i eksploracji danych tak, jak zostało to zrealizowane w systemie zaprezentowanym w pracy [104]. Pozwoli to na przeszukiwanie nie tylko wewnątrzorganizacyjnej przestrzeni poszukiwań, ale również wyszukiwanie zewnętrznych źródeł danych z formatem informacji niespójnym z modelem danych organizacji – przy użyciu zapytań w języku naturalnym [71]. Także pozyskanie informacji od ekspertów jest łatwiejsze, gdy umożliwi się wyrażanie ocen w formie lingwistycznej [44].

Kolejnym aspektem wartym uwzględnienia w dalszych badaniach – zgodnie z w kierunkiem obranym w niniejszej rozprawie – jest włączenie analizy czynników konfliktowych [85] Taka sytuacja jest powszechna w decyzjach w przedsiębiorstwach.

Przedstawione w niniejszym rozdziale studium wykonalności pozwala na wnioskowanie o szerokich możliwościach zastosowania agenta zaproponowanego w rozprawie. Należy przy tym uwzględnić nie tylko przedstawione ograniczenia, ale też dodatkową pracę wynikającą z konieczności skonstruowania bazy wiedzy kontekstowej. Wynika stąd potrzeba analizy dwóch aspektów ewentualnego zastosowania agenta. Pierwszym aspektem jest spektrum zastosowań wynikające z ograniczeń rozwiązania, drugim aspektem natomiast jest racjonalność zastosowania, wynikająca z analizy bilansu kosztów i korzyści wdrażania proponowanego podejścia do wspomagania decyzji.

Zakończenie

Zaproponowane w rozprawie rozwiązanie, na które składa się algorytm doboru metody wielokryterialnej (rozdział 4) i jego implementacja w formie agenta programowego (rozdział 5), odpowiada na motywację przedstawioną we wstępie pracy i pozwala na wspomaganie decydenta w warunkach rozproszonej i niedoprecyzowanej informacji preferencyjnej. Przedstawiony algorytm umożliwia dobór metody dopasowanej do rozważanej sytuacji decyzyjnej, przed którą stoi decydent. Przytoczona w rozprawie literatura na temat złożonych problemów decyzyjnych (między innymi pozycje [47, 83, 59, 41, 137, 82]) wykazuje szeroką aplikowalność proponowanego rozwiązania, a niniejsza praca może stanowić zbiór wytycznych dla budowy bazy wiedzy w konkretnej organizacji, zgodnie ze schematem zaproponowanym dla literatury naukowej.

We wstępie pracy podstawiono następującą tezę: *Wspomaganie decyzji z zastosowaniem danych lingwistycznych i zestawu metod wielokryterialnych będzie miało formę bliższą językowi naturalnemu, a wynik będzie lepiej dopasowany do przebiegu rzeczywistego procesu decyzyjnego.*

Algorytm doboru metody wielokryterialnej, który został opracowany w ramach prac nad niniejszą rozprawą, a następnie zaimplementowany w formie agenta programowego, wykazał słuszność postawionej tezy. Przeprowadzone eksperymenty dowiodły poprawności obranych założeń. **Dobór metody wielokryterialnej dokonany przez agenta zdalnie przeszukującego przestrzeń decyzyjną powala na przeprowadzenie obliczeń procesu decyzyjnego bez interakcji z decydentem lub analitykiem. Praktyczną korzyścią z takiego podejścia jest wyeliminowanie opóźnień i umożliwienie podjęcia właściwej decyzji na czas.**

Zastosowanie metod wielokryterialnych do wspomagania decyzji wynika z potrzeby uzyskania wiarygodnej informacji o wzajemnym przewyższaniu wariantów decyzyjnych w sytuacji, gdy wzajemna relacja jest różna dla różnych kryteriów: wariant a wykazuje lepsze wartości dla pewnej podgrupy kryteriów, podczas gdy dla innej podgrupy wariant b charakteryzuje się bardziej pożądanymi wartościami. Stąd, celem metod MCDA jest wspomaganie decydenta w podjęciu lepszej decyzji w sytuacji, gdy nie jest możliwa samodzielna ocena dostępnych opcji [127].

Opracowanie autorskiego podejścia do automatyzacji procesu decyzyjnego w sposób umożliwiający zastosowanie algorytmu w środowisku rozproszonym, wymagało uniezależnienia procesu decyzyjnego od ciągłej współpracy z analitykiem. Wynikła z tego konieczność opracowania bazy wiedzy zawierającej reguły decyzyjne stanowiące o doborze metody wielokryterialnej do rozwiązania sytuacji decyzyjnej na podstawie kontekstu analizowanej decyzji. Wyjście z analizą sytuacji decyzyjnej poza strukturę macierzy decyzyjnej jest działaniem rzadko spotykanym w obszarze informatycznego wspomagania decyzji, aczkolwiek praktykowanym [52, 53]. Także Roy podkreśla istotę *przekonywującego* [126, s. 28] przedstawienia rekomendacji decydentowi.

Metody wielokryterialne znalazły uznanie zarówno wśród badaczy – ze względu na

ich solidne umocowanie teoretyczne, jak wśród i praktyków – ze względu na ich efektywność. Zastosowanie odkrywania wiedzy przy pomocy technik data mining pozwoliło na identyfikację czynników istotnych dla doboru metody wielokryterialnej do zadanego problemu decyzyjnego. Uwzględnienie przedstawionych czynników, wraz z charakterem dostępnej informacji decyzyjnej, zapewnia dobór metody wskazanej jako właściwa dla sytuacji decyzyjnej podlegającej wspomaganiu. Wymienione działania pozwoliły na osiągnięcie przedstawionego we wstępie celu pracy:

Konstrukcja algorytmu umożliwiającego dobór decyzyjnych metod wielokryterialnych (operujących również na danych rozmytych i lingwistycznych) na potrzeby pracy w środowisku internetowym agentów programowych. Problem wyboru oparto na architekturze drzew decyzyjnych.

W aspekcie formalizacji procesu decyzyjnego, przewagą proponowanego podejścia jest przeprowadzenie przekształceń w sposób zgodny z kontekstem zadanej sytuacji decyzyjnej i niezależny od dostępności decydenta (a także analityka). Zastosowane podejście umożliwia włączenie czasochłonnego przeszukiwania rozproszonej przestrzeni decyzyjnej do procesu decyzyjnego w sposób nie angażujący czasu decydenta. Specyfikacja sytuacji decyzyjnej i opisy wariantów decyzyjnych mogą być dostępne w formie nieostrej, co zostanie uwzględnione przy doborze metody wielokryterialnej, a włączenie metod rozmytych do implementacji agenta pozwala na przeprowadzenie obliczeń na danych tego typu.

Przedstawione powyżej dopasowanie dobranej metody do sytuacji decyzyjnej, w szczególności do jej zewnętrznych uwarunkowań, jest działaniem uwzględniającym wysoką wagę tego dopasowania, zaznaczoną w [98]. Umożliwienie decydentowi uzasadnienia tego wyboru jest istotne w kontekście ewentualnej kontroli decydenta przez stosowne służby w organizacji (dział controllingu) lub jednostki zewnętrzne (firma audytorska, urzędy kontroli). Problem formalnego uzasadnienia podjętej decyzji przedstawiono w [35]. Co więcej, dobór metody dokonywany jest autonomicznie – bez konieczności interakcji ze strony decydenta lub analityka. Autonomia procesu obejmuje także poszukiwanie wariantów decyzyjnych $\tilde{A}$ i wyznaczenie kompletnego zasobu informacyjnego definiującego problem decyzyjny.

W pracy uwzględniono nieprecyzję opisów, co wpasowuje pracę w szerszy trend zmiękczania obliczeń (*soft computing*). Trend ten polega na wykorzystanie nieostrych, lingwistycznych lub niedeterministycznych wartości do wykonywania operacji obliczeniowych na sposoby nieobejmowane przez klasyczną arytmetykę [105]. Motywacją do obrania tego kierunku jest perspektywiczność obliczeń z zastosowaniem danych wyrażonych w sposób naturalny dla człowieka [102]. Tak więc osiągnięcie celu pracy wymagało udostępnienia możliwości wykorzystania danych nieprecyzyjnych w informacji decyzyjnej, a także przedstawiania rekomendacji zgodnie z percepcją decydenta.

Praca posiada charakter metodologiczny i stosowany. Metodologiczny charakter rozprawy polega na przedstawieniu w sposób formalny techniki doboru metody wielokryterialnej do wspomagania sytuacji decyzyjnej z uwzględnieniem jej kontekstu. Charakter stosowany nadaje pracy opracowanie narzędzia wykorzystującego wspomnianą technikę do wykazania słuszności tezy pracy.

Elementy nowości zawarte w rozprawie skupiają się wokół dwóch głównych obszarów: formalizacji doboru metody wielokryterialnej i rozproszenia niedoprecyzowanej informacji decyzyjnej. Poszczególne elementy należące do wymienionych obszarów przedstawiono poniżej:

— dokonano formalizacji procesu decyzyjnego w zakresie uwzględniającym otoczenie sytuacji decyzyjnej,
— skonstruowano autonomiczny algorytm doboru metody wielokryterialnej najlepiej dopasowanej do analizowanej sytuacji decyzyjnej,
— wykorzystano literaturę naukową jako wiarygodne źródło wiedzy do konstrukcji reguł decyzyjnych,
— opracowany algorytm pozwala na aplikację w formie agenta programowego funkcjonującego w rozproszonym środowisku danych,
— wykonano prototyp agenta programowego pozwalającego na autonomiczne podejmowanie decyzji w środowisku rozproszonym.

Rezultaty badań wspierają współczesne trendy w zarządzaniu organizacji, w szczególności rozproszenie źródeł informacji decyzyjnej i rosnącą popularność autonomicznych agentów działających w imieniu mobilnych pracowników. Właśnie wykorzystanie wiedzy o zachowaniu organizacji do zautomatyzowania procesu decyzyjnego jest zasadniczym zadaniem algorytmu. Przemawia za tym postępujące rozproszenie źródeł decyzyjnych i czasochłonność procesu poszukiwania opisów wariantów decyzyjnych. Prowadzi to do potrzeby automatyzacji tego procesu, na którą odpowiada algorytm przedstawiony w rozprawie.

Zastosowanie proponowanego podejścia pozwala na usprawnienie działania wielu funkcjonujących Systemów Wspomagania Decyzji (DSS), takich jak przykład przedstawiony w [54], który może zostać wzbogacony o dynamiczną konstrukcję modeli.

Należy mieć przy tym na uwadze zasadnicze ograniczenie proponowanego rozwiązania, które wynika z obranej metodologii budowy bazy wiedzy. Zastosowanie agenta do doboru metody wielokryterialnej wymaga cyklu uczenia się agenta, kiedy jest budowana baza wiedzy. Schemat budowy bazy wiedzy, przedstawiony na rysunku 4.4, pozwala na powtarzalność procesu i na budowę narzędzia podejmowania decyzji z różnych dziedzin. Dokonany wybór agenta programowego jako technika implementacji algorytmu, spowodował konieczność wyodrębnienia fazy interaktywnej i fazy autonomicznej algorytmu. Podział ten pozwala na skrócenie czasu od definicji problemu decyzyjnego do pozyskania rekomendacji, a także zmniejsza pracochłonność całego procesu.

Kolejny czynnik stanowiący o ograniczeniu stosowalności proponowanego rozwiązania nie wynika z charakterystyki samego algorytmu, ale jest czynnikiem psychologicznym. Jest to problem zaufania do agenta i obawy przed zagrożeniami wynikającymi ze zbyt wysokiego stopnia autonomii udzielonej agentowi. Problem ten zasygnalizowano w [17], gdzie błędne decyzje agenta mogą sprowadzić dodatkowe koszty na użytkowników lub zdezorganizować pracę biura.

Dalsze badania nad rozwojem proponowanego rozwiązania powinny pójść w dwóch kierunkach. Pierwszym kierunkiem jest dekompozycja sytuacji decyzyjnej tak, aby różne aspekty pojedynczej sytuacji mogły być rozwiązane przy pomocy innych metod MCDA i przy pomocy dedykowanych agentów. Kierunek ten byłby zgodny z propozycją wieloagentowego wspomagania decyzji, opisaną w [16] i [124]. Drugim kierunkiem badań byłby dalszy rozwój praktycznej stosowalności rozwiązania poprzez wykorzystanie doświadczeń z funkcjonujących rozwiązań agentowych, takich jak, między innymi, system agentowy w planowaniu przestrzennym opisany w [40] lub agent zarządzający organizacją spotkań biurowych opisany w [17]. Na praktyczną aplikowalność przedstawionego agenta pozytywnie wpłynie również dalsze uwzględnianie obliczeń na wartościach lingwistycznych. Włączenie zagadnienia wyszukiwania i eksploracji danych tak, aby możliwe było

wyszukiwanie zewnętrznych źródeł danych zgodnie z propozycją z [104], umożliwienie formułowania zapytań w języku naturalnym, jak proponuje to Kacprzyk w [71], a także pozyskiwanie wiedzy eksperckiej wyrażonej w formie ocen lingwistycznych [44], pozwolą na skuteczne zastosowanie agenta dobierającego metodę wielokryterialną w środowisku niedoprecyzowania informacji preferencyjnej w wielu obszarach praktycznych.

