



UNIWERSYTET SZCZECIŃSKI
INSTYTUT ZARZĄDZANIA

Rozwój i zastosowanie metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji w problemach decyzyjnych zrównoważenia

Paweł Ziemba

Katedra Metod Wspomaganie Decyzji i Neuronauki Poznawczej
Instytut Zarządzania
Uniwersytet Szczeciński

1



UNIWERSYTET SZCZECIŃSKI
INSTYTUT ZARZĄDZANIA

Plan prezentacji

- Ocena zrównoważenia za pomocą indeksów i metod wielokryterialnych
- Cel badań
- Zrównoważenie i jego ocena
- Silne i słabe zrównoważenie
- Metody wielokryterialne w ocenie zrównoważenia
- Substytucja, kompensacja i zrównoważenie w metodzie PROMETHEE
- Koncepcja ograniczenia kompensacji kryteriów w metodzie PROSA
- Podsumowanie - porównanie PROSA i PROMETHEE
- Niepewność w problemach decyzyjnych, rozmyte metody wspomaganie decyzji, implementacje Fuzzy PROMETHEE
- Mapowanie preferencji i inne udoskonalenia w NEAT F-PROMETHEE
- Podsumowanie – efekty korekty mapowania w NEAT F-PROMETHEE

2

2

Badania związane ze zrównoważeniem

W ostatnich latach widoczny jest stały wzrost zainteresowania badaniami nad:

- zrównoważeniem (ang. sustainability),
- zrównoważonym rozwojem (ang. sustainable development),
- oceną zrównoważenia (ang. sustainability assessment).

Duże zainteresowanie badaczy tematem zrównoważenia obejmuje tak różne zagadnienia jak, m.in.:

- planowanie energetyczne i zarządzanie energią [1],
- transport [2],
- cyfrowe zrównoważenie [3],
- zarządzanie łańcuchem dostaw [4],
- planowanie przestrzenne i urbanistyka [5],
- zarządzanie projektami, produkcją i wytwarzaniem [6],
- ogólnie rozumiane zrównoważone zarządzanie [7].



3

3

Metody wielokryterialne w badaniach nad zrównoważeniem

Metody wielokryterialnego wspomaganie decyzji są powszechnie stosowane w różnych problemach decyzyjnych związanych ze zrównoważeniem, np.:

- ocena zrównoważenia inwestycji infrastrukturalnych [15],
- ocena zrównoważonego cyklu życia produktów [16],
- ocena zrównoważenia technologii produkcyjnych [17],
- zrównoważone zarządzanie łańcuchem dostaw [18],
- zrównoważone planowanie i zarządzanie energetyczne [19],
- inne problemy zrównoważonego zarządzania, w tym m.in. zrównoważony transport, wytwarzanie, gospodarka odpadami, etc. [20].

Do oceny zrównoważenia najczęściej stosowane są metody: (Fuzzy) AHP, WSM/SAW/WAM, PROMETHEE I i II, (Fuzzy) TOPSIS, ELECTRE, (Fuzzy) ANP

Żadna spośród stosowanych metod nie jest w pełni dopasowana do specyfiki problemów decyzyjnych związanych z badaniami nad zrównoważeniem.

4

4



Cele badawcze

Cel główny:

rozwój dyskretnych metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji, aby były one lepiej dostosowane do problemów decyzyjnych zrównoważenia i jego oceny.

1: Opracowanie nowej metody WWD, pozwalającej na definiowanie liczbowe i stosowanie różnej siły zrównoważenia (słabego, silnego i wartości pośrednich) w rozwiązywanych problemach decyzyjnych.

2: Opracowanie metody WWD, w jak największym stopniu radzącej sobie z niepewnością, poprzez uwzględnienie niepewności danych i umożliwienie jak najszerzej analizy niepewności.

5

5



Problematyka zrównoważenia i jego oceny

6

6

Zrównoważenie i zrównoważony rozwój

Zrównoważenie jest paradygmatem myślenia o przyszłości, w której wymiary - środowiskowy, społeczny i ekonomiczny - są zbalansowane i wspólnie mają pozwalać na uzyskanie poprawy jakości życia.

Zrównoważenie jest długoterminowym celem, a środkiem do jego uzyskania ma być zrównoważony rozwój [21].



Zrównoważony rozwój jest to rozwój maksymalizujący jednocześnie cele biologiczne (środowiskowe), ekonomiczne i społeczne [22,23].

Rozwój, który zaspokaja potrzeby obecnego pokolenia bez uszczerbku dla możliwości zaspokojenia potrzeb przyszłych pokoleń [24].

7

Ocena zrównoważenia

Ocena zrównoważenia powinna umożliwiać decydom wprowadzanie różnych preferencji i identyfikować najbardziej zrównoważone opcje [28].

Powinna obejmować podstawowe wymiary zrównoważenia (ekonomiczny, społeczny i środowiskowy) [29], ale może też uwzględniać wymiary dodatkowe.

Może ona odnosić się do:

- oceny zrównoważonego rozwoju (pomiar jego poziomu),
- oceny wpływu konkretnych działań na zrównoważony rozwój [27].

Może to być ocena *ex post* lub *ex ante*.

Ocena *ex ante* jest obciążona dużą niepewnością.

Wymaga zastosowania metod i narzędzi, które radzą sobie z występowaniem niepewności i nieprecyzyjności danych.

8

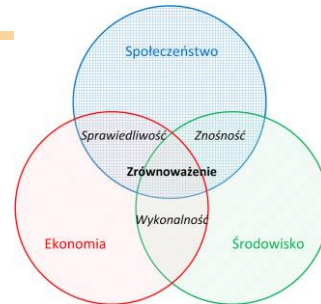
Potrójna dolna linia

Wymiary: ekonomiczny, społeczny i środowiskowy tworzą w zarządzaniu koncepcję tzw. „potrójnej dolnej linii” (3BL) (ang. triple bottom line)[30].

Koncepcja 3BL po raz pierwszy pojawiła się w publikacji Elkingtona [31] jako ogólna strategia biznesowa „win-win-win”, zakładająca jednocześnie odnoszenie korzyści przez firmę, jej klientów i środowisko.

Według założeń 3BL

- przedsiębiorstwa powinny dążyć do zachowania równowagi pomiędzy dochodami, a interesem społecznym i ekologicznym [32].



9

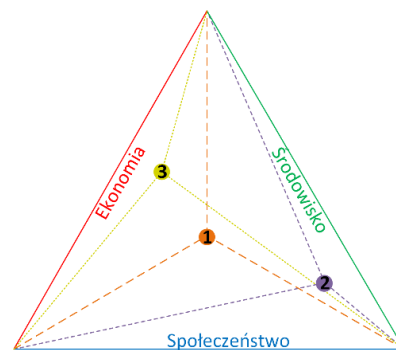
9

Słabe zrównoważenie

Koncepcja słabego zrównoważenia zakłada wymienną kapitałów [34].

Ekosystem jest zrównoważony, gdy łączny kapitał wzrasta, nawet gdy kapitał jednego z wymiarów zrównoważenia zmniejsza się [33].

Ocena zrównoważenia opiera się na kompromisach pomiędzy poszczególnymi wymiarami [21].



10

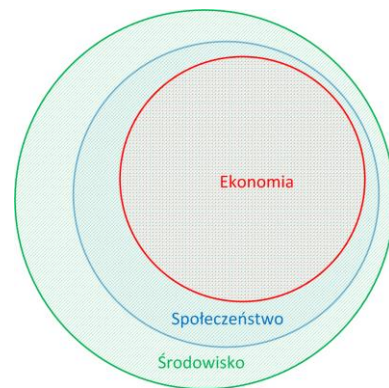
10

Silne zrównoważenie

Koncepcja silnego zrównoważenia zakłada komplementarność kapitałów.

Silne zrównoważenie wymaga wzrostu (nie zmniejszania się) każdego z trzech kapitałów [33] (rozwój maksymalizujący różne cele jednocześnie).

Ocena zrównoważenia opiera się na braku lub niskiej substytucji między kapitałem naturalnym i wytworzonym przez człowieka [21].



11

Przewagi metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji

Metody wielokryterialne mogą być traktowane jako podzbiór metod oceny zrównoważenia, pozwalający na:

- lepsze zrozumienie wyników oceny,
- precyzyjniejsze określenie stopnia realizacji poszczególnych celów [39].



Wykorzystanie metod WWD daje większą elastyczność niż korzystanie z klasycznych indeksów.

Metody WWD charakteryzują się sformalizowaną procedurą obliczeniową, obejmującą: normalizację danych, ważenie kryteriów, agregacja wydajności.



12

Cechy metody PROMETHEE II

PROMETHEE pozwala modyfikować siłę zrównoważenia przez odpowiednie definiowanie modelu preferencji:

- zwykła lub V-kształtna fun. preferencji powoduje, że PROMETHEE II działa jak metoda Borda lub WSM/SAW [46-48] – słabe zrównoważenie [49],
- V-kształtna fun. preferencji z obszarem nierozróżnialności z odpowiednimi wartościami progów pozwala uzyskać silniejsze zrównoważenie [40].

Progi pozwalają uwzględnić w problemie decyzyjnym niepewność preferencji [37].

PROMETHEE nie wymaga niezależności kryteriów (metoda outrankingowa) [31].

PROMETHEE II oferuje pełną porównywalność alternatyw z zastosowaniem globalnej skali ocen [-1,1].

Fuzzy PROMETHEE uwzględnia niepewność preferencji, wag kryteriów i wydajności alternatyw.

13

13

Metody PROSA (PROMETHEE for Sustainability Assessment)

1: Opracowanie nowej metody WWD, pozwalającej na definiowanie liczbowe i stosowanie różnej siły zrównoważenia (słabego, silnego i wartości pośrednich) w rozwiązywanych problemach decyzyjnych.

14

14

Procedura PROMETHEE II

Metody PROMETHEE i PROSA rozpatrują dyskretne problemy decyzyjne, złożone ze zbioru $A = \{a, b, \dots, m\}$ liczącego M alternatyw i zbioru $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ liczącego n kryteriów.