Współczesne funkcjonowanie organizacji, tak jak i życie indywidualności, wypełnione jest decyzjami. Są to zarówno decyzje w mikroskali, jak i o poziomie strategicznym – wpływającym na „być albo nie być" organizacji, czy na życie człowieka. Dokonanie wyboru, którego implementacja przyniesie największą korzyść decydentowi, jest wynikiem uwzględnienia możliwie rozległej przestrzeni poszukiwań wariantów decyzyjnych, a także zastosowania obliczeń zgodnych z rozumieniem problemu przez decydenta. Niniejsza rozprawa stanowi wkład w niezwykle obiecującą dziedzinę zastosowania agentów programowych. Badania autora opisane w artykułach [118, 119], przedstawiają jeden z kierunków praktycznego zastosowania wyników badań opisanych w rozprawie. Proponowany obszar zastosowań, to poprawa konkurencyjności rynków, które są gotowe na obsługę agentów programowych. Instytucje samorządowe mogą zwiększyć swoje wsparcie dla inwestorów poprzez ułatwienie im poszukiwania terenów pod inwestycje przy pomocy agentów programowych.

Bibliografia

[1] Aarhus, K. Office location decisions, modal split and the environment: the ineffectiveness of norwegian land use policy. Journal of Transport Geography 8 (Dec. 2000), 287–294.

[2] Alarcon, M., Grau, J., and Torres, J. Application of ELECTRE I method to restoration actions in telecommunication network maintenance. In Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on (2007), pp. 3430–3434.

[3] AllBusiness. allbusiness.com.

[4] Almeida, A. Multicriteria Modelling of Repair Contract Based on Utility and ELECTRE I Method with Dependability and Service Quality Criteria. Annals of Operations Research 138 (2005), 113–126.

[5] Almeida Ribeiro, R. Fuzzy multiple attribute decision making: A review and new preference elicitation techniques. Fuzzy Sets and Systems 78 (Mar. 1996), 155–181.

[6] Anagnostopoulos, K., Doukas, H., and Psarras, J. A linguistic multicriteria analysis system combining fuzzy sets theory, ideal and anti-ideal points for location site selection. Expert Systems with Applications In Press, Corrected Proof.

[7] Anand Raj, P. Multicriteria methods in river basin planning - a case study. Water Science and Technology 31 (1995), 261–272.

[8] Araz, C., and Ozkarahan, I. Supplier evaluation and management system for strategic sourcing based on a new multicriteria sorting procedure. International Journal of Production Economics 106 (Apr. 2007), 585–606.

[9] Artificial Knowledge Interface for Reasoning Applications. http://www.akira-project.org/.

[10] Augusto, M., Lisboa, J., Yasin, M., and Figueira, J. Benchmarking in a multiple criteria performance context: An application and a conceptual framework. European Journal of Operational Research 184 (2008), 244–254.

[11] Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukias, A., and Vincke, P. Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria. 2006.

[12] Brans, J., and Mareschal, B. Promethee methods, 2005.

[13] Brans, J., and Vincke, P. A preference ranking organisation method. Management Science 31 (June 1985), 647–656.

[14] Brans, J., Vincke, P., and Mareschal, B. How to select and how to rank projects: The method. European Journal of Operational Research 24 (Feb. 1986), 228–238.

[15] Buchanan, J., and Vanderpooten, D. Ranking projects for an electricity utility using ELECTRE III. International Transactions in Operational Research 14 (2007), 309–323.

[16] Bui, T., and Lee, J. An agent-based framework for building decision support systems. Decision Support Systems 25 (Apr. 1999), 225–237.

[17] Chalupsky, H., Gil, Y., Knoblock, C., Lerman, K., Oh, J., Pynadath, D., Russ, T., and Tambe, M. Electric elves: Applying agent technology to support human organizations. AAAI Press, pp. 51–58.

[18] Chan, Y. Location, Transport and Land-Use. Springer, 2005.

[19] Chen, C. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. Fuzzy Sets and Systems 114 (Aug. 2000), 1–9.

[20] Chen, C. A fuzzy approach to select the location of the distribution center. Fuzzy Sets and Systems 118 (Feb. 2001), 65–73.

[21] Chen, D.-N., Jeng, B., Lee, W.-P., and Chuang, C.-H. An agent-based model for consumer-to-business electronic commerce. Expert Systems with Applications 34 (2008), 469–481.

[22] Cheng, C., Yang, K., and Hwang, C. Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight. European Journal of Operational Research 116 (July 1999), 423–435.

[23] Chmiel, K., Tomiak, D., Gawinecki, M., Karczmarek, P., Szymczak, M., and Paprzycki, M. Testing the efficiency of JADE agent platform. In Parallel and Distributed Computing, 2004. Third International Symposium on/Algorithms, Models and Tools for Parallel Computing on Heterogeneous Networks, 2004. Third International Workshop on (2004), pp. 49–56.

[24] Chu, M.-T., Shyu, J., Tzeng, G.-H., and Khosla, R. Comparison among three analytical methods for knowledge communities group-decision analysis. Expert Systems with Applications 33 (Nov. 2007), 1011–1024.

[25] Chu, T., and Lin, Y. A fuzzy TOPSIS method for robot selection. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 21 (Feb. 2003), 284–290.

[26] Chu, T.-C. Facility location selection using fuzzy topsis under group decisions. Int. J. Uncertain. Fuzziness Knowl.-Based Syst. 10 (2002), 687–701.

[27] Clímaco, J., and Craveirinha, J. Multicriteria analysis in telecommunication network planning and design — problems and issues, 2005.

[28] DARPA Agent Markup Language Program. http://www.daml.org/.

[29] de Almeida, A. Multicriteria decision model for outsourcing contracts selection based on utility function and ELECTRE method. Computers & Operations Research 34 (Dec. 2007), 3569–3574.

[30] De Ville, B. Decision Trees for Business Intelligence and Data Mining: Using SAS Enterprise Miner. SAS Publishing, Oct. 2006.

[31] Deng, Y., Xiong, J., and Fu, P. Airline Safety Evaluation Based on Fuzzy TOPSIS. 2007, pp. 282–287.

[32] Diakoulaki, D., Antunes, C., and Gomes Martins, A. MCDA and energy planning, 2005.

[33] Doeringer, P., Evans-Klock, C., and Terkla, D. What attracts high performance factories? management culture and regional advantage. Regional Science and Urban Economics 34 (Sept. 2004), 591–618.

[34] Dong, C., and Loo, G. Flexible Web-Based Decision Support System Generator (FWDSSG) utilising software agents. dexa 00 (2001), 0892.

[35] Dyer, J. Maut — Multiattribute Utility Theory, 2005.

[36] e Costa, B., Corte, and Vansnick. On the mathematical foundation of MACBETH, 2005.

[37] e Costa, C., De Corte, J., and Vansnick, J. MACBETH.

[38] Ertuĝrul, I., and Karakaşoĝlu, N. Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods for facility location selection. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2007).

[39] Escobar-Toledo, C., and López-García, B. The use of multicriteria decision aid system in the information technology (IT) allocation problem. Operational Research: An International Journal 5 (2005).

[40] Ettema, D., Jong, K., Timmermans, H., and Bakema, A. PUMA : Multi-Agent Modelling Of Urban Systems. 2007, pp. 237–258.

[41] Feick, R., and Hall, G. Balancing consensus and conflict with a GIS-based multi-participant, multi-criteria decision support tool. GeoJournal 53 (Apr. 2001),

391–406.

[42] Figueira, J., Mousseau, V., and Roy, B. ELECTREE Methods, 2005.

[43] Franklin, S., and Graesser, A. Is It an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents. 1997, pp. 21–35.

[44] Garcia-Cascales, M. S., and Lamata, M. T. Solving a decision problem with linguistic information. Pattern Recognition Letters 28 (Dec. 2007), 2284–2294.

[45] Geldermann, J., Spengler, T., and Rentz, O. Fuzzy outranking for environmental assessment. case study: iron and steel making industry. Fuzzy Sets and Systems 115 (Oct. 2000), 45–65.

[46] Ghyym, S. H. A semi-linguistic fuzzy approach to multi-actor decision-making: Application to aggregation of experts' judgments.

[47] Gomes, E., and Lins, M. Integrating Geographical Information Systems and Multi-Criteria Methods: A Case Study. Annals of Operations Research 116 (Oct. 2002), 243–269.

[48] Goumas, M., and Lygerou, V. An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. European Journal of Operational Research 123 (June 2000), 606–613.

[49] Grabisch, M., and Labreuche, C. Fuzzy Measures and Integrals in MCDA, 2005.

[50] grul, I. E., and s, G. Fuzzy multi-criteria decision making method for machine selection, 2007.

[51] Grzegorzewski, P. Wspomaganie decyzji w warunkach niepewności. Metody statystyczne dla nieprecyzyjnych danych. EXIT, Warszawa, 2006.

[52] Guitouni, A., and Martel, J. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. European Journal of Operational Research 109 (Sept. 1998), 501–521.

[53] Guitouni, A., Martel, J., and Vincke, P. A Framework to Choose a Discrete Multicriterion Aggregation Procedure.

[54] Gupta, J., Forgionne, G., and Mora T., M. Intelligent Decision-making Support Systems. 2006.

[55] Główny Urząd Statystyczny. Informacja o sytuacji społeczno-gospodarczej kraju, 2008.

[56] He, M., and Leung, H. Agents in E-Commerce: State of the art. Knowledge and Information Systems 4 (July 2002), 257–282.

[57] Henderson-Sellers, B., and Giorgini, P. Agent-Oriented Methodologies. IGI Publishing, Sydney, 2005.

[58] Hess, T., Rees, L., and Rakes, T. Using autonomous software agents to create the next generation of decision support systems*. Decision Sciences 31 (Mar. 2000), 1–31.

[59] Hill, M. J., Braaten, R., Veitch, S. M., Lees, B. G., and Sharma, S. Multi-criteria decision analysis in spatial decision support: the ASSESS analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis. Environmental Modelling & Software 20 (July 2005), 955–976.

[60] Ho, W., and Yew, B. A fuzzy characterization process for interactive multicriteria decision making. IEEE Computer Society, p. 234.

[61] Hokkanen, J., and Salminen, P. ELECTRE III and IV Decision Aids in an Environmental Problem. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis 6 (1997), 215–226.

[62] Hong, J. Transport and the location of foreign logistics firms: The Chinese experience. Transportation Research Part A: Policy and Practice 41 (July 2007), 597–609.

[63] Hsu, H., and Chen, C. Fuzzy credibility relation method for multiple criteria decision-making problems. Information Sciences 96 (1997), 79–91.

[64] Huang, W., Chien-Hua, C., and Keelung, T. Using the ELECTRE II method to apply and analyze the differentiation theory. Proceedings of the Eastern Asia Society

for Transportation Studies 5 (2005), 2237–2249.
[65] IBM. http://www.trl.ibm.com/aglets.
[66] IEEE Foundation for Intelligent Physical Agents. http://www.fipa.org/.
[67] Indy Project. http://www.indyproject.org/.
[68] Inuiguchi, M. Multiple Objective Linear Programming with Fuzzy Coefficients, 2005.
[69] Java Agent DEvelopment Framework. http://jade.tilab.com/.
[70] Johansen, D., van Renesse, R., and Schneider, F. Supporting broad internet access to TACOMA. ACM, pp. 55–58.
[71] Kacprzyk, J., and Zadrozny, S. Computing with words in intelligent database querying: standalone and internet-based applications. Information Sciences 134 (May 2001), 71–109.
[72] Kaliszewski, I. Soft Computing For Complex Multiple Criteria Decision Making. 2006.
[73] Kangas, A., Kangas, J., and Pykaelaeinen, J. Outranking methods as tools in strategic natural resources planning. Silva Fennica 35 (2001), 215–227.
[74] Karagiannidis, A., and Moussiopoulos, N. Application of ELECTRE III for the integrated management of municipal solid wastes in the Greater Athens Area. European Journal of Operational Research 97 (Mar. 1997), 439–449.
[75] Kuo, M., Wu, J., and Pei, L. A soft computing method for selecting evaluation criteria of service quality. Applied Mathematics and Computation 189 (June 2007), 241–254.
[76] Kuo, M.-S., Liang, G.-S., and Huang, W.-C. Extensions of the multicriteria analysis with pairwise comparison under a fuzzy environment. International Journal of Approximate Reasoning 43 (Dec. 2006), 268–285.
[77] Laclavik, M. http://agentowl.sourceforge.net/.
[78] Le Téno, J. F., and Mareschal, B. An interval version of PROMETHEE for the comparison of building products' design with ill-defined data on environmental quality. European Journal of Operational Research 109 (Sept. 1998), 522–529.
[79] Lea, B., Gupta, M., and Yu, W. A prototype multi-agent ERP system: an integrated architecture and a conceptual framework. Technovation 25 (Apr. 2005), 433–441.
[80] Leszczyna, R. Anonymity Architecture for Mobile Agent Systems. 2007, pp. 93–103.
[81] Li, D. Compromise ratio method for fuzzy multi-attribute group decision making. Applied Soft Computing 7 (June 2007), 807–817.
[82] Lin, H.-Y., Hsu, P.-Y., and Sheen, G.-J. A fuzzy-based decision-making procedure for data warehouse system selection. Expert Systems with Applications 32 (Apr. 2007), 939–953.
[83] Linkov, I., Varghese, A., Jamil, S., Seager, T., Kiker, G., and Bridges, T. Multi-Criteria Decision Analysis: A Framework for Structuring Remedial Decisions at Contaminated Sites. 2005, pp. 15–54.
[84] López-Ortega, O. Java Fuzzy Kit (JFK): A shell to build fuzzy inference systems according to the generalized principle of extension. Expert Systems with Applications 34 (2008), 796–804.
[85] Losa, F., and Belton, V. Combining MCDA and conflict analysis: an exploratory application of an integrated approach. Journal of the Operational Research Society 57 (May 2006), 510–525.
[86] Louw, E. Accommodation as a location factor for office organisations: Implications for location theory. Journal of Housing and the Built Environment 13 (Dec. 1998), 477–494.
[87] Ma, J., Ruan, D., Xu, Y., and Zhang, G. A fuzzy-set approach to treat determinacy and consistency of linguistic terms in multi-criteria decision making. International Journal of Approximate Reasoning 44 (Feb. 2007), 165–181.
[88] Marek, S. Elementy nauki o przedsiębiorstwie. ECONOMICUS, Szczecin, 2001.

[89] Martel, J., and Matarazzo, B. Other outranking approaches, 2005.
[90] Martin, J. An exact probability metric for decision tree splitting and stopping. Machine Learning 28 (1997), 257–291.
[91] Martín, J. M., Fajardo, W., Blanco, A., and Requena, I. Constructing linguistic versions for the multicriteria decision support systems preference ranking organization method for enrichment evaluation i and ii. International Journal of Intelligent Systems 18 (2003), 711–731.
[92] Meyer, P., and Roubens, M. Choice, Ranking and Sorting in Fuzzy Multiple Criteria Decision Aid, 2005.
[93] Milani, A. S., Shanian, A., and El-Lahham, C. Using different ELECTRE methods in strategic planning in the presence of human behavioral resistance. Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences 2006 (2006).
[94] Mochón, A., Quintana, D., Sáez, Y., and Isasi, P. Soft computing techniques applied to finance. Applied Intelligence.
[95] Moffett, A., and Sarkar, S. Incorporating multiple criteria into the design of conservation area networks: a minireview with recommendations. Diversity and Distributions 12 (Mar. 2006), 125–137.
[96] Moshkovich, H., Mechitov, A., and Olson, D. Verbal Decision Analysis, 2005.
[97] Mousseau, V., Słowiński, R., and Zielniewicz, P. A user-oriented implementation of the ELECTRE-TRI method integrating preference elicitation support. Computers & Operations Research 27 (June 2000), 757–777.
[98] Munda, G. Multiple criteria decision analysis and sustainable development, 2005.
[99] Munda, G. A NAIADE based approach for sustainability benchmarking. International Journal of Environmental Technology and Management 6 (2006), 65–78.
[100] Murthy, S. Automatic construction of decision trees from data: A multi-disciplinary survey. Data Mining and Knowledge Discovery 2 (Dec. 1998), 345–389.
[101] Nickel, S., Puerto, J., and Rodríguez-Chía, A. MCDM location problems, 2005.
[102] Nikravesh, M. Evolution of fuzzy logic: from intelligent systems and computation to human mind. Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications 12 (2008), 207–214.
[103] Nikravesh, M., and Choi, D. Soft computing for perception based information processing, 2005.
[104] Nikravesh, M., Zadeh, L., and Kacprzyk, J. Soft Computing for Information Processing and Analysis. 2005.
[105] Niskanen, V. A. A soft multi-criteria decision-making approach to assessing the goodness of typical reasoning systems based on empirical data. Fuzzy Sets and Systems 131 (Oct. 2002), 79–100.
[106] Norese, M. F. ELECTRE III as a support for participatory decision-making on the localisation of waste-treatment plants. Land Use Policy 23 (2006), 76–85.
[107] Nowak, L., and Przybysz, P. Marksizm, liberalizm, próby wyjścia.
[108] Nowak, M. Preference and veto thresholds in multicriteria analysis based on stochastic dominance. European Journal of Operational Research 158 (Oct. 2004), 339–350.
[109] Ogryczak, W. On the distribution approach to location problems. Computers & Industrial Engineering 37 (Nov. 1999), 595–612.
[110] Ogryczak, W. Inequality measures and equitable approaches to location problems. European Journal of Operational Research 122 (Apr. 2000), 374–391.
[111] Opricovic, S., and Tzeng, G.-H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. European Journal of Operational Research 178 (Apr. 2007), 514–529.

[112] Oussalah, M., and Schutter, J. Approximated fuzzy LR computation. Information Sciences 153 (July 2003), 155–175.
[113] Ozerol, G., and Karasakal, E. A Parallel between Regret Theory and Outranking Methods for Multicriteria Decision Making Under Imprecise Information.
[114] Öztürk, M., Tsoukiàs, A., and Vincke, P. Preference modelling, 2005.
[115] Peine, H., and Stolpmann, T. The architecture of the ara platform for mobile agents. 1997, pp. 50–61.
[116] Pham, V., and Karmouch, A. Mobile software agents: an overview. Communications Magazine, IEEE 36 (1998), 26–37.
[117] Piegat, A. Are linguistic evaluations used by people of possibilistic or probabilistic nature?, 2004.
[118] Piotrowski, Z., and Wątróbski, J. A decision aiding software agent under condition of lack of cooperation from analyst. Studia i materiały polskiego stowarzyszenia zarządzania wiedzą 16 (2008), 134–141.
[119] Piotrowski, Z., Wątróbski, J., and Piwowarski, M. Strategy for choosing a suitable MCDA method for a given decision situation. Polish Journal of Environmental Studies 17 (2008), 330–335.
[120] Pistolesi, G. MicroDEMON: A Decision-making Intelligent Assistant for Mobile Business. 2006, pp. 237–254.
[121] PricewaterhouseCoopers. Automotive industry investment and location drivers: Focus on sweden, 2005.
[122] Rao, R., and Davim, J. A decision-making framework model for material selection using a combined multiple attribute decision-making method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 35 (2008), 751–760.
[123] Recursion Software, Inc. http://www.recursionsw.com/products/voyager.html.
[124] Rigopoulos, G., Psarras, J., Karadima, N., and Orsoni, A. Facilitating group decisions through multicriteria analysis and agent based modeling. Modelling & Simulation, 2007. AMS'07. First Asia International Conference on (2007), 533–538.
[125] Rogers, M., and Bruen, M. Choosing realistic values of indifference, preference and veto thresholds for use with environmental criteria within ELECTRE. European Journal of Operational Research 107 (June 1998), 542–551.
[126] Roy, B. Wielokryterialne wspomaganie decyzji. WNT, Warszawa, 1990.
[127] Roy, B. Paradigms and challenges, 2005.
[128] Saaty, T. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. Manage. Sci 32 (1986), 841–855.
[129] Saaty, T. How to make a decision: The analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research 48 (Sept. 1990), 9–26.
[130] Saaty, T. The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making, 2005.
[131] Sandri, S., Sibertin-Blanc, C., and Torra, V. A multicriteria fuzzy system using residuated implication operators and fuzzy arithmetic, 2007.
[132] SAS Institute. http://www.sas.com/.
[133] Shanian, A., and Savadogo, O. A non-compensatory compromised solution for material selection of bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) using ELECTRE IV. Electrochimica Acta 51 (July 2006), 5307–5315.
[134] Siskos, Y., Grigoroudis, E., and Matsatsinis, N. UTA methods, 2005.
[135] Spronk, J., Steuer, R., and Zopounidis, C. Multicriteria Decision Aid/Analysis in Finance, 2005.
[136] Stewart, T. Dealing with Uncertainties in MCDA, 2005.
[137] Tavares-Pereira, F., Figueira, J., Mousseau, V., and Roy, B. Multiple criteria districting problems. Annals of Operations Research 154 (Oct. 2007), 69–92.

[138] Tromso And COrnell Moving Agents. http://www.cs.uit.no/ forskning/dos/ tacoma/index.html.

[139] Tryllian Solutions B.V. http://www.tryllian.org/.

[140] Tsoukiás, A. On the concept of decision aiding process. Annals of Operations Research. To appear, 2003–38.

[141] Wan, Y. A New Paradigm for Developing Intelligent Decision-making Support Systems (i-DMSS): A Case Study on the Development of Comparison-Shopping Agents. 2006, pp. 147–165.

[142] Wang, J.-J., and Yang, D.-L. Using a hybrid multi-criteria decision aid method for information systems outsourcing. Computers & Operations Research 34 (Dec. 2007), 3691–3700.

[143] Wang, X., and Triantaphyllou, E. Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some ELECTRE methods. Omega 36 (Feb. 2008), 45–63.

[144] Wang, Y., and Elhag, T. Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment. Expert Systems with Applications 31 (Aug. 2006), 309–319.

[145] Wei, C.-C., Chien, C.-F., and Wang, M.-J. J. An AHP-based approach to ERP system selection. International Journal of Production Economics 96 (Apr. 2005), 47–62.

[146] Węglarz, J. Informatyka jako dyscyplina a wizja społeczeństwa informacyjnego. Pro Dialog 7 (1998), 1–9.

[147] Wong, D., Paciorek, N., Walsh, T., DiCelie, J., Young, M., and Peet, B. Concordia: An infrastructure for collaborating mobile agents. Proceedings of the First International Workshop on Mobile Agents 97 (1997), 86Â–97.

[148] Wong, J., and Mikler, A. Intelligent mobile agents in large distributed autonomous cooperative systems. Journal of Systems and Software 47 (July 1999), 75–87.

[149] Xu, Z. Incomplete linguistic preference relations and their fusion. Information Fusion 7 (Sept. 2006), 331–337.

[150] Xu, Z.-S., and Chen, J. An interactive method for fuzzy multiple attribute group decision making. Information Sciences 177 (2007), 248–263.

[151] Zadeh, L. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Information Sciences 8 (1975), 199–249.

[152] Zadeh, L. Some reflections on soft computing, granular computing and their roles in the conception, design and utilization of information/intelligent systems. Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications 2 (Apr. 1998), 23–25.

[153] Zadeh, L. Toward a perception-based theory of probabilistic reasoning with imprecise probabilities. Journal of Statistical Planning and Inference 105 (June 2002), 233–264.

[154] Zapf, M. AMETAS – the Asynchronous MEssage Transfer Agent System. 2005, pp. 331–356.

[155] Zhang, Q., Chen, J. C. H., and Chong, P. P. Decision consolidation: criteria weight determination using multiple preference formats. Decision Support Systems 38 (Nov. 2004), 247–258.