PROMETHEE II - Wariant I

1. Określenie odchyłeń na podstawie porównań parami

$$d_j(a, b) = c_j(a) - c_j(b)$$

$c_j(a)$ – wydajność alternatywy a na j -tym kryterium

2. Zastosowanie funkcji preferencji

$$P_j(a, b) = f_k[d_j(a, b)]$$

f_k - k -ta funkcja preferencji

3. Obliczenie zagregowanych indeksów preferencji

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n P_j(a, b)w_j$$

w_j - waga j -tego kryterium, n - liczba kryteriów

4. Obliczenie pozytywnych i negatywnych przepływów preferencji

$$\phi^+(a) = \frac{\sum_{b=1}^M \pi(a, b)}{m-1}; \phi^-(a) = \frac{\sum_{b=1}^M \pi(b, a)}{m-1}$$

M - liczba alternatyw

5. Obliczenie globalnych przepływów preferencji netto

$$\phi_{net}(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

PROMETHEE II - Wariant II

1. Określenie odchyłeń na podstawie porównań parami

$$d_j(a, b) = c_j(a) - c_j(b)$$

$c_j(a)$ – wydajność alternatywy a na j -tym kryterium

2. Zastosowanie funkcji preferencji

$$P_j(a, b) = f_k[d_j(a, b)]$$

f_k - k -ta funkcja preferencji

3. Obliczenie przepływów preferencji dla pojedynczych kryteriów

$$\phi_j(a) = \frac{\sum_{b=1}^M P_j(a, b) - P_j(b, a)}{M-1}$$

M - liczba alternatyw

4. Obliczenie globalnych przepływów preferencji netto

$$\phi_{net}(a) = \sum_{j=1}^n \phi_j(a)w_j$$

w_j - waga j -tego kryterium, n - liczba kryteriów

- modelowanie preferencji
- agregacja preferencji
- eksploatacja rozwiązania [50]

15

PROMETHEE: efekt kompensacji

3. Obliczenie zagregowanych indeksów preferencji

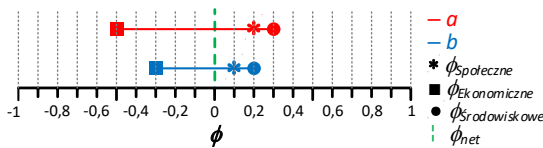
$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n P_j(a, b)w_j$$

w_j - waga j -tego kryterium, n - liczba kryteriów

4. Obliczenie globalnych przepływów preferencji netto

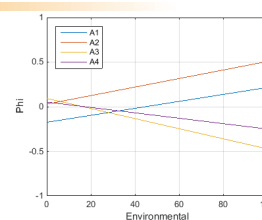
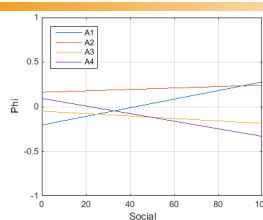
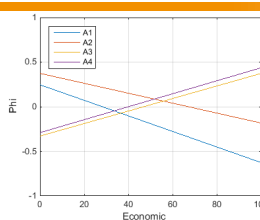
$$\phi_{net}(a) = \sum_{j=1}^n \phi_j(a)w_j$$

w_j - waga j -tego kryterium, n - liczba kryteriów



$$\phi_{net}(a) = 0,2 - 0,5 + 0,3 = 0$$

$$\phi_{net}(b) = 0,1 - 0,3 + 0,2 = 0$$



16

UNIWERSYTET SZCZECIŃSKI
UNIWERSYTET SZCZECIŃSKI
INSTYTUT ZARZĄDZANIA

PROMETHEE: efekt kompensacji

3. Obliczenie zagregowanych indeksów preferencji

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n P_j(a, b) w_j$$

w_j - waga j -tego kryterium, n - liczba kryteriów

4. Obliczenie globalnych przepływów preferencji netto

$$\phi_{net}(a) = \sum_{j=1}^n \phi_j(a) w_j$$

w_j - waga j -tego kryterium, n - liczba kryteriów

$w_1 = w_2 = 0,5$

$\phi_1(a) = 0,1$
 $\phi_2(a) = 0,9$

$\phi_1(b) = 0,75$
 $\phi_2(b) = 0,25$

$\phi_{net}(a) = \phi_{net}(b) = 0,5$

$\phi_{net}(a)$ rośnie liniowo, zależnie od $\phi_j(a)$

Stopień kompensacji kryteriów, z wyłączeniem etapu modelowania preferencji, jest wysoki.

17

17

UNIWERSYTET SZCZECIŃSKI
UNIWERSYTET SZCZECIŃSKI
INSTYTUT ZARZĄDZANIA

Procedura PROSA-C – Wariant I

Etapy PROMETHEE II

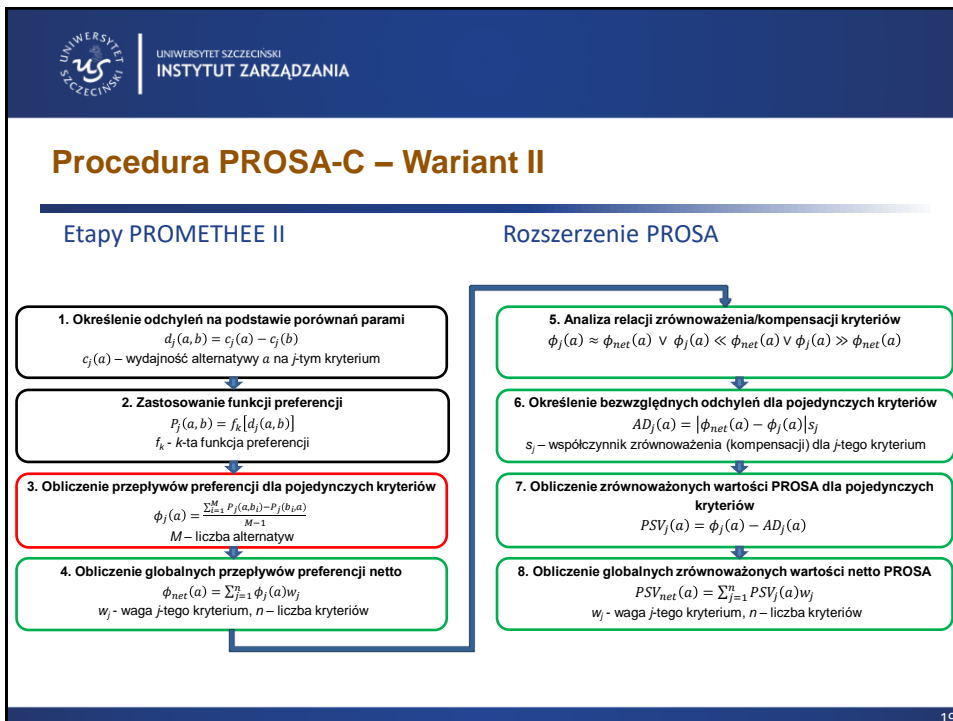
- 1. Określenie odchyłeń na podstawie porównań parami**
 $d_j(a, b) = c_j(a) - c_j(b)$
 $c_j(a)$ – wydajność alternatywy a na j -tym kryterium
- 2. Zastosowanie funkcji preferencji**
 $P_j(a, b) = f_k[d_j(a, b)]$
 f_k - k -ta funkcja preferencji
- 3. Obliczenie zagregowanych indeksów preferencji**
 $\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n P_j(a, b) \times w_j$
 w_j - waga j -tego kryterium, n - liczba kryteriów
- 4. Obliczenie pozytywnych i negatywnych przepływów preferencji**
 $\phi^+(a) = \frac{\sum_{M-1}^n \pi(a, b_i)}{M-1}$; $\phi^-(a) = \frac{\sum_{M-1}^M \pi(b_i, a)}{M-1}$
 M - liczba alternatyw
- 5. Obliczenie globalnych przepływów preferencji netto**
 $\phi_{net}(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$

Rozszerzenie PROSA

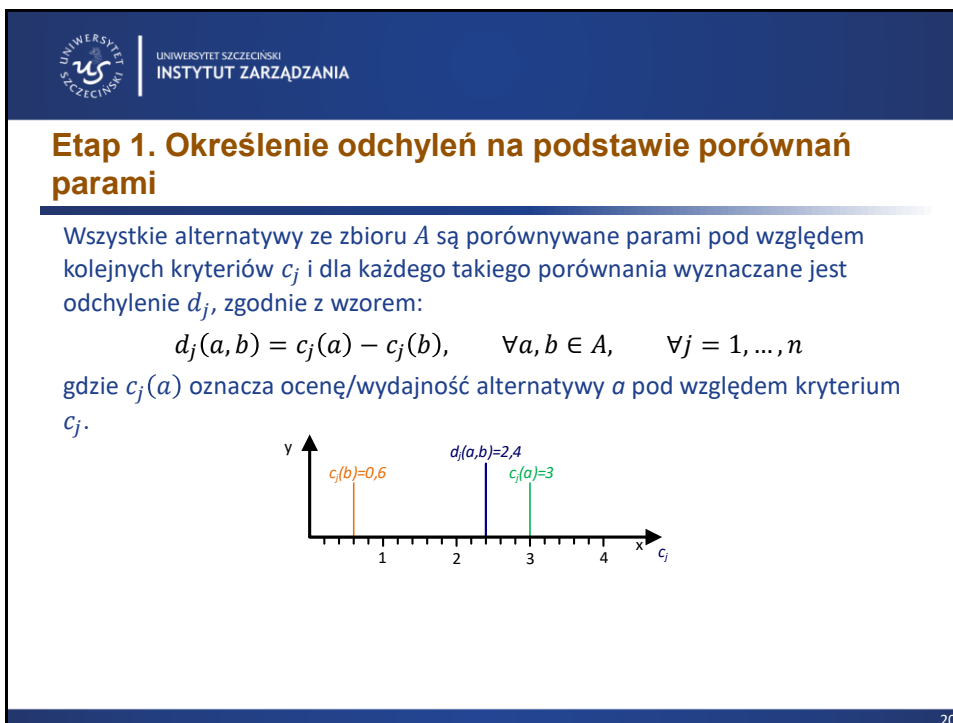
- 6. Analiza relacji zrównoważenia/kompensacji kryteriów**
 $\phi_j(a) \approx \phi_{net}(a) \vee \phi_j(a) \ll \phi_{net}(a) \vee \phi_j(a) \gg \phi_{net}(a)$
- 7. Określenie średniego bezwzględnego odchylenia**
 $WMAD(a) = \sum_{j=1}^n |\phi_{net}(a) - \phi_j(a)| w_j s_j$
 s_j - współczynnik zrównoważenia (kompensacji) dla j -tego kryterium
- 8. Obliczenie globalnych zrównoważonych wartości netto PROSA**
 $PSV_{net}(a) = \phi_{net}(a) - WMAD(a)$

18

18



19

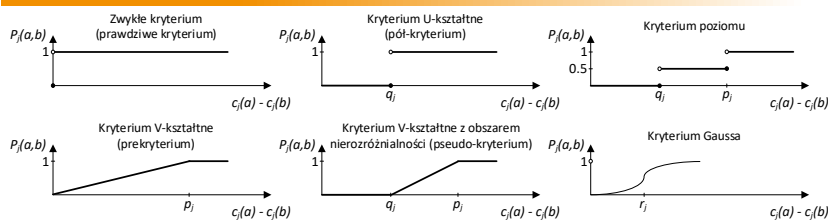
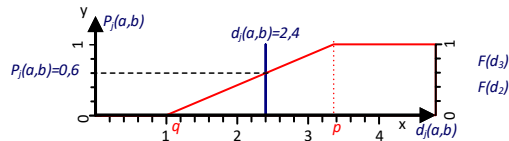


20

Etap 2. Zastosowanie funkcji preferencji

Dla każdego j -tego kryterium dobierane są funkcje preferencji F_j , pozwalające na przekształcenie odchylenia d_j do wartości preferencji $P_j \in [0,1]$:

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)], \quad \forall a, b \in A, \quad \forall j = 1, \dots, n$$



21

21

Etap 3. Obliczenie przepływów preferencji dla pojedynczych kryteriów

Na podstawie wartości preferencji P_j , dla każdej alternatywy pod względem każdego kryterium obliczany jest przepływ preferencji:

$$\phi_j(a) = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M [P_j(a, b_i) - P_j(b_i, a)], \quad \forall a, b_i \in A, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

gdzie

- $\phi_j(a)$ oznacza przepływ preferencji alternatywy a nad każdą inną alternatywą dla j -tego kryterium,
- M oznacza liczbę alternatyw.

Wartości ϕ_j pozwalają uporządkować alternatywy oddzielnie dla każdego kryterium.

22

22



Etap 4. Obliczenie globalnego przepływu preferencji netto

Globalny przepływ preferencji netto dla każdej z alternatyw wyznaczany jest na podstawie wzoru:

$$\phi_{net}(a) = \sum_{j=1}^n \phi_j(a) w_j, \quad \forall a \in A$$

gdzie w_j jest wagą j -tego kryterium, przy czym wagi są znormalizowane ($\sum_{j=1}^n w_j = 1$).

Normalizacja wag jest realizowana zgodnie z wzorem:

$$w_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

Uzyskane wartości ϕ_{net} są końcowym rozwiązaniem według metody PROMETHEE II.

23

23



Etap 5. Analiza relacji zrównoważenia/kompensacji kryteriów

W metodach PROSA wyróżnia się trzy relacje zrównoważenia/kompensacji.