Spis rysunków

1.1 Test na wielokryterialność problemu zarządczego 13
1.2 Zmiana rodzajów czynników zachęcających do inwestycji 18

3.1 Granulacja ostra i rozmyta na przykładzie cechy „wiek człowieka” 35

4.1 Schemat procesu decyzyjnego opartego o deagregację 62
4.2 Struktura opracowanego algorytmu wspomagania decyzji 63
4.3 Ekrany programu SAS Enterprise Miner 66
4.4 Schemat konstrukcji bazy wiedzy 68
4.5 Ekran programu SAS 84
4.6 Błędy klasyfikacji dla odkrytych drzew decyzyjnych 86
4.7 Drzewo decyzyjne doboru metody wielokryterialnej 87
4.8 Drzewa decyzyjne dla dwuetapowego doboru metody 88
4.9 Schemat hierarchii drzew decyzyjnych 88
4.10 Algorytm rozwiązania problemu decyzyjnego 89

5.1 Diagramy przypadków użycia agenta programowego 100
5.2 Tworzenie systemów DSS opartych o agentów programowych 102
5.3 Diagram klas agenta programowego 106
5.4 Diagram przepływu agenta programowego 108
5.5 Schemat procesu rozwiązywania problemu decyzyjnego i ekrany aplikacji nastawczej agenta 110
5.6 Struktura problemu decyzyjnego 113
5.7 Rezultaty wspomagania decyzji przy pomocy opracowanej aplikacji 114
5.8 Przykład 1: Aktywowane reguły drzewa decyzyjnego 117
5.9 Przykład 2: Aktywowane reguły drzewa decyzyjnego 119
5.10 Przykład 3: Aktywowane reguły drzewa decyzyjnego 121
5.11 Przykład 4: Aktywowane reguły drzewa decyzyjnego 125
5.12 Przykład 4: Aktywowane reguły poddrzewa decyzyjnego dla danych rozmytych . . 126
5.13 Przykład 5: Aktywowane reguły drzewa decyzyjnego 130

B.1 Drzewa binarne, część I 152
B.2 Drzewa binarne, część II 153
B.3 Drzewa binarne, część III 154
B.4 Drzewa binarne, część IV 155

B.5 Drzewa o dozwolonych trzech potomkach z węzła, część I 156
B.6 Drzewa o dozwolonych trzech potomkach z węzła, część II 157
B.7 Drzewa o dozwolonych trzech potomkach z węzła, część III 158
B.8 Drzewa o dozwolonych trzech potomkach z węzła, część IV 159
B.9 Drzewa o dozwolonych czterech potomkach z węzła, część I 160
B.10 Drzewa o dozwolonych czterech potomkach z węzła, część II 161
B.11 Drzewa o dozwolonych czterech potomkach z węzła, część III 162
B.12 Drzewa o dozwolonych czterech potomkach z węzła, część IV 163

D.1 Model danych agenta 167
D.2 Diagram klas agenta 168

Spis tabel

3.2 Analiza SWOT stanu faktycznego wspomagania decyzji 51

4.1 Składowe opisu sytuacji decyzyjnej 56
4.2 Zawartość kolekcji przekształceń Ψ 57
4.2 Zawartość kolekcji przekształceń Ψ 58
4.3 Metody operujące na danych nieostrych włączone do kolekcji przekształceń Ψ . . . 60
4.4 Możliwe kombinacje skal użytych do opisu problemu decyzyjnego 73
4.5 Specyfikacja relacji międzykryterialnych 74
4.6 Elementy zbioru meta-danych K sytuacji decyzyjnej 75
4.7 Wytyczne obliczone na postawie relacji z [53] 78
4.8 Zestawienie kryteriów dopasowania informacyjnego metod 80
4.10 Rodzaje skal wartości zbioru K 83
4.10 Rodzaje skal wartości zbioru K 84
4.9 Parametry indukcji drzew decyzyjnych programu 85
4.11 Wyniki analizy zbioru K 85

5.1 Zmienne definiujące problem decyzyjny 106
5.1 Zmienne definiujące problem decyzyjny 107
5.2 Porównanie rozwiązań problemu testowego 115
5.3 Porównanie rozwiązań problemu testowego 118
5.4 Kryteria wyboru lokalizacji dla siedziby przedsiębiorstwa 122
5.4 Kryteria wyboru lokalizacji dla siedziby przedsiębiorstwa 123
5.5 Zastosowane oceny lingwistyczne 123
5.6 Rozważane warianty decyzyjne 123
5.6 Rozważane warianty decyzyjne 124
5.7 Kryteria wyboru systemu informatycznego klasy Business Intelligence 127
5.7 Kryteria wyboru systemu informatycznego klasy Business Intelligence 128
5.8 Zastosowane oceny lingwistyczne 128
5.9 Rozważane warianty decyzyjne 128
5.9 Rozważane warianty decyzyjne 129
5.10 Analiza SWOT agenta programowego 132

A.1 Tabela wejść metod z kolekcji Φ' 150
A.2 Sytuacje decyzyjne wykorzystane do analizy środowiskowej sytuacji decyzyjnych . . 151

A. Tabela zastosowań metod MCDA

Tabela A.1: Tabela wejść metod z kolekcji Φ'

Metoda	Tablica decyzyjna	Model wydajności wariantów	Model preferencji wariantów	Q	P	V	W	U	Komentarz	Bibl.
A_H	nie, lub automatyczne przeliczanie różnic wydajności na oceny AHP	nie, lub funkcje przekształcające różnice wydajności na oceny AHP	tablica dla każdego atrybutu/kryterium z ocenami preferencji parami dla wszystkich wariantów, skala Saaty - względna porządkowa (ilorazowa?)	nie	nie	nie	oceny par (AHP) i jako wektor	addytywny, zaszyty w metodzie	hierarchia atrybutów (kategorie i kryteria)	[130, 129]
T_P	C x A, normalizacja	wartość atrybutu lub dowolna funkcja g, której wartość będzie później znormalizowana	nie, przyjęty przez metodę dystans Euklidesowy	nie	nie	nie	wartości znormalizowane	nie	podział na kryteria kosztowe i zyskowe	[144]
E_3	C x A	wartość atrybutu lub dowolna funkcja g	zaszyta rozmyta funkcja preferencji zależna od p i q	tak	tak	tak	wartości znormalizowane	nie	wartość warunku zgodności s	[10, 42]
P_{T1}	C x A	wartość atrybutu lub dowolna funkcja g	wybór jednej z 6 zaszytych rozmytych (lub progowych) funkcji preferencji	tak	tak	nie	wartości znormalizowane	strumienie jako pozytywna i negatywna użyteczność, addytywne, zaszyte w metodzie	wartość s (dla Gauss preferencji, pomiędzy p i q)	[12]
P_{T2}	C x A	wartość atrybutu lub dowolna funkcja g	wybór jednej z 6 zaszytych rozmytych (lub progowych) funkcji preferencji	tak	tak	nie	wartości znormalizowane	jak wyżej	wartość s (dla Gauss preferencji, pomiędzy p i q), czy max czy min, wybrana funkcja preferencji z 6 dostępnych	[12, 14, 113]
fP_T	C x A	wartość atrybutu lub dowolna funkcja g	wybór jednej z 6 zaszytych rozmytych (lub progowych) funkcji preferencji	tak	tak	nie	wartości znormalizowane	strumienie jako pozytywna i negatywna użyteczność, addytywne, zaszyte w metodzie	wartość s (dla Gauss preferencji, pomiędzy p i q), czy max czy min, wybrana funkcja preferencji z 6 dostępnych	[45, 48]
fT_P	C x A, normalizacja	wartość atrybutu lub dowolna funkcja g, której wartość będzie później znormalizowana	nie, przyjęty przez metodę dystans Euklidesowy	nie	nie	nie	wartości znormalizowane	nie	podział na kryteria kosztowe i zyskowe, wartości ? do ?-cięć, słowniki lingwistyczne	[144]
fK_O	C x A	wartość atrybutu, znormalizowana	nie, przyjęty przez metodę dystans Hamminga	nie	nie	nie	wartości znormalizowane	nie	nie	[76]

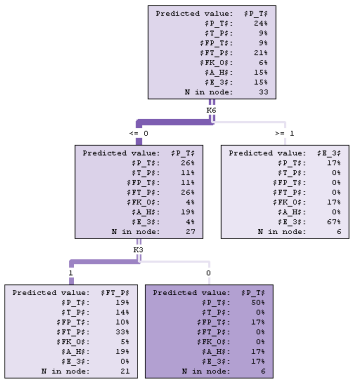
Źródło: Opracowanie własne.

Tabela A.2: Sytuacje decyzyjne wykorzystane do analizy środowiskowej sytuacji decyzyjnych

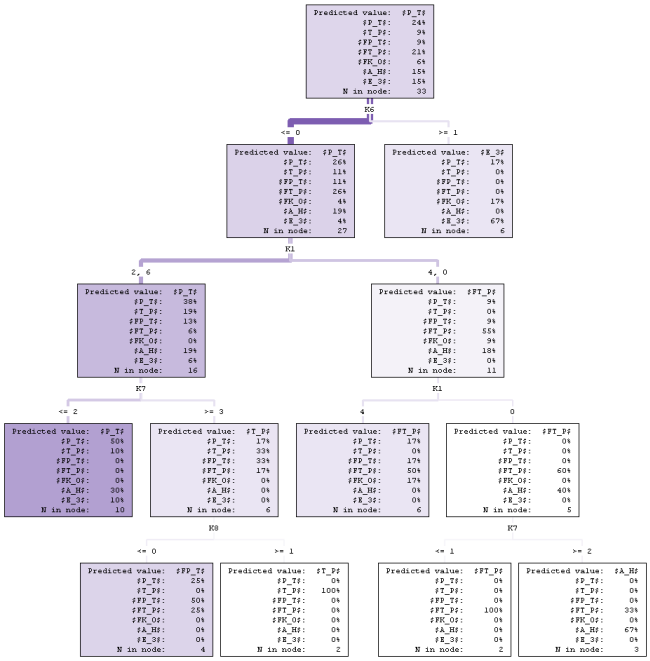
Metoda MCDA		I	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
AHP, TOPSIS (połączenie)	[122]	20	Wybór techniki produkcji	T	N	T	S	M	5	T	I
AHP	[145]	21	Wybór oprogramowania COTS	T	T	N	D	M	2	S	I
ELECTRE III	[10]	19	Ocena kondycji ekonomicznej	E	N	T	M	B	5	S	B
TOPSIS, Fuzzy TOPSIS (porównanie)	[81]	20	Wybór człowieka	O	N	N	M	M	3	T	I
Fuzzy Kuo	[76]	17	Lokalizacja	O	N	N	M	M	1	S	I
PROMETHEE II (porówn.)	[48]	18	Planowanie środowiskowe	E	T	N	M	M	4	S	I
F-PROMETHEE (porówn.)	[48]	18	Planowanie środowiskowe	E	T	N	M	M	4	S	I
MAUT, ELECTRE III, PROMETHEE II (porównanie)	[73]		Wybór scenariusza	T,E,S	T	N	S	M	1	S	I
PROMETHEE	[39]		Wybór oprogramowania COTS	T	N	N	M	M	1	S	B
AHP + PROMETHEE	[142]		Zarządzanie	O	N	N	M	M	1	S	I
PROMETHEE II	[113]		Analiza usługi	S	T	N	M	M	2	T	B
Fuzzy TOPSIS	[25]		Wybór przedmiotu (urządzenia)	T	t/n	N	M	M	3	T	I
Fuzzy TOPSIS	[31]		Analiza usługi	O	N	T	S	M	5	S	B
TOPSIS	[24]		Zarządzanie	O	N	N	S	M	1	S	I
FPROMETHEE	[91]		Lokalizacja	O	N	N	M	M	1	T	I
Fuzzy TOPSIS	[50]		Wybór przedmiotu (urządzenia)	T	N	N	M	M	1	T	I
PROMETHEE (PROMSORT)	[8]	18, 19	Analiza usługi/Zarządzanie	O	N	N	S	D	1	S	I
AHP	[22]		Wybór przedmiotu (urządzenia)	T	N	N	M	M	3	O	B
ELECTRE III	[61]		Wybór techniki produkcji	T	N	N	M	D	1	S	I
ELECTRE III	[61]		Wybór techniki produkcji	T	N	N	M	S	1	S	I
Fuzzy PROMETHEE	[45]	18	Wybór techniki produkcji	T	N	N	S	M	4	S	I
Fuzzy TOPSIS	[6]		Lokalizacja	O	N	T	M	M	2	S	I
Fuzzy Kuo	[75]	5	Analiza usługi	O	N	N	M	S	1	S	B
Fuzzy TOPSIS	[144]	20	Konserwacja urządzeń	T	N	N	M	M	1	T	I
AHP	[129]		Wybór przedmiotu (urządzenia)	T	N	N	M	M	2	S	I
AHP	[129]		Zarządzanie	O	N	T	M	M	2	T	B
Fuzzy TOPSIS	[26]	20	Lokalizacja	O	N	N	M	M	1	S	I
ELECTRE III	[10]	19	Zarządzanie	E	N	T	M	B	4	S	B
PROMETHEE I i II	[13]		Zarządzanie	O	N	N	M	M	1	T	I
PROMETHEE I, PROMETHEE II	[14]	18	Lokalizacja	T	N	N	M	M	2	S	I
Interval PROMETHEE	[78]	18	Ocena środowiskowa	T	N	N	M	M	1	S	I
AHP	[130]		Polityka	E	N	N	M	M	1	S	I

Źródło: Opracowanie własne.

B. Wykresy drzew decyzyjnych



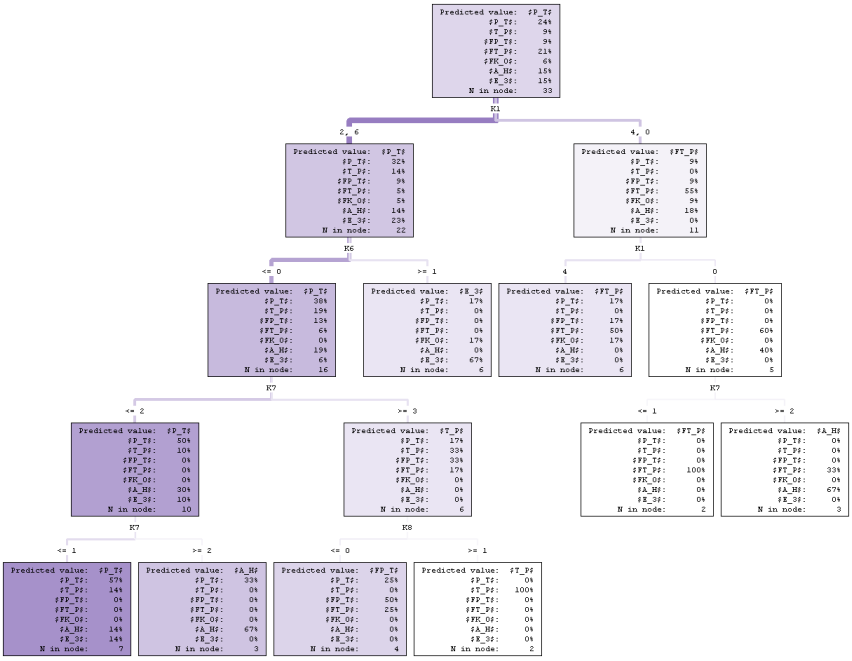
(a) $\Psi' \to \Psi'$ (χ^2, 0,4)



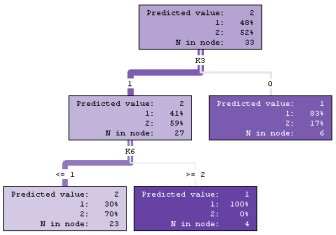
(b) $\Psi' \to \Psi'$ (Minimalizacja entropii)

Rysunek B.1: Drzewa binarne, część I

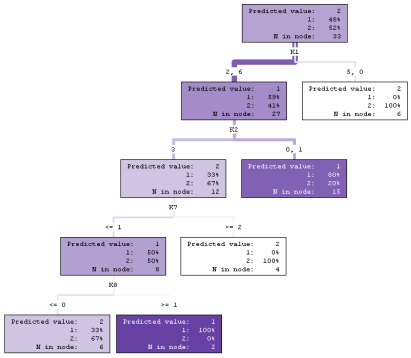
Źródło: Opracowanie własne



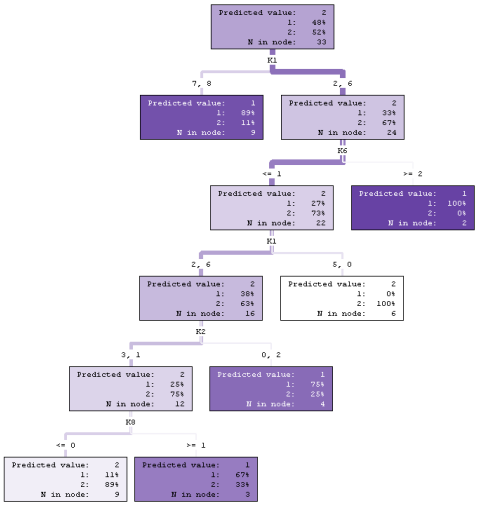
(a) $\Psi' \rightarrow \Psi'$ (Redukcja Gini)



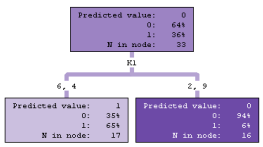
(b) $\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\}$ (χ^2, 0,4)



(c) $\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\}$ (Minimalizacja entropii)



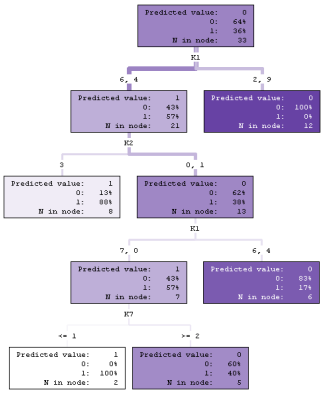
(d) $\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\}$ (Redukcja Gini)



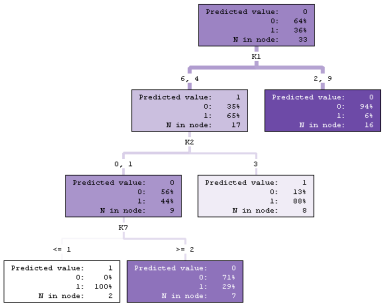
(e) $\Psi' \rightarrow \{f\Psi', \neg f\Psi';\}$ (χ^2, 0,4)

Rysunek B.2: Drzewa binarne, część II

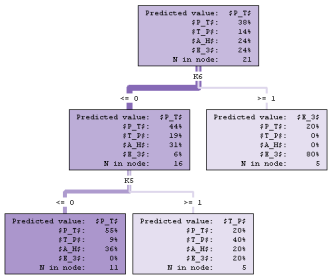
Źródło: Opracowanie własne



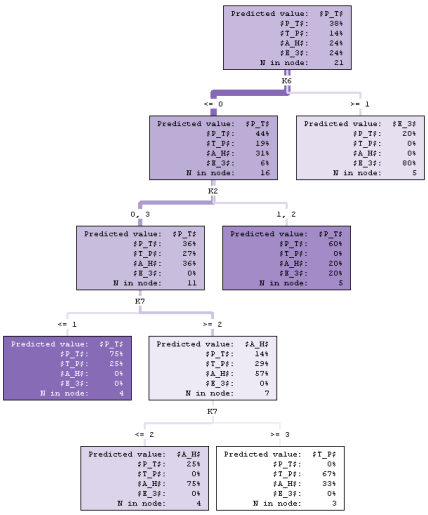
(a) $\Psi' \rightarrow \{f\Psi', \neg f\Psi;\}$ (Minimalizacja entropii)



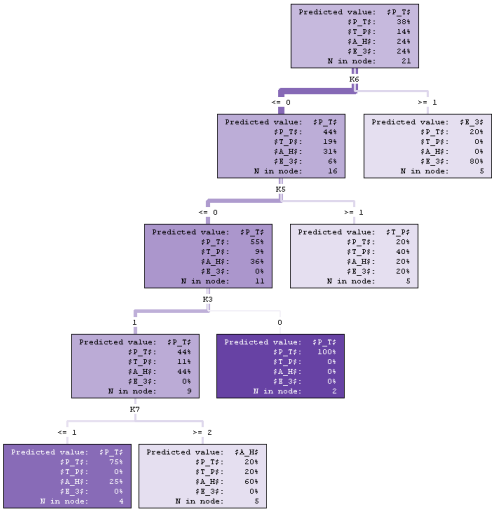
(b) $\Psi' \rightarrow \{f\Psi', \neg f\Psi;\}$ (Redukcja Gini)



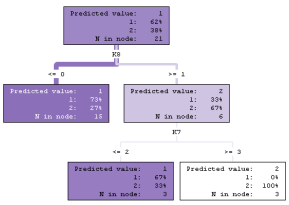
(c) $\neg f\Psi' \rightarrow \neg f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



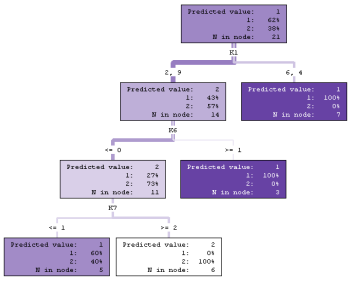
(d) $\neg f\Psi' \rightarrow \neg f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



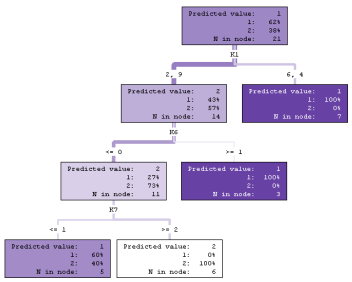
(e) $\neg f\Psi' \rightarrow \neg f\Psi'$ (Redukcja Gini)



(f) $\neg f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap \neg f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



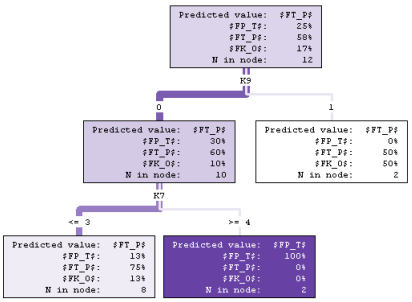
(g) $\neg f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap \neg f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



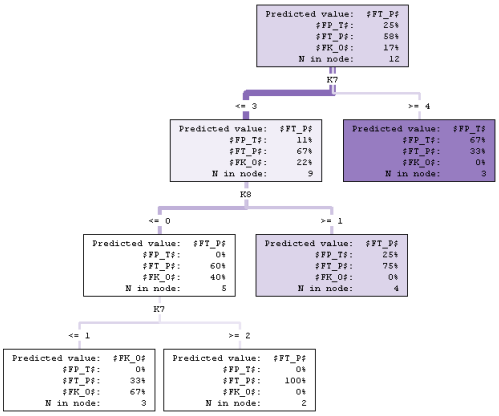
(h) $\neg f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap \neg f\Psi'$ (Redukcja Gini)

Rysunek B.3: Drzewa binarne, część III

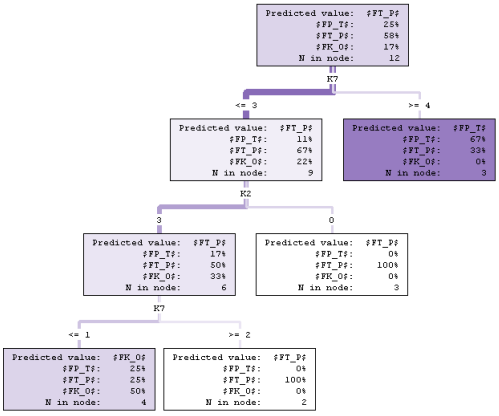
Źródło: Opracowanie własne



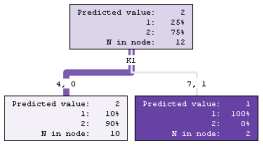
(a) $f\Psi' \to f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



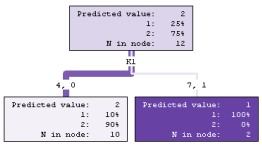
(b) $f\Psi' \to f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



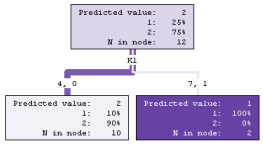
(c) $f\Psi' \to f\Psi'$ (Redukcja Gini)



(d) $f\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



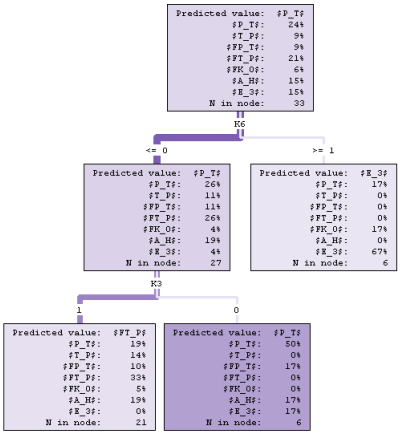
(e) $f\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