- Zrównoważenie (\approx) – zachodzi, gdy $\phi_j(a) \approx \phi_{net}(a)$
alternatywa a jest zrównoważona pod względem j -tego kryterium.
- Bycie kompensowanym (Cd) – zachodzi, gdy $\phi_j(a) \ll \phi_{net}(a)$
niska wydajność kryterium $c_j(a)$ jest kompensowana przez inne kryterium/kryteria ($\exists \phi_{j'}(a): \phi_j(a) Cd \phi_{j'}(a)$).
- Kompensowanie (Cs) – zachodzi, gdy $\phi_j(a) \gg \phi_{net}(a)$
wysoka wydajność kryterium $c_j(a)$ kompensuje niższą wydajność innego kryterium/kryteriów ($\exists \phi_{j'}(a): \phi_j(a) Cs \phi_{j'}(a)$).

Operatory \ll oraz \gg oznaczają umowne relacje „znacznie mniejsze niż” oraz „znacznie większe niż”.

Relacje te wyrażają subiektywny pogląd decydenta o tym czy wartość po lewej stronie operatora jest dużo mniejsza/dużo większa od wartości po prawej.

24

24

Etap 6. Określenie bezwzględnych odchyłeń dla pojedynczych kryteriów

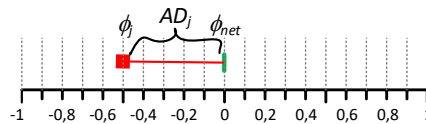
Wartości bezwzględnego odchylenia wyznaczone są odrębnie dla każdego z kryteriów:

$$AD_j(a) = |\phi_{net}(a) - \phi_j(a)|s_j, \quad \forall a \in A, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

gdzie s_j jest współczynnikiem zrównoważenia (kompensacji) dla j -tego kryterium.

Łatwo zauważyć, że:

- s_j jest pewnego rodzaju współczynnikiem wagowym ($[0,1]$),
- $AD_j(a)$ jest ważoną odległością globalnego rozwiązania $\phi_{net}(a)$ od rozwiązania jednokryterialnego $\phi_j(a)$.



25

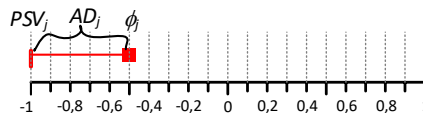
25

Etap 7. Obliczenie zrównoważonych wartości PROSA dla pojedynczych kryteriów

Dla każdej alternatywy pod względem każdego kryterium, obliczana jest zrównoważona wartość PROSA:

$$PSV_j(a) = \phi_j(a) - AD_j(a), \quad \forall a \in A, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

gdzie $PSV_j(a)$ opisuje zrównoważenie alternatywy a pod względem j -tego kryterium.



Wartość $PSV_j(a)$ to wartość jednokryterialnego przepływu preferencji $\phi_j(a)$, pomniejszona o ważoną wartość bezwzględnego odchylenia $AD_j(a)$.

Im mniejsze odchylenie $AD_j(a)$, tym wartość $PSV_j(a)$ jest bliższa wartości $\phi_j(a)$.

26

26

Etap 8. Obliczenie globalnych zrównoważonych wartości netto PROSA

Zrównoważona wartość PROSA netto jest wyznaczana wzorem:

$$PSV_{net}(a) = \sum_{j=1}^n PSV_j(a) w_j, \quad \forall a \in A$$

Im mniejsze odchylenie $AD_j(a)$, tym wartość $PSV_j(a)$ jest bliższa wartości $\phi_j(a)$.

Idealnie zrównoważonym rozwiązaniem jest takie, dla którego zachodzi równość $\phi_j(a) = \phi_{net}(a), \forall j = 1, \dots, n$ (wartość $AD_j(a) = 0$)

Gdy $PSV_j(a) = \phi_j(a), \forall j = 1, \dots, n$, wtedy zachodzi $PSV_{net}(a) = \phi_{net}(a)$.

27

27

Współczynnik zrównoważenia/kompensacji s_j

Teoretycznie współczynnik s_j może przyjmować wartości z zakresu $(-\infty, +\infty)$.

Jeżeli wartość $s_j = 0 \forall j = 1, \dots, n: PSV_{net}(\cdot) = \phi_{net}(\cdot)$

(otrzymuje się rozwiązanie PROMETHEE II zachowujące skalę $[-1,1]$).

Wartość $s_j > 0$ preferuje alternatywy silniej zrównoważone, a stopień kompensacji dla j -tego kryterium zmniejsza się.

Wartość $s_j < 0$ preferowałaby alternatywy niezrównoważone.

$s_j \in [0, +\infty)$ zapewnia zachowanie skali $(-\infty, 1]$ dla $PSV_{net}(a)$.

$s_j \in (-\infty, 0]$ zapewnia zachowanie skali $[-1, +\infty)$ dla $PSV_{net}(a)$.

Na drodze eksperymentów badawczych stwierdzono, że **zalecanymi wartościami współczynnika zrównoważenia s_j jest zakres $[0,0.3]$ lub $[0,0.5]$.**

Jeżeli decydent chce bardziej premiować zrównoważone alternatywy, a nie jest dla niego istotne zachowanie skali $[-1,1]$ dla PSV_{net} , **wtedy wartości współczynnika s_j mogą być większe.**

28

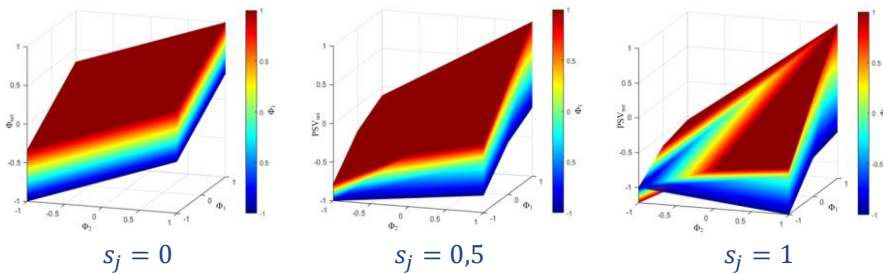
28

Współczynnik zrównoważenia/kompensacji s_j

Gdy $s_j = 0.5$, wtedy ϕ_j mają większy wpływ na ogólną wydajność (wartość PSV_{net}) niż współczynnik zrównoważenia/kompensacji s_j .

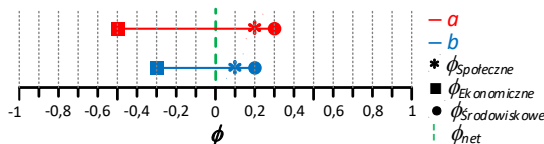
Gdy $s_j = 1$, wtedy s_j ma silniejszy wpływ na rozwiązanie, niż wartości ϕ_j .

Potwierdzeniem tej obserwacji jest fakt, że w przypadku $s_j = 1$ wartość PSV_{net} jest większa dla $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3$ niż dla $\phi_3 > \phi_1 = \phi_2$.



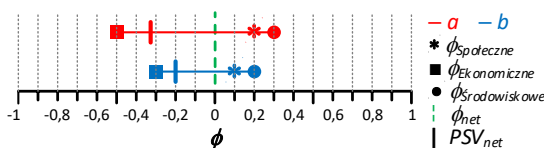
29

Porównanie wyników metod PROSA i PROMETHEE: eksploatacja rozwiązania



$$\phi_{net}(a) = 0,2 - 0,5 + 0,3 = 0$$

$$\phi_{net}(b) = 0,1 - 0,3 + 0,2 = 0$$



$s_j = 1$

$$AD_{Sp}(a) = |0 - 0,2| = 0,2$$

$$AD_{Ek}(a) = |0 - (-0,5)| = 0,5$$

$$AD_{\dot{S}r}(a) = |0 - 0,3| = 0,3$$

$$PSV_{Sp}(a) = 0,2 - 0,2 = 0$$

$$PSV_{Ek}(a) = -0,5 - 0,5 = -1$$

$$PSV_{\dot{S}r}(a) = 0,3 - 0,3 = 0$$

$$PSV_{net}(a) = -0,333$$

$$AD_{Sp}(b) = |0 - 0,1| = 0,1$$

$$AD_{Ek}(b) = |0 - (-0,3)| = 0,3$$

$$AD_{\dot{S}r}(b) = |0 - 0,2| = 0,2$$

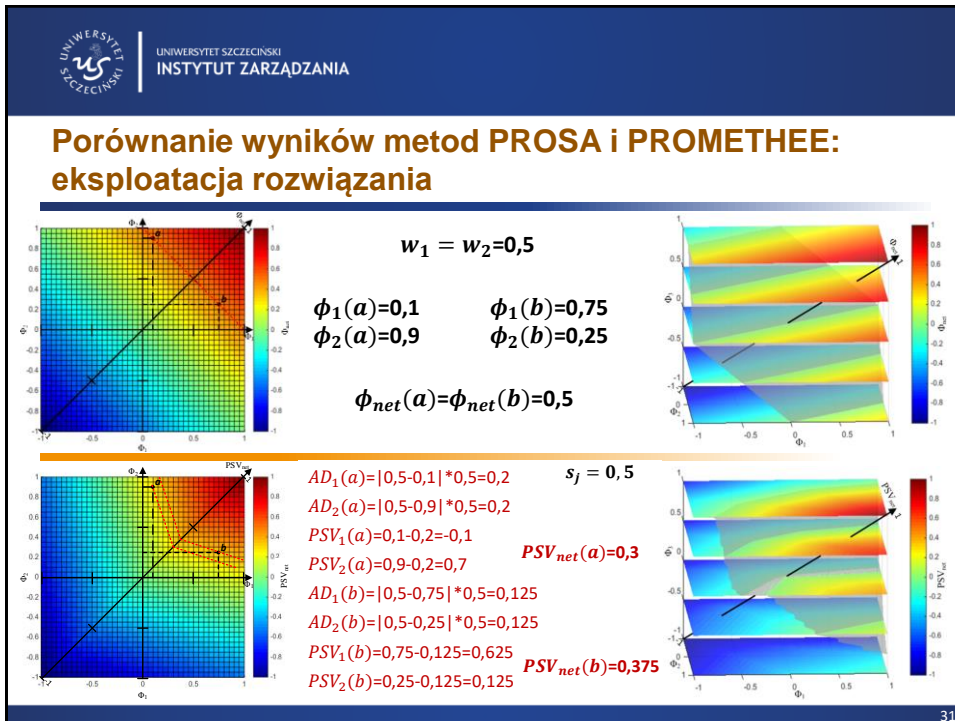
$$PSV_{Sp}(b) = 0,1 - 0,1 = 0$$

$$PSV_{Ek}(b) = -0,3 - 0,3 = -0,6$$

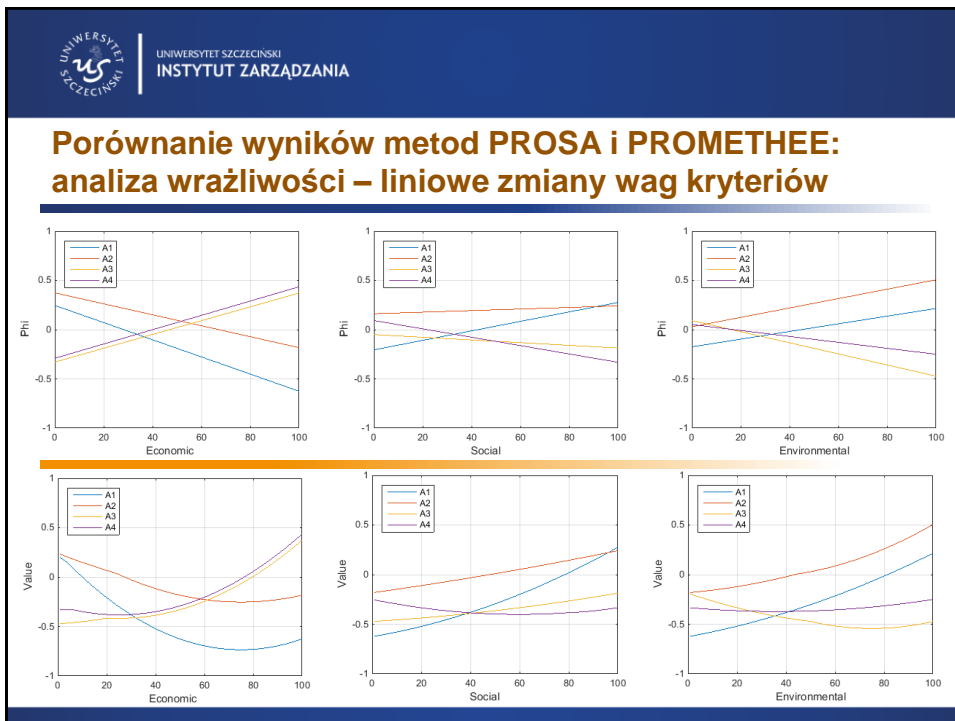
$$PSV_{\dot{S}r}(b) = 0,2 - 0,2 = 0$$

$$PSV_{net}(b) = -0,2$$

30



31



32



Podsumowanie: cechy metod PROSA – podobieństwa do PROMETHEE II

PROSA rozszerza procedurę obliczeniową PROMETHEE II.