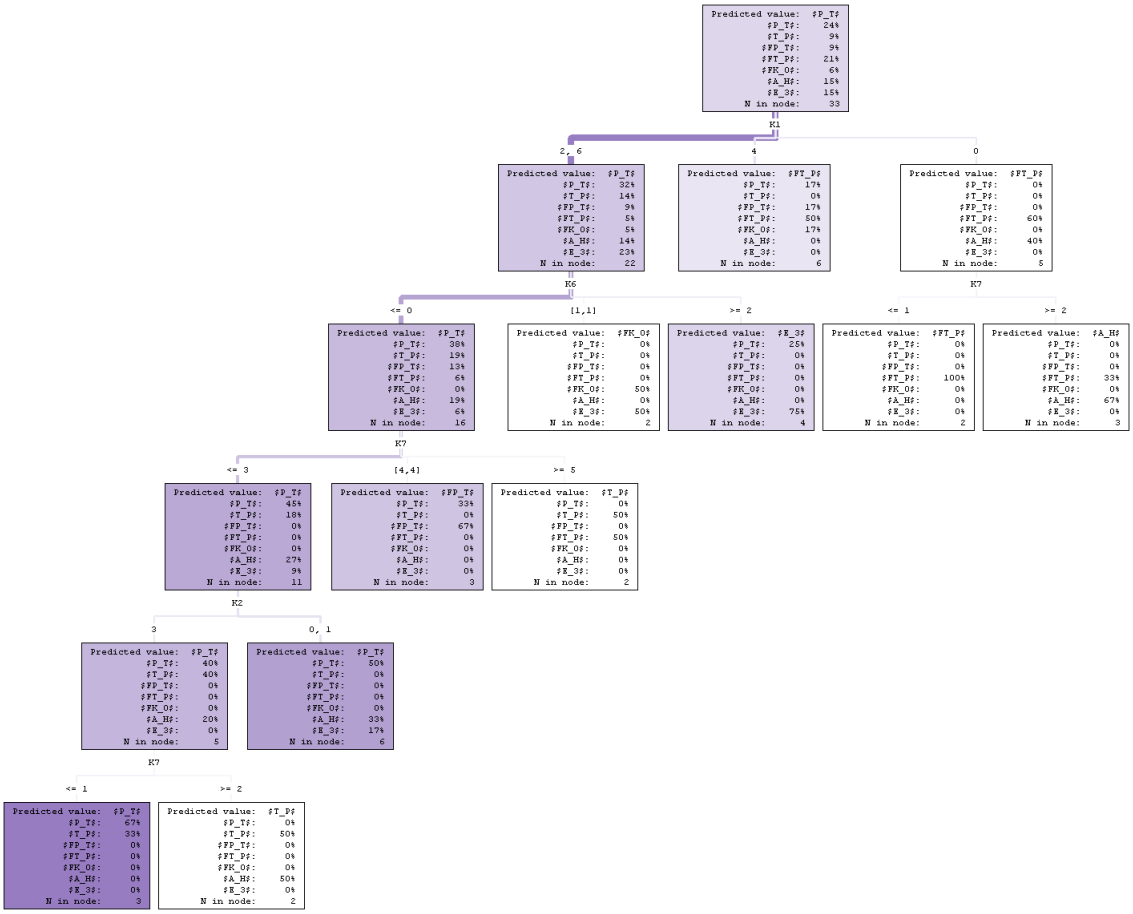
(f) $f\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap f\Psi'$ (Redukcja Gini)

Rysunek B.4: Drzewa binarne, część IV

Źródło: Opracowanie własne



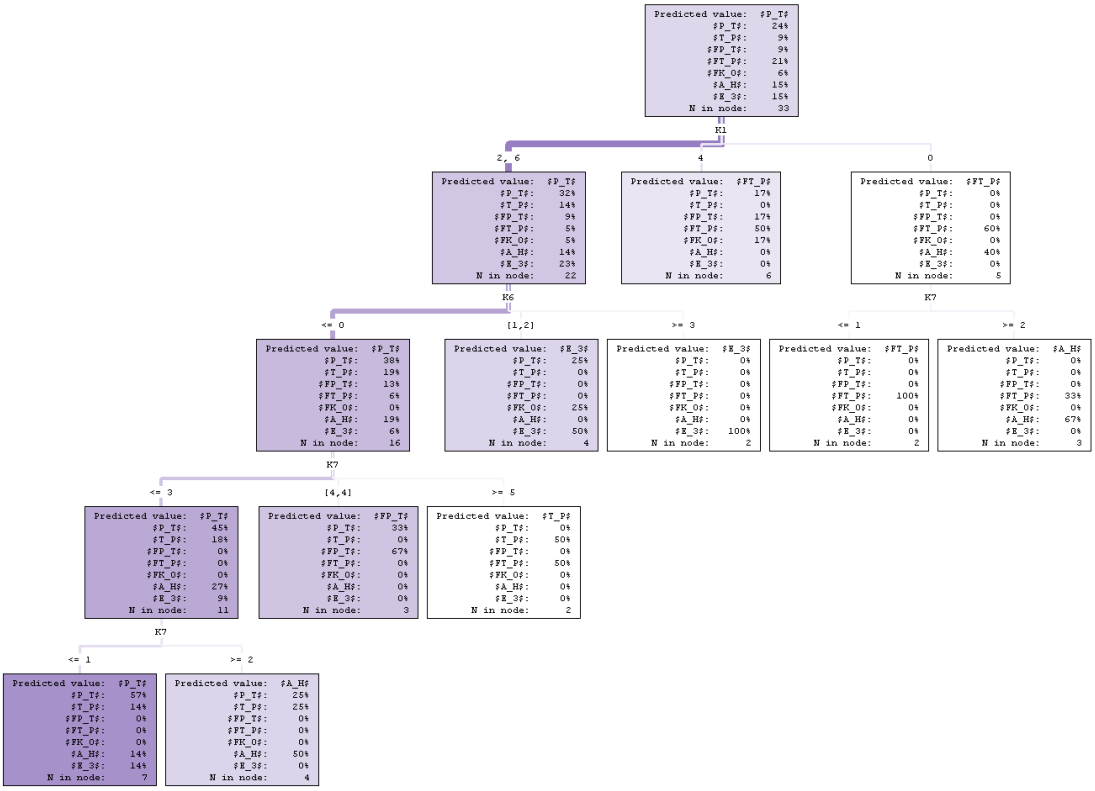
(a) $\Psi' \to \Psi'$ (χ^2, 0,4)



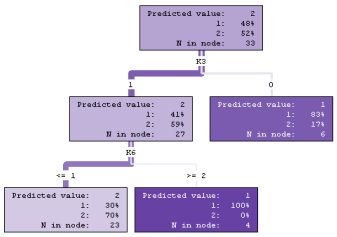
(b) $\Psi' \to \Psi'$ (Minimalizacja entropii)

Rysunek B.5: Drzewa o dozwolonych trzech potomkach z węzła, część I

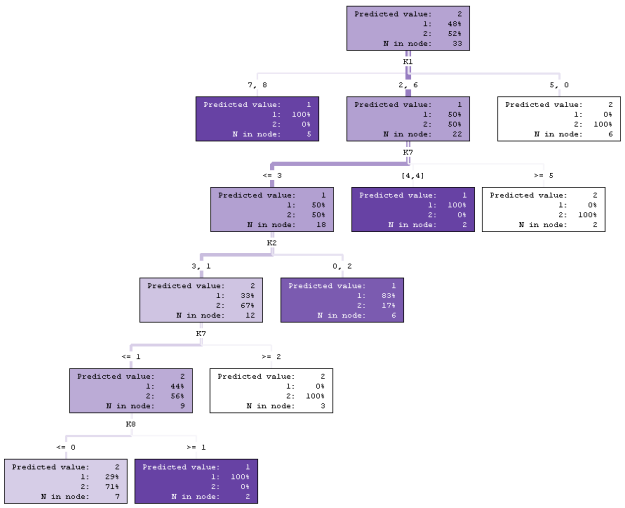
Źródło: Opracowanie własne



(a) $\Psi' \to \Psi'$ (Redukcja Gini)



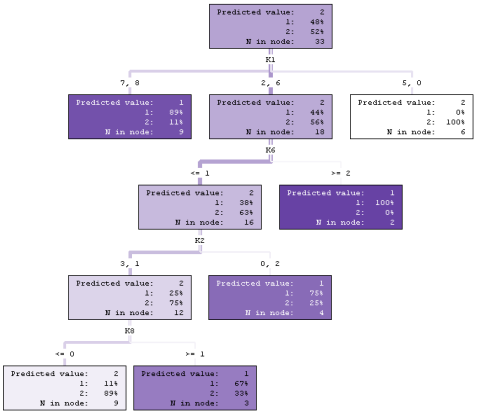
(b) $\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\}$ (χ^2, 0,4)



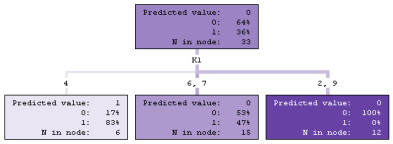
(c) $\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\}$ (Minimalizacja entropii)

Rysunek B.6: Drzewa o dozwolonych trzech potomkach z węzła, część II

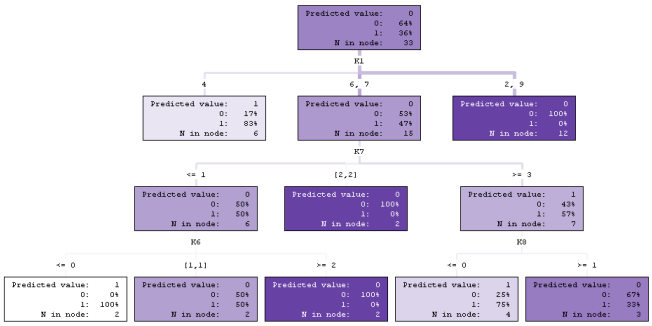
Źródło: Opracowanie własne



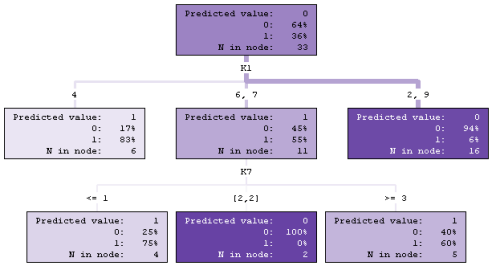
(a) $\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\}$ (Redukcja Gini)



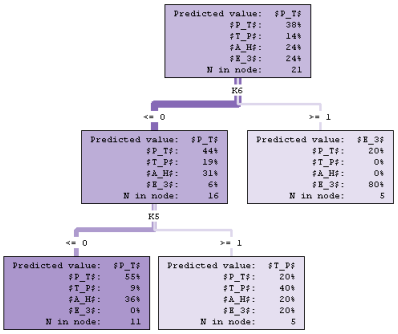
(b) $\Psi' \to \{f\Psi', \neg f\Psi;\}$ (χ^2, 0,4)



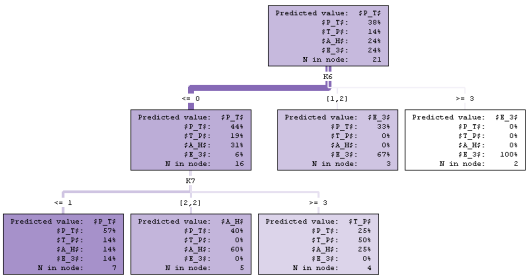
(c) $\Psi' \to \{f\Psi', \neg f\Psi;\}$ (Minimalizacja entropii)



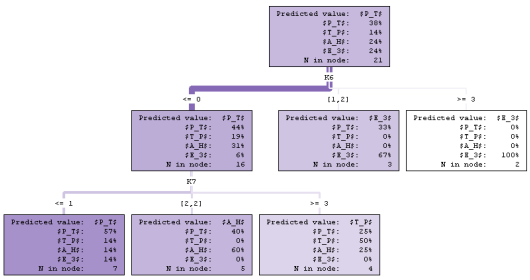
(d) $\Psi' \to \{f\Psi', \neg f\Psi;\}$ (Redukcja Gini)



(e) $\neg f\Psi' \to \neg f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



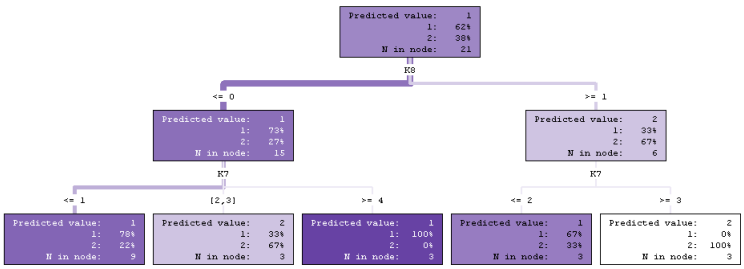
(f) $\neg f\Psi' \to \neg f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



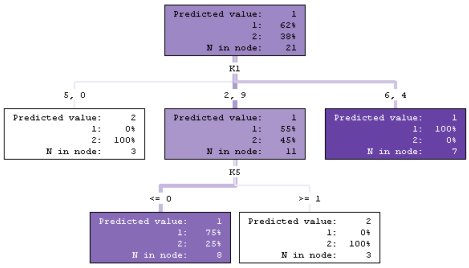
(g) $\neg f\Psi' \to \neg f\Psi'$ (Redukcja Gini)

Rysunek B.7: Drzewa o dozwolonych trzech potomkach z węzła, część III

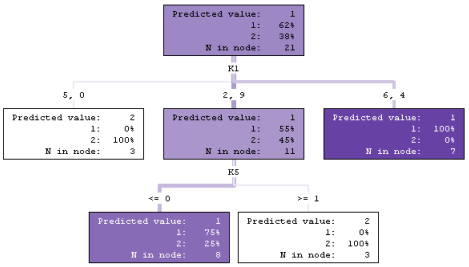
Źródło: Opracowanie własne



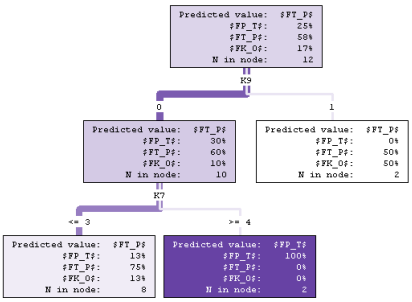
(a) $\neg f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap \neg f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