Umożliwia skorzystanie z funkcji preferencji stosowanych w PROMETHEE – wpływ na stopień kompensacji i uwzględnienie niepewności preferencji.

Stosuje normalizację kryteriów do skali [0,1] oraz umożliwia uzyskanie kompletnego rankingu alternatyw (bez nieporównywalności).

Umożliwia analizę wrażliwości rozwiązania na zmiany wag kryteriów i wydajności alternatyw na kryteriach.

Pozwala rozpatrywać problemy decyzyjne na poziomie kryteriów i wymiarów zrównoważenia.

Umożliwia deskryptywną analizę problemu decyzyjnego z zastosowaniem procedury GAIA.

33

33



Podsumowanie: cechy metod PROSA – różnice względem PROMETHEE II

W przeciwieństwie do PROMETHEE, **charakteryzuje się nieliniową wrażliwością na zmiany wag kryteriów.**

Dzięki ograniczeniu liniowej kompensacji kryteriów, **zapewnia niższy od PROMETHEE II stopień substytucji, a tym samym silniejsze zrównoważenie.**

Podobnie jak ELECTRE III z progiem veto, **powoduje rangowanie dobrze zbalansowanych alternatyw przed alternatywami gorzej zbalansowanymi, co potwierdza niski stopień kompensacji [53].**

Umożliwia bezpośrednie określenie stopnia kompensacji/siły zrównoważenia kryteriów za pomocą wartości liczbowej.

Pozwala na analizę wrażliwości rozwiązania na zmiany siły zrównoważenia kryteriów.

34

34



PROSA - publikacje

Ziemia, P., Wątróbski, J., Ziolo, M., & Karczmarczyk, A. (2017). Using the PROSA Method in Offshore Wind Farm Location Problems. *Energies*, 10(11), 1755. <https://doi.org/10.3390/en10111755>.

Ziemia, P. (2019). Towards Strong Sustainability Management—A Generalized PROSA Method. *Sustainability*, 11(6), 1555. <https://doi.org/10.3390/su11061555>

Ziemia, P. (2020). Multi-Criteria Stochastic Selection of Electric Vehicles for the Sustainable Development of Local Government and State Administration Units in Poland. *Energies*, 13(23), 6299. <https://doi.org/10.3390/en13236299>

Ziemia, P. (2021). Multi-Criteria Group Assessment of E-Commerce Websites Based on the New PROSA GDSS Method—the Case of Poland. *IEEE Access*, 9, 126595–126609. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112573>

35

35



Metoda NEAT F-PROMETHEE (New Easy Approach To Fuzzy PROMETHEE)

2: Opracowanie metody WWD, w jak największym stopniu radzącej sobie z niepewnością, poprzez uwzględnienie niepewności danych i umożliwienie jak najszerzej analizy niepewności.

36

36



Zbiory rozmyte i PROMETHEE

Jednym ze sposobów radzenia sobie z niepewnością jest zastosowanie zbiorów rozmytych.

W literaturze naukowej dostrzec można różne próby połączenia teorii zbiorów rozmytych z metodami PROMETHEE.

Na wejście metody PROMETHEE podawane są dane rozmyte, wyrażające niepewne i nieprecyzyjne wartości alternatyw i ważności kryteriów.

W dalszych etapach stosowane jest jedno z dwóch podejść:

- Logika rozmyta stosowana jest na początku procesu decyzyjnego w celu ujęcia niepewnych danych i wyostrzenia ich. Następnie ostre dane są podawane na wejście klasycznej (ostrej) metody PROMETHEE.
- Logika rozmyta jest włączona do procedury obliczeniowej stosowanej w PROMETHEE. Fuzzy PROMETHEE operuje na danych rozmytych, dając na wyjściu rozmyte zagregowane wydajności alternatyw, które są wyostrzane dopiero w ostatnim kroku procedury [57].

37

37



Niedoskonałości implementacji Fuzzy PROMETHEE

Szereg implementacji daje możliwość zastosowania tylko wybranych funkcji preferencji, nie definiując metodyki postępowania dla wszystkich funkcji preferencji dostępnych w klasycznej metodzie PROMETHEE.

Problemem w wielu implementacjach jest niezachowanie skali $[0,1]$ dla wartości \tilde{P}_j i $\tilde{\pi}$ oraz skali $[-1,1]$ dla ϕ .

Niektóre implementacje nie definiują reguł porównywania liczb rozmytych (np. $c_j(\tilde{a}) > c_j(\tilde{b})$) i pozwalają stosować tylko wartości lingwistyczne, bez użycia naturalnych skal liczbowych dla kryteriów.

Wybrane implementacje stosują normalizację macierzy decyzyjnej powoduje problemy z właściwym zdefiniowaniem przez decydenta pożądanych wartości progów nierozróżnialności i preferencji.

Implementacje stosujące pewne rozszerzenia i uogólnienia zbiorów rozmytych (np. Intuitionistic, Hesitant, Axiomatic, type-2) charakteryzują się wysoką złożonością, a przez to trudnością użycia i interpretacji [57].

38

38

Założenia metody NEAT F-PROMETHEE

Zgodność z założeniami klasycznej metody PROMETHEE odnośnie do stosowanych funkcji preferencji i zgodności ze skalą wykorzystywaną w klasycznej PROMETHEE:

- możliwość użycia podstawowych sześciu funkcji preferencji,
- zgodność ze skalą $[0,1]$ dla wartości $\tilde{P}_j(\tilde{a}_j)$ i $\tilde{\pi}$,
- zgodność ze skalą $[-1,1]$ dla ϕ .

Umożliwienie zastosowania wartości ostrych i rozmytych na ich naturalnych skalach oraz rozmytej skali lingwistycznej.

Brak stosowania normalizacji macierzy decyzyjnej, ponieważ taka normalizacja może powodować trudności z ustaleniem wartości progów preferencji.

Dostarczanie jak największej ilości wartościowych informacji dotyczących niepewności i nieprecyzyjności uzyskanego rozwiązania.

Prostota obliczeniowa, łatwość użycia i interpretacji wyników.

39

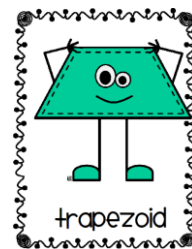
39

Łatwość użycia metody i interpretacji wyników

Jedną z podstawowych zalet metody PROMETHEE jest mała złożoność, prostota i przejrzystość procedury obliczeniowej oraz łatwość użycia [58].

Ze względu na prostotę obliczeń właściwe wydaje się oparcie opracowywanej metody na trapezowych liczbach rozmytych (TFNs):

- łatwość użycia i łatwość wyjaśnienia ich interpretacji osobom, które nie znają teorii zbiorów rozmytych [59],
- wydajność obliczeniowa i łatwość pozyskania danych [60],
- rozsądny kompromis między tendencją do utraty zbyt dużej ilości informacji i tendencją do wprowadzania zbyt skomplikowanych form aproksymacji [60].



40

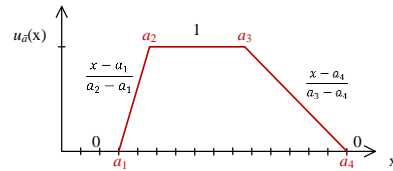
40

Podstawowe operacje na TFNs

Trapezowa liczba rozmyta $\tilde{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ jest zdefiniowana funkcją przynależności $\mu_{\tilde{a}}(x) \in [0,1]$:

$$\mu_{\tilde{a}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & \text{dla } x \in [a_1, a_2) \\ 1 & \text{dla } x \in [a_2, a_3] \\ \frac{x-a_4}{a_3-a_4} & \text{dla } x \in (a_3, a_4] \\ 0 & \text{dla } x \notin [a_1, a_4] \end{cases}$$

gdzie $a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4$



- jeżeli $a_1 = a_2 = a_3 = a_4$, to \tilde{a} jest liczbą ostrą,
- jeżeli $a_1 = a_2$ oraz $a_3 = a_4$, to \tilde{a} jest przedziałem liczbowym,
- jeżeli $a_2 = a_3$, to \tilde{a} jest trójkątną liczbą rozmytą [61].

Suma i różnica TFNs także ma postać TFN.

Iloczyn i iloraz TFNs daje przybliżoną TFN (**wynik nie jest TFN**) [62].

$$\tilde{a} \oplus \tilde{b} = (a_1, a_2, a_3, a_4) \oplus (b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3, a_4 + b_4)$$

$$\tilde{a} \ominus \tilde{b} = (a_1, a_2, a_3, a_4) \ominus (b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 - b_4, a_2 - b_3, a_3 - b_2, a_4 - b_1)$$

$$\tilde{a} \otimes r = (a_1, a_2, a_3, a_4) \otimes r = (a_1 \times r, a_2 \times r, a_3 \times r, a_4 \times r)$$

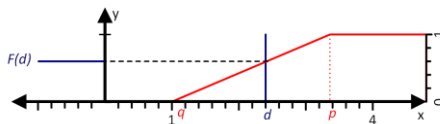
41

41

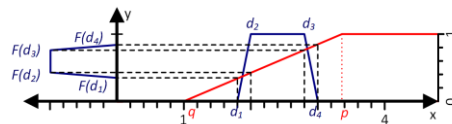
Mapowanie preferencji w PROMETHEE

W PROMETHEE podczas stosowania funkcji preferencji przeprowadzane jest mapowanie liczb z przestrzeni X na Y.

Mapowanie liczby ostrej



Mapowanie trapezowej liczby rozmytej



W przypadku liczby ostrej, tylko jeden punkt jest mapowany z osi X na Y.

W przypadku liczby trapezowej, mapowane są cztery punkty.

Podczas dokładnego mapowania TFN powinien być rzutowany każdy punkt tej liczby, a nie tylko cztery punkty charakterystyczne.

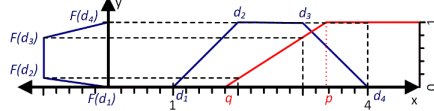
Uprozczone mapowanie może powodować, że uzyskane wartości będą niedokładne i będą tylko w przybliżeniu opisywały prawdziwą wartość liczby.

42

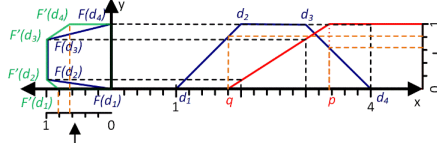
42

Uprozczone mapowanie preferencji w Fuzzy PROMETHEE

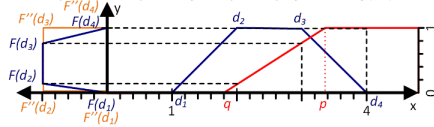
Uprozczone mapowanie trapezowej liczby rozmytej (F)



Dokładne mapowanie (F')



Mapowanie trapezowej liczby rozmytej z korektą (F'')



TFN $\tilde{d} = (d_1, d_2, d_3, d_4) = (1, 2, 3, 4)$,

jest mapowana z zastosowaniem liniowej funkcji preferencji (pseudo-kryterium) z parametrami: $q = 1.8$ i $p = 3.4$.

Funkcja mapująca dla pseudo-kryterium:

$$\bar{F}(\tilde{d}) = (F(d_1), F(d_2), F(d_3), F(d_4)) = \begin{cases} 0 & \text{dla } d_t \leq q \\ \frac{d_t - q}{p - q} & \text{dla } q < d_t \leq p \\ 1 & \text{dla } d_t > p \\ t = 1, 2, 3, 4 \end{cases}$$

W przypadku uproszczonego mapowania:

$$\bar{F}(\tilde{d}) = (F(d_1), F(d_2), F(d_3), F(d_4)) = \left(0, \frac{2-1.8}{3.4-1.8}, \frac{3-1.8}{3.4-1.8}, 1\right) = (0, 0.125, 0.75, 1).$$

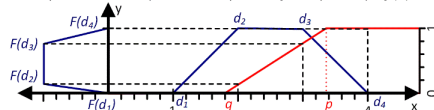
Zgodnie z funkcją przynależności dla TFNs [63], wartości liczby rozmytej we wskazanych punktach wynoszą $\mu_{\bar{F}(\tilde{d})}(y) = (0, 1, 1, 0)$.

43

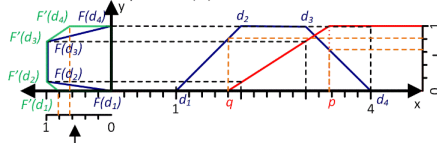
43

Dokładne mapowanie preferencji w Fuzzy PROMETHEE

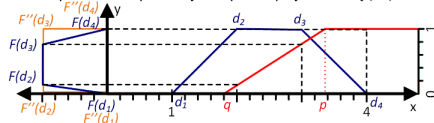
Uprozczone mapowanie trapezowej liczby rozmytej (F)



Dokładne mapowanie (F')



Mapowanie trapezowej liczby rozmytej z korektą (F'')



W przypadku dokładnego mapowania, dla określenia wartości w punktach $(0, 0.125, 0.75, 1)$, należy zastosować fun. [64]:

$$\mu_{\bar{a}}(\tilde{a})(y) = \max_{y=F(x)} \mu_{\tilde{a}}(x)$$

Opierając się na maksymalnych wartościach

$\mu_{\tilde{a}}(x)$ w punktach q i p , które wynoszą

$$\mu_{\tilde{a}}(q) = \left(\frac{q - d_1}{d_2 - d_1} \Leftrightarrow d_1 < q \leq d_2\right) = \frac{1.8 - 1}{2 - 1} = 0.8$$

$$\mu_{\tilde{a}}(p) = \left(\frac{d_4 - p}{d_4 - d_3} \Leftrightarrow d_3 \leq p < d_4\right) = \frac{4 - 3.4}{4 - 3} = 0.6$$

łatwo zauważyć, że wartości liczby rozmytej w punktach $(0, 0.125, 0.75, 1)$ powinny wynosić $\mu_{\bar{F}(\tilde{a})}(y) = (0.8, 1, 1, 0.6)$.

Wobec tego uproszczone mapowanie generuje relatywnie duży błąd przybliżenia.

44

44

UNIWERSYTET SZCZECIŃSKI
UNIWERSYTET SZCZECIŃSKI
INSTYTUT ZARZĄDZANIA

Mapowanie preferencji w NEAT F-PROMETHEE

Uprozczone mapowanie trapezowej liczby rozmytej (F)

Dokładne mapowanie (F')

Mapowanie trapezowej liczby rozmytej z korektą (F'')

W NEAT F-PROMETHEE wprowadzono korektę kształtu uzyskanej TFN, aby była ona jak najbliższa wynikowi precyzyjnego mapowania.

Korekta dla pseudo-kryterium:

$$\begin{cases} F(d_2) = 0 & \text{gdy } \frac{q-d_1}{d_2-d_1} > 0.5 \text{ dla } d_1 < q \leq d_2 \\ F(d_3) = 1 & \text{gdy } \frac{d_4-p}{d_4-d_3} > 0.5 \text{ dla } d_3 \leq p < d_4 \end{cases}$$

W przypadku rozpatrywanej w tym przykładzie liczby \tilde{d} korekta zachodzi dla:

$F(d_2) = 0$, ponieważ $\frac{q-d_1}{d_2-d_1} = 0.8 > 0.5$.

$F(d_3) = 1$, ponieważ $\frac{d_4-p}{d_4-d_3} = 0.6 > 0.5$.

45

45

UNIWERSYTET SZCZECIŃSKI
UNIWERSYTET SZCZECIŃSKI
INSTYTUT ZARZĄDZANIA

Podstawowe informacje o NEAT F-PROMETHEE

NEAT F-PROMETHEE rozpatruje rozmyte problemy decyzyjne, w których ujęty jest m -elementowy zbiór rozmytych alternatyw $\tilde{A} = \{\tilde{a}, \tilde{b}, \dots, \tilde{m}\}$ i n -elementowy zbiór kryteriów $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$.

NEAT F-PROMETHEE pozwala stosować TFNs, liczby trójkątne, przedziały i liczby ostre.

NEAT F-PROMETHEE pozwala posługiwać się naturalnymi, rozmytymi wartościami kryteriów i skalami lingwistycznymi dla ocen alternatyw i wag kryteriów.

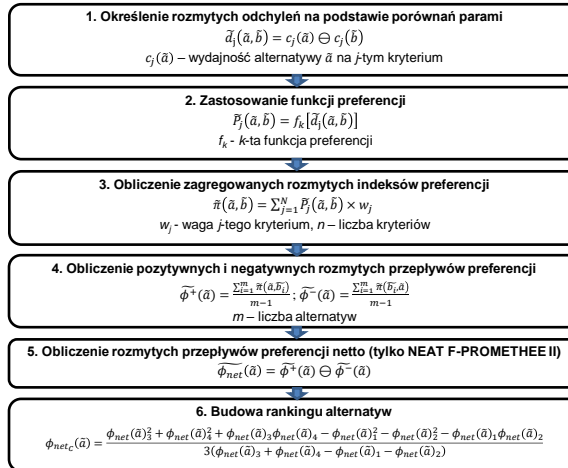
Wagi kryteriów

Oceny alternatyw

46

46

Procedura NEAT F-PROMETHEE



47

47

Etap 1. Określenie rozmytych odchyłeń na podstawie porównań parami

Wszystkie alternatywy ze zbioru \tilde{A} są porównywane parami pod względem kolejnych kryteriów c_j i dla każdego takiego porównania wyznaczane jest odchylenie \tilde{a}_j , zgodnie z wzorem:

$$\tilde{a}_j(\tilde{a}, \tilde{b}) = c_j(\tilde{a}) \ominus c_j(\tilde{b}), \quad \forall \tilde{a}, \tilde{b} \in \tilde{A}, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

gdzie $c_j(\tilde{a})$ oznacza rozmytą wartość alternatywy \tilde{a} dla j -tego kryterium.

48

48

Etap 2. Zastosowanie funkcji preferencji

Wartość $\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})$ jest mapowana z zastosowaniem wybranej funkcji preferencji f , należącej do sekwencji funkcji mapujących $F = \{f_1, \dots, f_6\}$:

$$\tilde{P}_j(\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) = f_{k_j}[\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})], \quad \forall \tilde{a}, \tilde{b} \in \tilde{A}, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

Stosowane funkcje preferencji

($t = 1, \dots, 4$):

Zwykłe (prawdziwe) kryterium (f_1):

$$\tilde{P}_j(\tilde{d}_j) = (P_j(d_{j1}), P_j(d_{j2}), P_j(d_{j3}), P_j(d_{j4})) = \begin{cases} 0 & \text{for } d_{jt} \leq 0 \\ 1 & \text{for } d_{jt} > 0 \end{cases}$$

Kryterium U-kształtne (półkryterium) (f_2):

$$\tilde{P}_j(\tilde{d}_j) = (P_j(d_{j1}), P_j(d_{j2}), P_j(d_{j3}), P_j(d_{j4})) = \begin{cases} 0 & \text{for } d_{jt} \leq q_j \\ 1 & \text{for } d_{jt} > p_j \end{cases}$$

Kryterium V-kształtne (prekryterium) (f_3):

$$\tilde{P}_j(\tilde{d}_j) = (P_j(d_{j1}), P_j(d_{j2}), P_j(d_{j3}), P_j(d_{j4})) = \begin{cases} 0 & \text{for } d_{jt} \leq 0 \\ \frac{d_{jt}}{p_j} & \text{for } 0 < d_{jt} \leq p_j \\ 1 & \text{for } d_{jt} > p_j \end{cases}$$

Kryterium poziomu (f_4):

$$\tilde{P}_j(\tilde{d}_j) = (P_j(d_{j1}), P_j(d_{j2}), P_j(d_{j3}), P_j(d_{j4})) = \begin{cases} 0 & \text{for } d_{jt} \leq q_j \\ \frac{1}{2} & \text{for } q_j < d_{jt} \leq p_j \\ 1 & \text{for } d_{jt} > p_j \end{cases}$$

Kryterium V-kształtne z obszarem nierozróżnialności (pseudo-kryterium) (f_5):

$$\tilde{P}_j(\tilde{d}_j) = (P_j(d_{j1}), P_j(d_{j2}), P_j(d_{j3}), P_j(d_{j4})) = \begin{cases} 0 & \text{for } d_{jt} \leq q_j \\ \frac{d_{jt} - q_j}{p_j - q_j} & \text{for } q_j < d_{jt} \leq p_j \\ 1 & \text{for } d_{jt} > p_j \end{cases}$$

Kryterium Gaussa (f_6):

$$\tilde{P}_j(\tilde{d}_j) = (P_j(d_{j1}), P_j(d_{j2}), P_j(d_{j3}), P_j(d_{j4})) = \begin{cases} 0 & \text{for } d_{jt} \leq 0 \\ 1 - \exp\left(\frac{-d_{jt}^2}{2r_j^2}\right) & \text{for } d_{jt} > 0 \end{cases}$$

49

49

Etap 2. Zastosowanie funkcji preferencji

Wartość $\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})$ jest mapowana z zastosowaniem wybranej funkcji preferencji f , należącej do sekwencji funkcji mapujących $F = \{f_1, \dots, f_6\}$:

$$\tilde{P}_j(\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) = f_{k_j}[\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})], \quad \forall \tilde{a}, \tilde{b} \in \tilde{A}, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

Zależnie od wybranej funkcji preferencji, mogą być stosowane progi: nierozróżnialności (q_j), preferencji (p_j) lub gaussowski (r_j).

W NEAT F-PROMETHEE wykorzystywane są ostre wartości progów (q_j, p_j, r_j), aby uniknąć dzielenia dwóch trapezoidalnych liczb rozmytych, co skutkowałooby niedokładnościami w obliczeniach i utratą informacji.