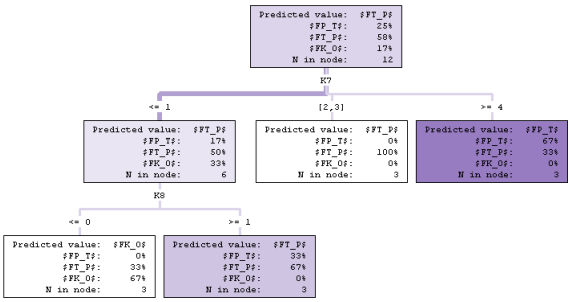
(b) $\neg f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap \neg f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



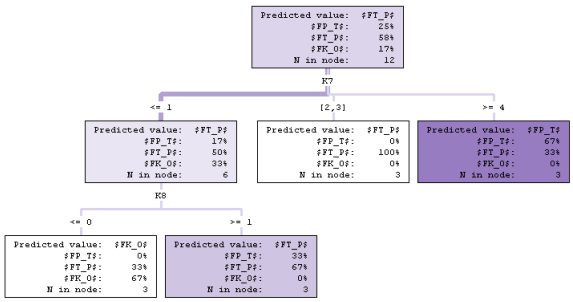
(c) $\neg f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap \neg f\Psi'$ (Redukcja Gini)



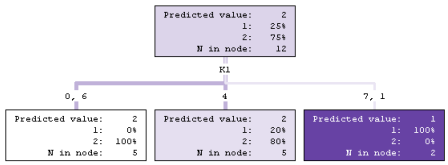
(d) $f\Psi' \rightarrow f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



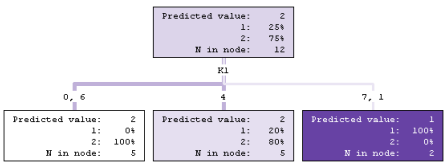
(e) $f\Psi' \rightarrow f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



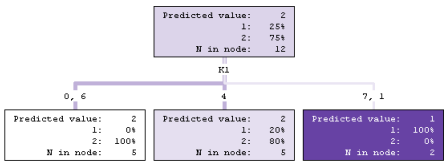
(f) $f\Psi' \rightarrow f\Psi'$ (Redukcja Gini)



(g) $f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



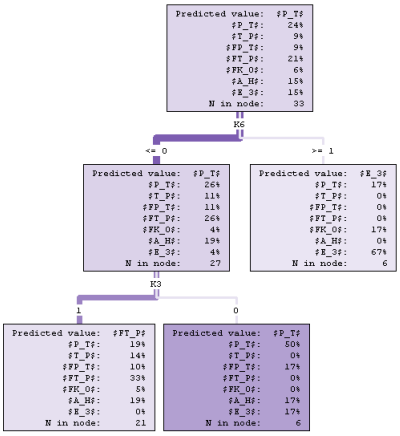
(h) $f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



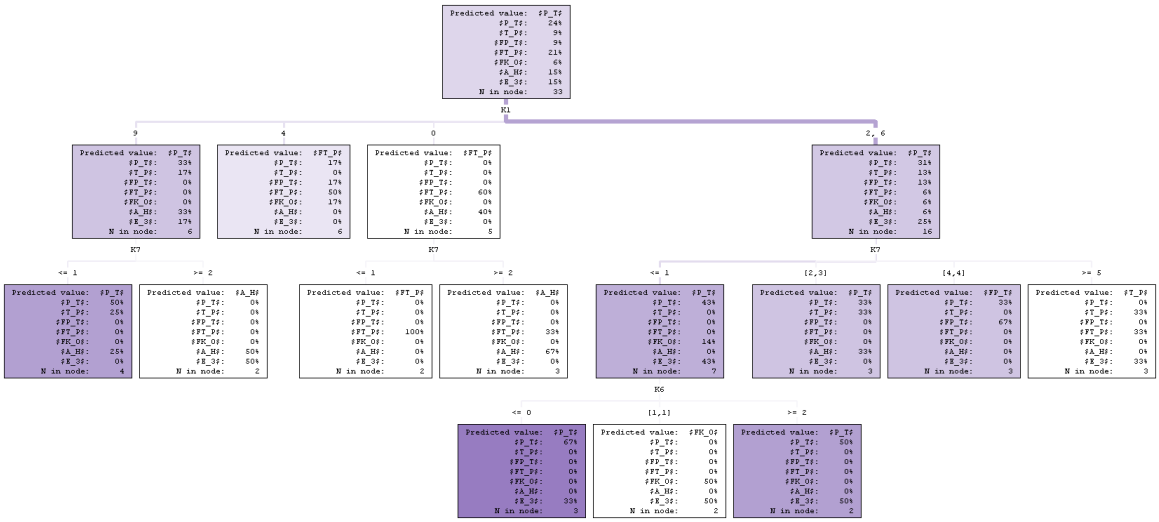
(i) $f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap f\Psi'$ (Redukcja Gini)

Rysunek B.8: Drzewa o dozwolonych trzech potomkach z węzła, część IV

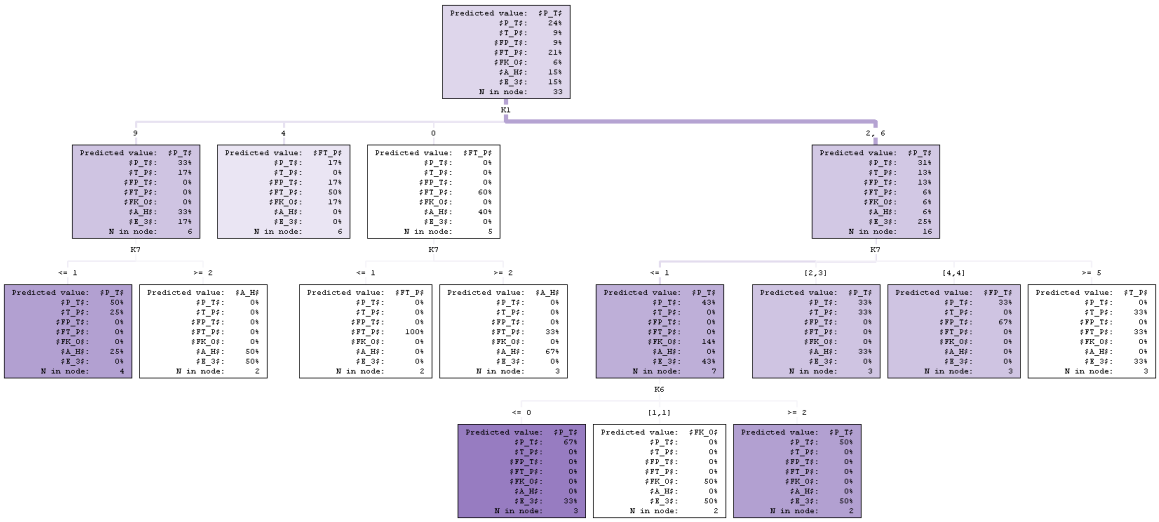
Źródło: Opracowanie własne



(a) $\Psi' \to \Psi'$ (χ^2, 0,4)



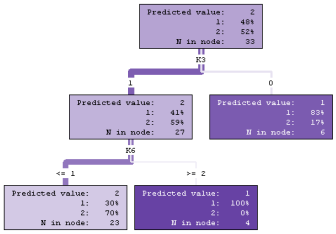
(b) $\Psi' \to \Psi'$ (Minimalizacja entropii)



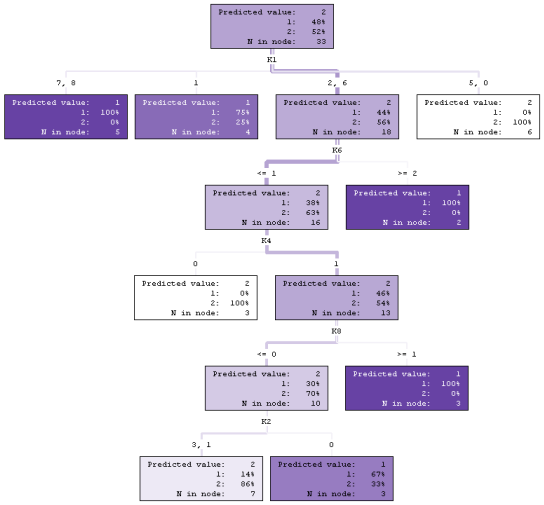
(c) $\Psi' \to \Psi'$ (Redukcja Gini)

Rysunek B.9: Drzewa o dozwolonych czterech potomkach z węzła, część I

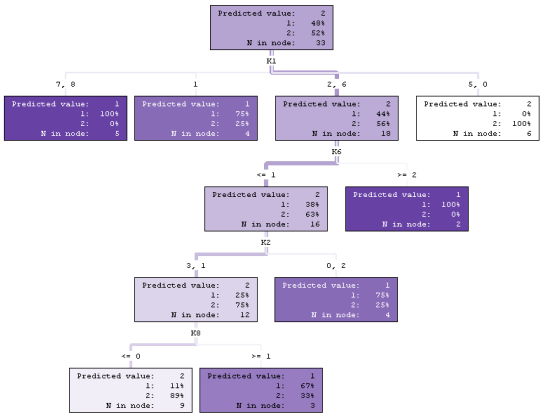
Źródło: Opracowanie własne



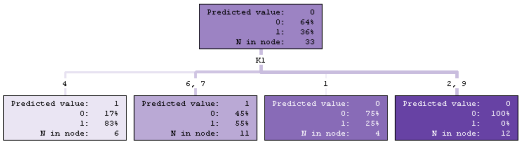
(a) $\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\}$ (χ^2, 0,4)



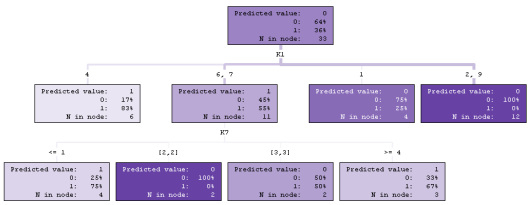
(b) $\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\}$ (Minimalizacja entropii)



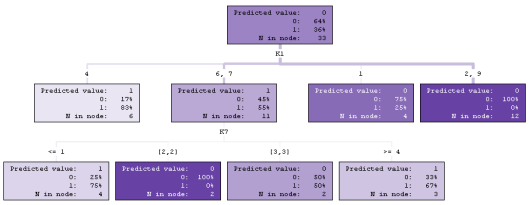
(c) $\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\}$ (Redukcja Gini)



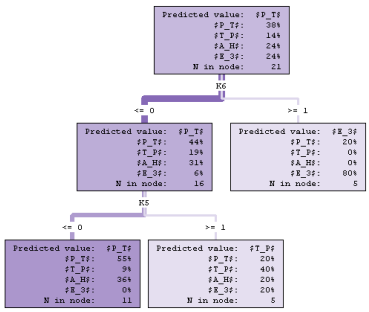
(d) $\Psi' \to \{f\Psi', \neg f\Psi;\}$ (χ^2, 0,4)



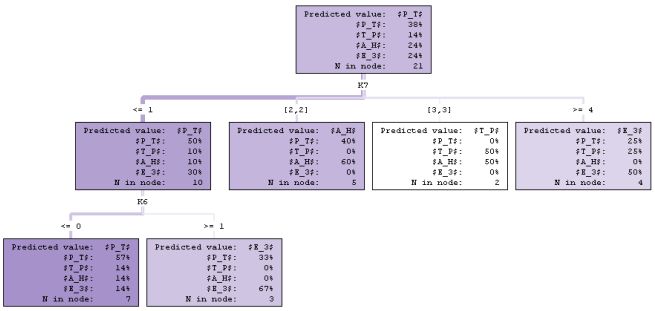
(e) $\Psi' \to \{f\Psi', \neg f\Psi;\}$ (Minimalizacja entropii)



(f) $\Psi' \to \{f\Psi', \neg f\Psi;\}$ (Redukcja Gini)



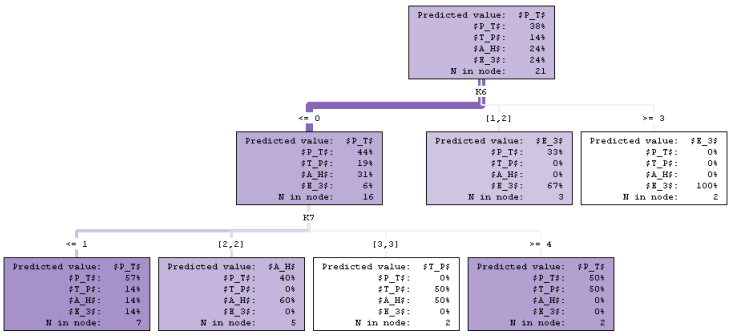
(g) $\neg f\Psi' \to \neg f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