50

50

Etap 2. Zastosowanie funkcji preferencji

Wartość $\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})$ jest mapowana z zastosowaniem wybranej funkcji preferencji f , należącej do sekwencji funkcji mapujących $F = \{f_1, \dots, f_6\}$:

$$\tilde{P}_j(\tilde{a}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) = f_{k_j}[\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})], \quad \forall \tilde{a}, \tilde{b} \in \tilde{A}, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

Wynik mapowania jest weryfikowany i korygowany jest błąd przybliżenia powstający podczas mapowania. Warunki wystąpienia korekty opisane są wzorem:

$$\begin{cases} P_j(d_{j2}) = 0 \text{ if } \frac{u-d_{j1}}{d_{j2}-d_{j1}} > 0.5 \text{ dla } d_{j1} < u \leq d_{j2} \\ P_j(d_{j3}) = 1 \text{ if } \frac{d_{j4}-v}{d_{j4}-d_{j3}} > 0.5 \text{ dla } d_{j3} \leq v < d_{j4} \end{cases}$$

Zależnie od zastosowanej funkcji preferencji, współczynniki u oraz v przyjmują wartości:

- dla zwykłego kryterium: $u = 0, v = 0$,
- dla półkryterium: $u = q_j, v = q_j$,
- dla prekryterium: $u = 0, v = p_j$,
- dla kryterium poziomu i pseudokryterium: $u = q_j, v = p_j$,
- dla kryterium Gaussa: $u = 0, v = \infty$.

51

51

Etap 2. Zastosowanie funkcji preferencji

Wartość $\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})$ jest mapowana z zastosowaniem wybranej funkcji preferencji f , należącej do sekwencji funkcji mapujących $F = \{f_1, \dots, f_6\}$:

$$\tilde{P}_j(\tilde{a}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) = f_{k_j}[\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})], \quad \forall \tilde{a}, \tilde{b} \in \tilde{A}, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

Wartości $\tilde{P}_j(\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b}))$ określają lokalne porządki dla każdej pary alternatyw w oparciu o system relacji preferencyjnych, zaproponowany przez Roy'a [65]:

- $\tilde{P}_j(\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) = 0$ - lokalna nierozróżnialność pomiędzy alternatywami \tilde{a} oraz \tilde{b} ($\tilde{a} I \tilde{b}$),
- $\tilde{P}_j(\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) = 1$ - lokalna ścisła preferencja alternatywy \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} P \tilde{b}$),
- $\tilde{P}_j(\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) = (0,1)$ - lokalna słaba preferencja alternatywy \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} Q \tilde{b}$),
- $\tilde{P}_j(\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) = [0,1)$ - lokalna J-preferencja alternatywy \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} J \tilde{b}$) - ($\tilde{a} I \tilde{b}$)($\tilde{a} Q \tilde{b}$),
- $\tilde{P}_j(\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) = (0,1]$ - lokalna preferencja alternatywy \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} > \tilde{b}$) - ($\tilde{a} Q \tilde{b}$)($\tilde{a} P \tilde{b}$),
- $\tilde{P}_j(\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) = [0,1]$ - lokalne przewyższenie \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} S \tilde{b}$) - ($\tilde{a} I \tilde{b}$)($\tilde{a} Q \tilde{b}$)($\tilde{a} P \tilde{b}$).

52

52

Etap 3. Obliczenie zagregowanych rozmytych indeksów preferencji

Kolejnym etapem jest wyznaczenie zagregowanych indeksów preferencji :

$$\tilde{\pi}(\tilde{a}, \tilde{b}) = \sum_{j=1}^n \tilde{P}_j(\tilde{a}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) \otimes w_j, \quad \forall \tilde{a}, \tilde{b} \in \tilde{A}$$

gdzie w_j jest zdefuzyfikowaną i znormalizowaną ($\sum_{j=1}^n w_j = 1$) wagą j -tego kryterium.

Wagi muszą być znormalizowane do 1, aby zachować skalę [0,1] dla $\tilde{\pi}$ i [-1,1] dla $\phi(\tilde{a})$.

W NEAT F-PROMETHEE wagi kryteriów są definiowane jako wartości lingwistyczne, którym odpowiadają trapezowe liczby rozmyte $\tilde{W}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}, w_{j4})$.

Przed obliczeniem $\tilde{\pi}(\tilde{a}, \tilde{b})$ należy wyostrzyć wagi metodą środka ciężkości:

$$w_j(\tilde{W}_j) = \frac{w_{j3}^2 + w_{j4}^2 + w_{j3}w_{j4} - w_{j1}^2 - w_{j2}^2 - w_{j1}w_{j2}}{3(w_{j3} + w_{j4} - w_{j1} - w_{j2})}, \quad \forall j = 1, \dots, n$$

Ze względu na specyfikę metody środka ciężkości, jeżeli waga jest wartością ostrą, wtedy nie przeprowadza się defuzyfikacji.

Defuzyfikacja wag kryteriów pozwala uniknąć powstania błędu przybliżenia podczas mnożenia rozmytej wagi \tilde{w}_j i rozmytej preferencji \tilde{P}_j .

53

53

Etap 3. Obliczenie zagregowanych rozmytych indeksów preferencji

Kolejnym etapem jest wyznaczenie zagregowanych indeksów preferencji :

$$\tilde{\pi}(\tilde{a}, \tilde{b}) = \sum_{j=1}^n \tilde{P}_j(\tilde{a}_j(\tilde{a}, \tilde{b})) \otimes w_j, \quad \forall \tilde{a}, \tilde{b} \in \tilde{A}$$

gdzie w_j jest zdefuzyfikowaną i znormalizowaną ($\sum_{j=1}^n w_j = 1$) wagą j -tego kryterium.

Wagi muszą być znormalizowane do 1, aby zachować skalę [0,1] dla $\tilde{\pi}$ i [-1,1] dla $\phi(\tilde{a})$.

Zagregowane indeksy preferencji określają globalne porządki dla każdej pary alternatyw, w oparciu o system relacji preferencyjnych [65]:

- $\tilde{\pi}(\tilde{a}, \tilde{b}) = 0$ - globalna nierozróżnialność pomiędzy \tilde{a} i \tilde{b} ($\tilde{a} I \tilde{b}$),
- $\tilde{\pi}(\tilde{a}, \tilde{b}) = 1$ - globalna ścisła preferencja alternatywy \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} P \tilde{b}$),
- $\tilde{\pi}(\tilde{a}, \tilde{b}) = (0,1)$ - globalna słaba preferencja alternatywy \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} Q \tilde{b}$),
- $\tilde{\pi}(\tilde{a}, \tilde{b}) = [0,1]$ - globalna J-preferencja alternatywy \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} J \tilde{b}$) - ($\tilde{a} I \tilde{b}$)($\tilde{a} Q \tilde{b}$),
- $\tilde{\pi}(\tilde{a}, \tilde{b}) = (0,1]$ - globalna preferencja alternatywy \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} > \tilde{b}$) - ($\tilde{a} Q \tilde{b}$)($\tilde{a} P \tilde{b}$),
- $\tilde{\pi}(\tilde{a}, \tilde{b}) = [0,1]$ - globalne przewyższanie \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} S \tilde{b}$) - ($a I b$)($a Q b$)($a P b$).

54

54

Etap 4. Obliczenie pozytywnych i negatywnych rozmytych przepływów preferencji

Etap czwarty polega na obliczeniu pozytywnych ($\tilde{\phi}^+(\tilde{a})$) i negatywnych ($\tilde{\phi}^-(\tilde{a})$) rozmytych przepływów preferencji:

$$\tilde{\phi}^+(\tilde{a}) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \tilde{\pi}(\tilde{a}, \tilde{b}_i), \quad \forall a, b_i \in A$$

$$\tilde{\phi}^-(\tilde{a}) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \tilde{\pi}(\tilde{b}_i, \tilde{a}), \quad \forall a, b_i \in A$$

Przepływy pozytywne $\tilde{\phi}^+$ informują o tym, jak bardzo dana alternatywa przewyższa pozostałe.

Przepływy negatywne $\tilde{\phi}^-$ mówią, jak bardzo określona alternatywa jest przewyższana przez wszystkie inne [66].

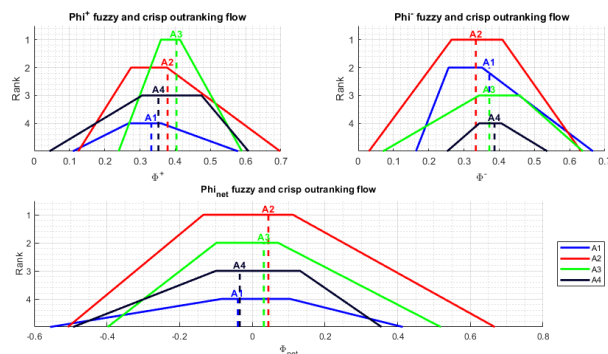
55

55

Etap 5. Obliczenie rozmytych przepływów preferencji netto (tylko NEAT F-PROMETHEE II)

Kolejny etap jest wykonywany tylko w metodzie NEAT F-PROMETHEE II, a polega on na obliczeniu rozmytych przepływów preferencji netto:

$$\tilde{\phi}_{net}(\tilde{a}) = \tilde{\phi}^+(\tilde{a}) \ominus \tilde{\phi}^-(\tilde{a}), \quad \forall a \in A$$



56

56

Etap 6. Budowa rankingu alternatyw

Ranking ma precyzyjnie określać pozycje poszczególnych alternatyw, dlatego przed jego skonstruowaniem należy przeprowadzić wyostrzenie przepływów preferencji.

Zarówno w przypadku $\widetilde{\phi}_{net}(\tilde{a})$, jak też $\widetilde{\phi}^+(\tilde{a})$ i $\widetilde{\phi}^-(\tilde{a})$, defuzyfikacja jest przeprowadzana z zastosowaniem metody środka ciężkości:

$$\begin{aligned}\phi^+_c(\tilde{a}) &= \frac{\phi^+(\tilde{a})^2_3 + \phi^+(\tilde{a})^2_4 + \phi^+(\tilde{a})_3\phi^+(\tilde{a})_4 - \phi^+(\tilde{a})^2_1 - \phi^+(\tilde{a})^2_2 - \phi^+(\tilde{a})_1\phi^+(\tilde{a})_2}{3(\phi^+(\tilde{a})_3 + \phi^+(\tilde{a})_4 - \phi^+(\tilde{a})_1 - \phi^+(\tilde{a})_2)}, \quad \forall a \in A \\ \phi^-_c(\tilde{a}) &= \frac{\phi^-(\tilde{a})^2_3 + \phi^-(\tilde{a})^2_4 + \phi^-(\tilde{a})_3\phi^-(\tilde{a})_4 - \phi^-(\tilde{a})^2_1 - \phi^-(\tilde{a})^2_2 - \phi^-(\tilde{a})_1\phi^-(\tilde{a})_2}{3(\phi^-(\tilde{a})_3 + \phi^-(\tilde{a})_4 - \phi^-(\tilde{a})_1 - \phi^-(\tilde{a})_2)}, \quad \forall a \in A \\ \phi_{net_c}(\tilde{a}) &= \frac{\phi_{net}(\tilde{a})^2_3 + \phi_{net}(\tilde{a})^2_4 + \phi_{net}(\tilde{a})_3\phi_{net}(\tilde{a})_4 - \phi_{net}(\tilde{a})^2_1 - \phi_{net}(\tilde{a})^2_2 - \phi_{net}(\tilde{a})_1\phi_{net}(\tilde{a})_2}{3(\phi_{net}(\tilde{a})_3 + \phi_{net}(\tilde{a})_4 - \phi_{net}(\tilde{a})_1 - \phi_{net}(\tilde{a})_2)}, \quad \forall a \in A\end{aligned}$$

Ze względu na specyfikę metody środka ciężkości, jeżeli przepływ preferencji ϕ jest wartością ostrą, wtedy nie przeprowadza się defuzyfikacji.

57

57

Etap 6. Budowa rankingu alternatyw

Ranking NEAT F-PROMETHEE I konstruowany jest z wykorzystaniem następujących zasad:

- preferencja alternatywy \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} > \tilde{b}$) zachodzi, gdy $\phi^+_c(\tilde{a}) \geq \phi^+_c(\tilde{b})$ i $\phi^-_c(\tilde{a}) \leq \phi^-_c(\tilde{b})$, przy czym co najmniej jedna z nierówności musi być silna,
- nierozróżnialność pomiędzy alternatywami ($\tilde{a} I \tilde{b}$) występuje, gdy $\phi^+_c(\tilde{a}) = \phi^+_c(\tilde{b})$ i $\phi^-_c(\tilde{a}) = \phi^-_c(\tilde{b})$,
- nieporównywalność pomiędzy alternatywami ($\tilde{a} R \tilde{b}$) ma miejsce, gdy $\phi^+_c(\tilde{a}) > \phi^+_c(\tilde{b})$ i $\phi^-_c(\tilde{a}) > \phi^-_c(\tilde{b})$ lub $\phi^+_c(\tilde{a}) < \phi^+_c(\tilde{b})$ i $\phi^-_c(\tilde{a}) < \phi^-_c(\tilde{b})$.

Metoda NEAT F-PROMETHEE II pozwala uzyskać pełny ranking alternatyw, bez relacji nieporównywalności, z zastosowaniem reguł:

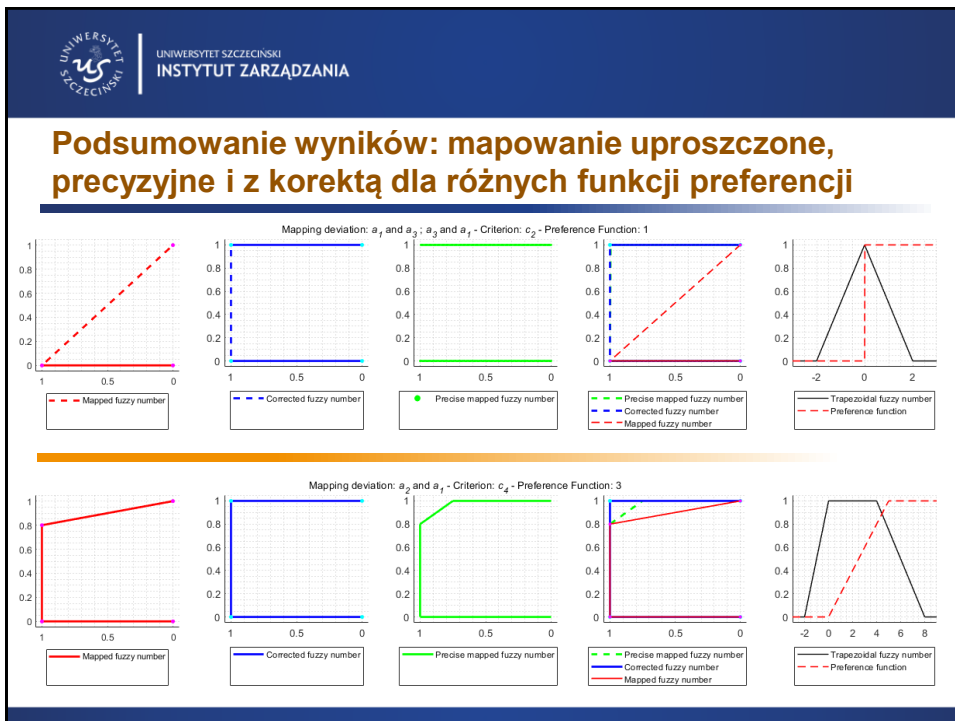
- nierozróżnialność pomiędzy alternatywami \tilde{a} oraz \tilde{b} ($\tilde{a} I \tilde{b}$) zachodzi, gdy $\phi_{net_c}(\tilde{a}) = \phi_{net_c}(\tilde{b})$,
- preferencja alternatywy \tilde{a} nad \tilde{b} ($\tilde{a} > \tilde{b}$) występuje, gdy $\phi_{net_c}(\tilde{a}) > \phi_{net_c}(\tilde{b})$.

58

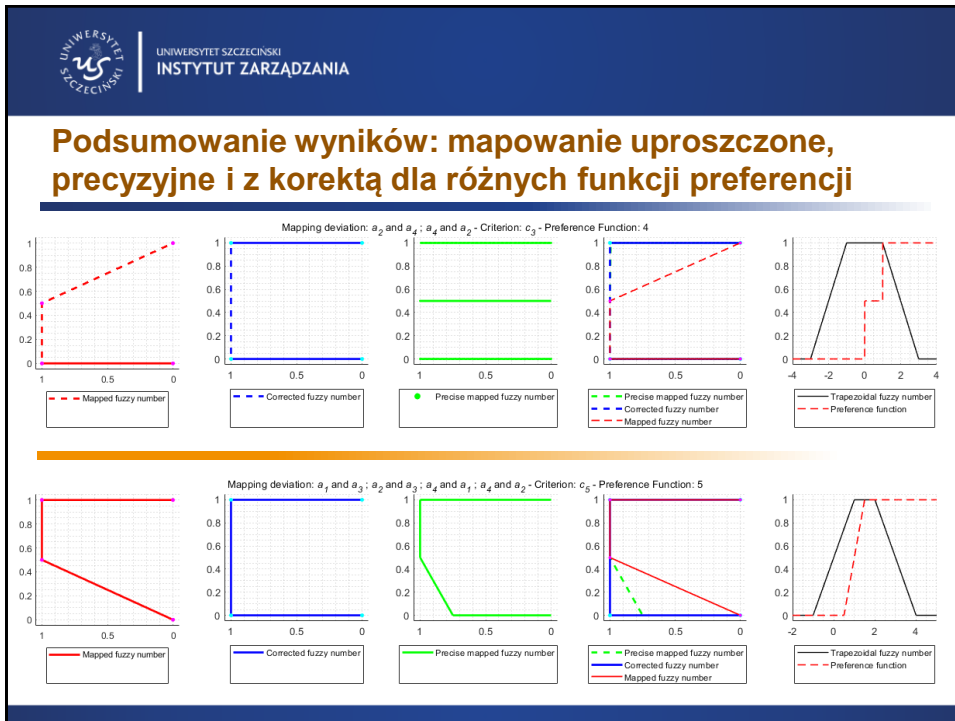
58



59



60



61



62

Podsumowanie: cechy metod NEAT F-PROMETHEE

Oparcie metody NEAT F-PROMETHEE na TFNs pozwala uchwycić niepewność preferencji, niepewność wag kryteriów i wartości alternatyw.

Metoda charakteryzuje się niską złożonością, a dzięki zastosowaniu TFNs jest łatwa w użyciu i umożliwia prostą interpretację uzyskanych wyników.

Dzięki wprowadzeniu korekty przy mapowaniu, NEAT F-PROMETHEE daje precyzyjniejsze wyniki niż inne rozmyte implementacje PROMETHEE.

Precyzja wyników poprawiona też dzięki wyeliminowaniu mnożenia i dzielenia dwóch TFNs:

- zastosowano ostre wartości progów (q_j, p_j, r_j) , aby uniknąć dzielenia dwóch trapezoidalnych liczb rozmytych, np. $\tilde{d}_j(\tilde{a}, \tilde{b})$ i \tilde{r}_j ,
- wprowadzono defuzyfikację wag kryteriów, aby uniknąć mnożenia rozmytej wagi \tilde{w}_j i rozmytej preferencji \tilde{P}_j ,

Normalizacja wag do 1 pozwala zachować skalę $[0,1]$ dla $\tilde{\pi}$ i $[-1,1]$ dla ϕ .

63

63

NEAT F-PROMETHEE - publikacje

Ziemia, P. (2018). NEAT F-PROMETHEE – A new fuzzy multiple criteria decision making method based on the adjustment of mapping trapezoidal fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications*, 110, 363–380. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.008>

Ziemia, P., & Becker, J. (2019). Analysis of the Digital Divide Using Fuzzy Forecasting. *Symmetry*, 11(2), 166. <https://doi.org/10.3390/sym11020166>

Ziemia, P. (2021). Implementation of the new easy approach to fuzzy multi-criteria decision aid in the field of management. *MethodsX*, 8, 101344. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101344>

Ziemia, P. (2021). Monte Carlo simulated data for multi-criteria selection of city and compact electric vehicles in Poland. *Data in Brief*, 36, 107118. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107118>

Ziemia, P. (2021). Multi-Criteria Approach to Stochastic and Fuzzy Uncertainty in the Selection of Electric Vehicles with High Social Acceptance. *Expert Systems with Applications*, 173, 114686. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114686>

Ziemia, P. (2021). Uncertain Multi-Criteria Analysis of Offshore Wind Farms Projects Investments – Case Study of the Polish Economic Zone of the Baltic Sea. *Applied Energy*, 118232. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118232>

64

64



Literatura

1. Gunnarsdottir, I.; Davidsdottir, B.; Worrell, E.; Sigurgeirsdottir, S. Review of Indicators for Sustainable Energy Development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2020, 133, 110294, doi:10.1016/j.rser.2020.110294.
2. Zhao, X.; Ke, Y.; Zuo, J.; Xiong, W.; Wu, P. Evaluation of Sustainable Transport Research in 2000–2019. *Journal of Cleaner Production* 2020, 256, 120404, doi:10.1016/j.jclepro.2020.120404.
3. Wut, T.M.; Lee, D.; Ip, W.M.; Lee, S.W. Digital Sustainability in the Organization: Scale Development and Validation. *Sustainability* 2021, 13, 3530, doi:10.3390/su13063530.
4. Bastas, A.; Liyanage, K. Sustainable Supply Chain Quality Management: A Systematic Review. *Journal of Cleaner Production* 2018, 181, 726–744, doi:10.1016/j.jclepro.2018.01.110.
5. Ferrer, A.L.C.; Thomé, A.M.T.; Scavarda, A.J. Sustainable Urban Infrastructure: A Review. *Resources, Conservation and Recycling* 2018, 128, 360–372, doi:10.1016/j.resconrec.2016.07.017.
6. Moldavska, A.; Welo, T. The Concept of Sustainable Manufacturing and Its Definitions: A Content-Analysis Based Literature Review. *Journal of Cleaner Production* 2017, 166, 744–755, doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.006.
7. Williams, A.; Kennedy, S.; Philipp, F.; Whiteman, G. Systems Thinking: A Review of Sustainability Management Research. *Journal of Cleaner Production* 2017, 148, 866–881, doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.002.
8. Harris, J.M.; Roach, B. National Income and Environmental Accounting. In *Environmental and Natural Resource Economics: A Contemporary Approach*. 3rd edition.; M.E. Sharpe: New York, NY, 2013; pp. 168–202.
9. Hamilton, K. *Genuine Saving as a Sustainability Indicator*; Environmental Economics; The World Bank, 2000;
10. Talberth, J.; Weisdorf, M. Genuine Progress Indicator 2.0: Pilot Accounts for the US, Maryland, and City of Baltimore 2012–2014. *Ecological Economics* 2017, 142, 1–11, doi:10.1016/j.ecolecon.2017.06.012.
11. UNDP Human Development Indices and Indicators. 2018 Statistical Update.; United Nations: New York, 2018;

65

65



Literatura

12. EPI Team 2018 EPI Report; Yale University and Columbia University, 2018;
13. Wackernagel, M.; Schulz, N.B.; Deumling, D.; Linares, A.C.; Jenkins, M.; Kapos, V.; Monfreda, C.; Loh, J.; Myers, N.; Norgaard, R.; et al. Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy. *PNAS* 2002, 99, 9266–9271, doi:10.1073/pnas.142033699.
14. UNCHS The State of the World's Cities Report 2001; United Nations Centre for Human Settlements (Habitat): Nairobi, Kenya, 2001;
15. Sierra, L.A.; Yepes, V.; Pellicer, E. A Review of Multi-Criteria Assessment of the Social Sustainability of Infrastructures. *Journal of Cleaner Production* 2018, 187, 496–513, doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.022.
16. Thies, C.; Kieckhäfer, K.; Spengler, T.S.; Sodhi, M.S. Operations Research for Sustainability Assessment of Products: A Review. *European Journal of Operational Research* 2018, doi:10.1016/j.ejor.2018.04.039.
17. Ibáñez-Forés, V.; Bovea, M.D.; Pérez-Belis, V. A Holistic Review of Applied Methodologies for Assessing and Selecting the Optimal Technological Alternative from a Sustainability Perspective. *Journal of Cleaner Production* 2014, 70, 259–281, doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.082.
18. Rajeev, A.; Pati, R.K.; Padhi, S.S.; Govindan, K. Evolution of Sustainability in Supply Chain Management: A Literature Review. *Journal of Cleaner Production* 2017, 162, 299–314, doi:10.1016/j.jclepro.2017.05.026.
19. Siksnelyte, I.; Zavadskas, E.; Streimikiene, D.; Sharma, D.; Siksnelyte, I.; Zavadskas, E.K.; Streimikiene, D.; Sharma, D. An Overview of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Dealing with Sustainable Energy Development Issues. *Energies* 2018, 11, 2754, doi:10.3390/en11102754.
20. Diaz-Balteiro, L.; González-Pachón, J.; Romero, C. Measuring Systems Sustainability with Multi-Criteria Methods: A Critical Review. *European Journal of Operational Research* 2017, 258, 607–616.