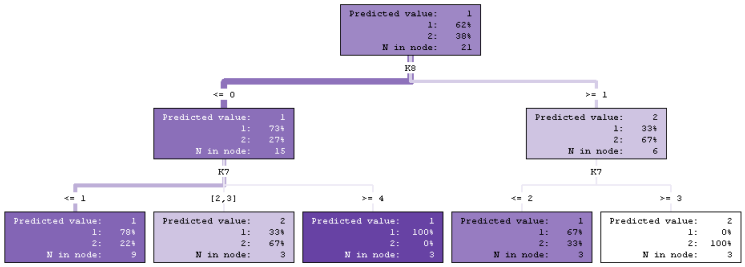
(h) $\neg f\Psi' \to \neg f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)

Rysunek B.10: Drzewa o dozwolonych czterech potomkach z węzła, część II

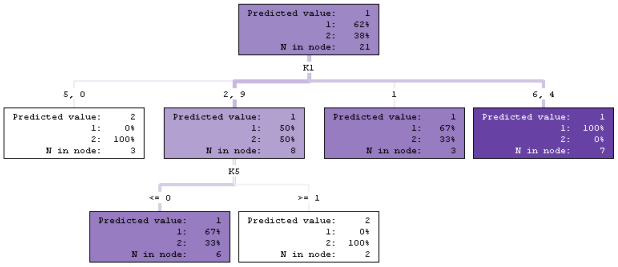
Źródło: Opracowanie własne



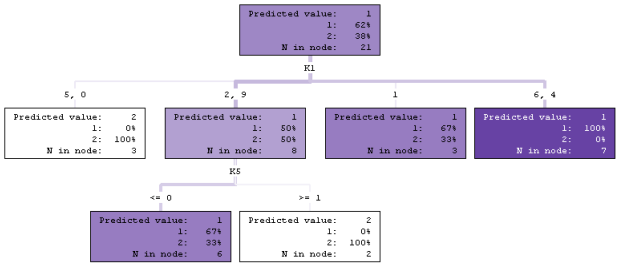
(a) $\neg f\Psi' \rightarrow \neg f\Psi'$ (Redukcja Gini)



(b) $\neg f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap \neg f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



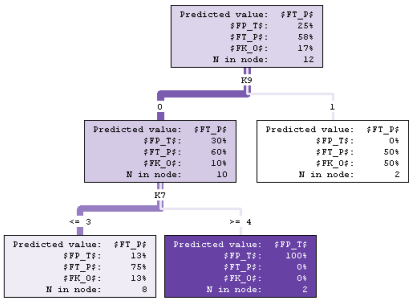
(c) $\neg f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap \neg f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



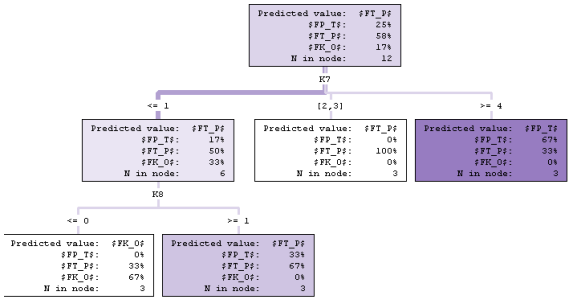
(d) $\neg f\Psi' \rightarrow \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap \neg f\Psi'$ (Redukcja Gini)

Rysunek B.11: Drzewa o dozwolonych czterech potomkach z węzła, część III

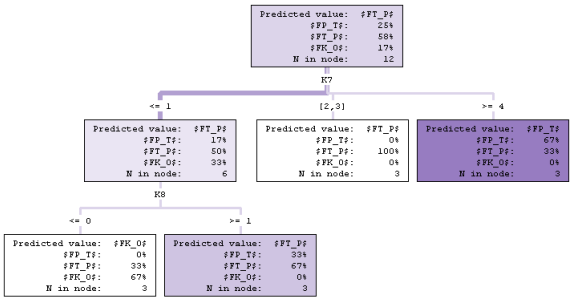
Źródło: Opracowanie własne



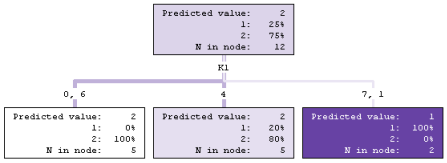
(a) $f\Psi' \to f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



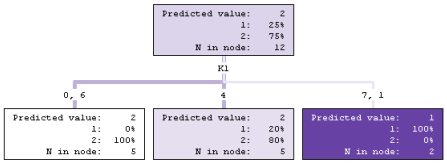
(b) $f\Psi' \to f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



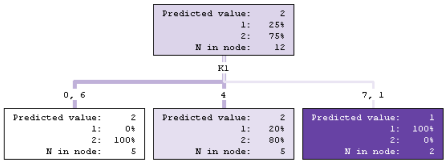
(c) $f\Psi' \to f\Psi'$ (Redukcja Gini)



(d) $f\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap f\Psi'$ (χ^2, 0,4)



(e) $f\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap f\Psi'$ (Minimalizacja entropii)



(f) $f\Psi' \to \{\Psi'_u, \Psi'_r\} \cap f\Psi'$ (Redukcja Gini)

Rysunek B.12: Drzewa o dozwolonych czterech potomkach z węzła, część IV

Źródło: Opracowanie własne

C. Reguły bazy wiedzy skonstruowane na bazie drzew decyzyjnych

Reguły dla drzewa B.6a przedstawione są poniżej.

```
IF  K1 EQUALS 4
THEN
  NODE    :       3
  $FT_P$  :   50.0%

IF  K6 IS ONE OF: 1 2
AND K1 IS ONE OF: 2 6 9 7 8 1 5 3
THEN
  NODE    :       6
  $E_3$   :   50.0%

IF  K6 EQUALS 3
AND K1 IS ONE OF: 2 6 9 7 8 1 5 3
THEN
  NODE    :       7
  $E_3$   :  100.0%

IF  K7 EQUALS 1
AND K1 EQUALS 0
THEN
  NODE    :      10
  $FT_P$  :  100.0%

IF  K7 IS ONE OF: 2 3 4 5
AND K1 EQUALS 0
THEN
  NODE    :      11
  $A_H$   :   66.7%

IF  K7 EQUALS 4
AND K6 EQUALS 0
AND K1 IS ONE OF: 2 6 9 7 8 1 5 3
THEN
  NODE    :      13
  $FP_T$  :   66.7%

IF  K7 EQUALS 5
AND K6 EQUALS 0
AND K1 IS ONE OF: 2 6 9 7 8 1 5 3
THEN
  NODE    :      14
  $T_P$   :   50.0%

IF  K7 EQUALS 1
AND K6 EQUALS 0
AND K1 IS ONE OF: 2 6 9 7 8 1 5 3
THEN
  NODE    :      15
  $P_T$   :   57.1%

IF  K7 IS ONE OF: 2 3
AND K6 EQUALS 0
AND K1 IS ONE OF: 2 6 9 7 8 1 5 3
THEN
  NODE    :      16
  $A_H$   :   50.0%
```

Reguły dla drzewa B.3b przedstawione są poniżej.

```
IF  K1 IS ONE OF: 2 9 8 1 5 3
THEN
  NODE    :       3
  0       :   93.8%

IF  K2 EQUALS 3
AND K1 IS ONE OF: 6 4 7 0
THEN
  NODE    :       5
  1       :   87.5%

IF  K7 EQUALS 1
AND K2 IS ONE OF: 0 1 2
AND K1 IS ONE OF: 6 4 7 0
THEN
  NODE    :       8
  1       :  100.0%

IF  K7 IS ONE OF: 2 3 4 5
AND K2 IS ONE OF: 0 1 2
AND K1 IS ONE OF: 6 4 7 0
THEN
  NODE    :       9
  0       :   71.4%
```

Reguły dla drzewa B.3d przedstawione są poniżej.

```
IF  K6 IS ONE OF: 1 2 3
THEN
  NODE    :       3
  $E_3$   :   80.0%

IF  K2 IS ONE OF: 1 2
AND K6 EQUALS 0
THEN
  NODE    :       5
  $P_T$   :   60.0%

IF  K7 EQUALS 1
AND K2 IS ONE OF: 0 3
AND K6 EQUALS 0
THEN
  NODE    :       8
  $P_T$   :   75.0%

IF  K7 EQUALS 2
AND K2 IS ONE OF: 0 3
AND K6 EQUALS 0
THEN
  NODE    :      12
  $A_H$   :   75.0%

IF  K7 IS ONE OF: 3 4 5
AND K2 IS ONE OF: 0 3
AND K6 EQUALS 0
THEN
  NODE    :      13
  $T_P$   :   66.7%
```

Reguły dla drzewa B.4b przedstawione są poniżej.

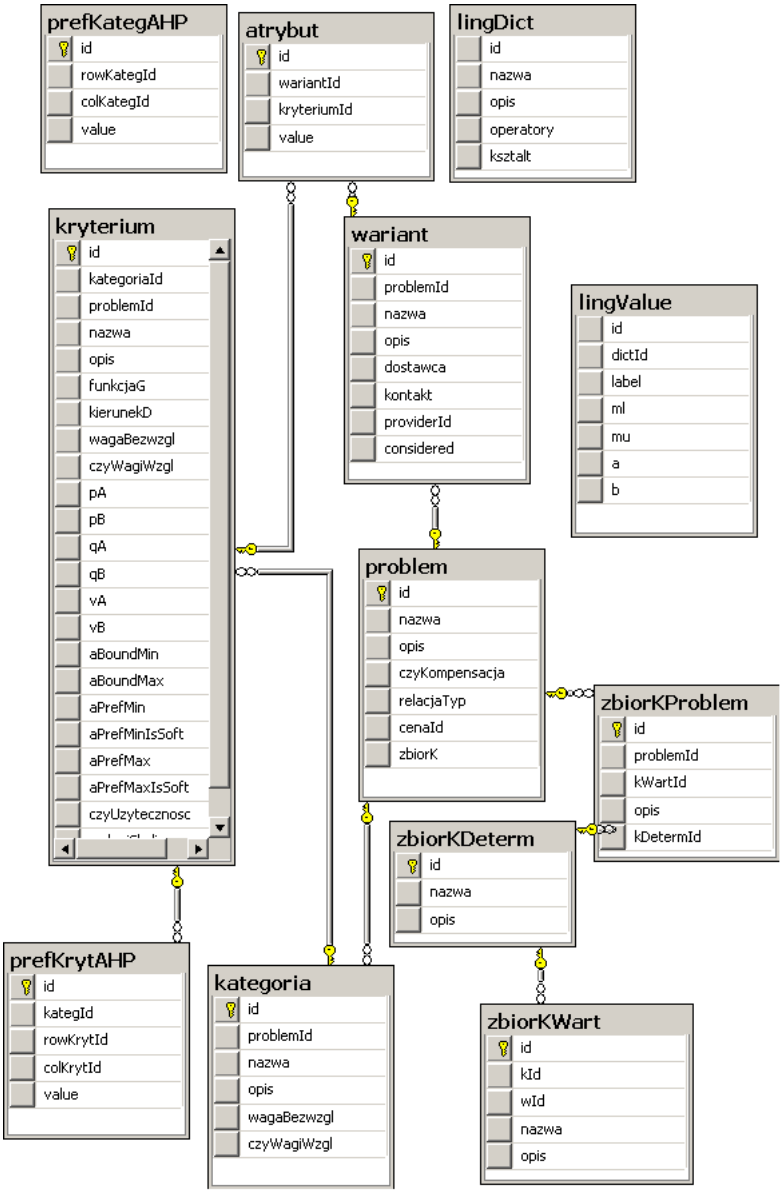
```
IF  K7 IS ONE OF: 4 5
THEN
  NODE    :       3
  $FP_T$  :   66.7%

IF  K8 EQUALS 1
AND K7 IS ONE OF: 1 2 3
THEN
  NODE    :       5
  $FT_P$  :   75.0%
```

```
IF  K7 EQUALS 1
AND K8 EQUALS 0
THEN
  NODE    :       6
  $FK_O$  :   66.7%

IF  K7 IS ONE OF: 2 3
AND K8 EQUALS 0
THEN
  NODE    :       7
  $FT_P$  :  100.0%
```

D. Implementacja agenta programowego



Rysunek D.1: Model danych agenta

Źródło: Opracowanie własne

Rysunek D.2: Diagram klas agenta

Źródło: Opracowanie własne