66

66



Literatura

21. Jeronen, E. Sustainability and Sustainable Development. In *Encyclopedia of Corporate Social Responsibility*; Idowu, S.O., Capaldi, N., Zu, L., Das Gupta, A., Eds.; Springer: Berlin, Heidelberg, 2013; pp. 2370–2378.
22. Axelsson, R.; Angelstam, P.; Elbakidze, M.; Stryamets, N.; Johansson, K.-E. Sustainable Development and Sustainability: Landscape Approach as a Practical Interpretation of Principles and Implementation Concepts. *Journal of Landscape Ecology* 2011, 4, 5–30.
23. Juwana, I.; Muttill, N.; Perera, B.J.C. Indicator-Based Water Sustainability Assessment — A Review. *Science of The Total Environment* 2012, 438, 357–371, doi:10.1016/j.scitotenv.2012.08.093.
24. Muralikrishna, I.V.; Manickam, V. Sustainable Development. In *Environmental Management. Science and Engineering for Industry*; Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2017; pp. 5–21 ISBN 978-0-12-811989-1.
25. Zhou, H.; Yang, Y.; Chen, Y.; Zhu, J. Data Envelopment Analysis Application in Sustainability: The Origins, Development and Future Directions. *European Journal of Operational Research* 2018, 264, 1–16, doi:10.1016/j.ejor.2017.06.023.
26. Ness, B.; Urbel-Piirsalu, E.; Anderberg, S.; Olsson, L. Categorising Tools for Sustainability Assessment. *Ecological Economics* 2007, 60, 498–508, doi:10.1016/j.ecolecon.2006.07.023.
27. Pope, J.; Bond, A.; Hugé, J.; Morrison-Saunders, A. Reconceptualising Sustainability Assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 2017, 62, 205–215, doi:10.1016/j.eiar.2016.11.002.
28. Santoyo-Castelazo, E.; Azapagic, A. Sustainability Assessment of Energy Systems: Integrating Environmental, Economic and Social Aspects. *Journal of Cleaner Production* 2014, 80, 119–138, doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.061.
29. Jaehn, F. Sustainable Operations. *European Journal of Operational Research* 2016, 253, 243–264.

67

67



Literatura

30. Bojar, E.; Wit, B. Triple Bottom Line w szablonie modelu biznesu A. Osterwaldera i Y. Pigneura w perspektywie interesariuszy. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Śląska* 2016, z. 99.
31. Elkington, J. Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development. *California Management Review* 1994, 36, 90–100, doi:10.2307/41165746.
32. Olejniczak, K. Reguła 3E jako podstawa zarządzania współczesnym przedsiębiorstwem. *Studia Ekonomiczne / Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach* 2014, 208–216.
33. Ashby, M.F. What Is a “Sustainable Development”? In *Materials and Sustainable Development*; Butterworth-Heinemann, Elsevier: Boston, 2016; pp. 27–38 ISBN 978-0-08-100176-9.
34. Richardson, J. Accounting for Sustainability: Measuring Quantities or Enhancing Qualities? In *The Triple Bottom Line. Does It All Add Up?*; Henriques, A., Richardson, J., Eds.; Routledge: Londyn, 2004; pp. 34–44.
35. Mayer, A.L. Strengths and Weaknesses of Common Sustainability Indices for Multidimensional Systems. *Environment International* 2008, 34, 277–291, doi:10.1016/j.envint.2007.09.004.
36. Böhringer, C.; Jochem, P.E.P. Measuring the Immeasurable — A Survey of Sustainability Indices. *Ecological Economics* 2007, 63, 1–8, doi:10.1016/j.ecolecon.2007.03.008.
37. Rowley, H.V.; Peters, G.M.; Lundie, S.; Moore, S.J. Aggregating Sustainability Indicators: Beyond the Weighted Sum. *Journal of Environmental Management* 2012, 111, 24–33, doi:10.1016/j.jenvman.2012.05.004.
38. Merad, M.; Dechy, N.; Serir, L.; Grabisch, M.; Marcel, F., 2013. Using a multi-criteria decision aid methodology to implement sustainable development principles within an organization. *European Journal of Operational Research* 224, 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.019>.

68

68

Literatura

39. Mofidi Chelan, M.; Alijanpour, A.; Barani, H.; Motamedi, J.; Azadi, H.; Van Passel, S. Economic Sustainability Assessment in Semi-Steppe Rangelands. *Science of The Total Environment* 2018, 637–638, 112–119, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.428.
40. Cinelli, M.; Coles, S.R.; Kirwan, K. Analysis of the Potentials of Multi Criteria Decision Analysis Methods to Conduct Sustainability Assessment. *Ecological Indicators* 2014, 46, 138–148, doi:10.1016/j.ecolind.2014.06.011.
41. Guitouni, A.; Martel, J.-M. Tentative Guidelines to Help Choosing an Appropriate MCDA Method. *European Journal of Operational Research* 1998, 109, 501–521, doi:10.1016/S0377-2217(98)00073-3.
42. Polatidis, H.; Haralambopoulos, D.A.; Munda, G.; Vreeker, R. Selecting an Appropriate Multi-Criteria Decision Analysis Technique for Renewable Energy Planning. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy* 2006, 1, 181–193, doi:10.1080/009083190881607.
43. Tseng, M.-L.; Divinagracia, L.; Divinagracia, R. Evaluating Firm's Sustainable Production Indicators in Uncertainty. *Computers & Industrial Engineering* 2009, 57, 1393–1403, doi:10.1016/j.cie.2009.07.009.
44. Wątróbski, J.; Jankowski, J.; Ziemia, P.; Karczmarczyk, A.; Ziolo, M. Generalised Framework for Multi-Criteria Method Selection. *Omega* 2018, doi:10.1016/j.omega.2018.07.004.
45. Roy, B. Decision-Aiding Today: What Should We Expect? In *Multicriteria Decision Making. Advances in MCDM Models, Algorithms, Theory, and Applications*; Gal, T., Stewart, T.J., Hanne, T., Eds.; International Series in Operations Research & Management Science; Springer, Boston, MA, 1999; pp. 1–35 ISBN 978-1-4613-7283-7.
46. Mareschal, B. Note on the PROMETHEE Net Flow Computation 2015.

69

69

Literatura

47. Geldermann, J.; Schöbel, A. On the Similarities of Some Multi-Criteria Decision Analysis Methods. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 2011, 18, 219–230, doi:10.1002/mcda.468.
48. Bouyssou, D.; Marchant, T.; Pirlot, M.; Tsoukias, A.; Vincke, P. *Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria: Stepping Stones for the Analyst*; International Series in Operations Research & Management Science; Springer US: Boston, MA, 2006; ISBN 978-0-387-31098-5.
49. Munda, G. *Multiple Criteria Decision Analysis and Sustainable Development*. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*; Greco, S., Ehrgott, M., Figueira, J.R., Eds.; International Series in Operations Research & Management Science; Springer New York: New York, NY, 2016; pp. 1235–1267.
50. Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukiàs, A., Vincke, P., 2006. Aggregation-Overture, in: *Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria. Stepping Stones for the Analyst*, International Series in Operations Research & Management Science. Springer, Boston, MA, pp. 117–168. https://doi.org/10.1007/0-387-31099-1_4
51. Munda, G. *Multiple Criteria Decision Analysis and Sustainable Development*. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*; Greco, S., Ehrgott, M., Figueira, J.R., Eds.; International Series in Operations Research & Management Science; Springer New York: New York, 2016; pp. 1235–1267.
52. Roy, B., 1996. Coherent Criterion Family and Decision Aiding in the Description Problematic, in: Roy, B. (Ed.), *Multicriteria Methodology for Decision Aiding, Nonconvex Optimization and Its Applications*. Springer US, Boston, MA, pp. 215–235. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1_10

70

70



Literatura

53. Bouyssou, D. Some Remarks on the Notion of Compensation in MCDM. *European Journal of Operational Research* 1986, 26, 150–160, doi:10.1016/0377-2217(86)90167-0.
54. Geldermann, J.; Spengler, T.; Rentz, O. Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry. *Fuzzy Sets and Systems* 2000, 115, 45–65.
55. Roy, B. Main sources of inaccurate determination, uncertainty and imprecision in decision models. *Mathematical and Computer Modelling* 1989, 12, 1245–1254.
56. Roy, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding; Nonconvex Optimization and Its Applications*; Springer US, 1996; ISBN 978-0-7923-4166-6.
57. Ziemia, P. NEAT F-PROMETHEE – A new fuzzy multiple criteria decision making method based on the adjustment of mapping trapezoidal fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications* 2018, 110, 363–380. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.008>.
58. Haralambopoulos, D.A., Polatidis, H. Renewable energy projects: structuring a multicriteria group decision-making framework, *Renewable Energy* 2003, 28, 961-973.
59. Buckley, J.J. Portfolio Analysis Using Possibility Distributions. In *Approximate Reasoning in Intelligent Systems, Decision and Control*; Sanchez, E., Zadeh, L.A., Eds.; Pergamon: Amsterdam, 1987; pp. 69–76 ISBN 978-0-08-034335-8.
60. Jankowski, J.; Kazienko, P.; Wątróbski, J.; Lewandowska, A.; Ziemia, P.; Ziolo, M. Fuzzy Multi-Objective Modeling of Effectiveness and User Experience in Online Advertising. *Expert Systems with Applications* 2016, 65, 315–331, doi:10.1016/j.eswa.2016.08.049.

71

71



Literatura

61. Chen, C.-T.; Lin, C.-T.; Huang, S.-F. A Fuzzy Approach for Supplier Evaluation and Selection in Supply Chain Management. *International Journal of Production Economics* 2006, 102, 289–301, doi:10.1016/j.ijpe.2005.03.009.
62. Giachetti, R.E.; Young, R.E. Analysis of the Error in the Standard Approximation Used for Multiplication of Triangular and Trapezoidal Fuzzy Numbers and the Development of a New Approximation. *Fuzzy Sets and Systems* 1997, 91, 1–13, doi:10.1016/S0165-0114(96)00118-2.
63. Yalçın, N.; Yapıcı Pehlivan, N. Application of the Fuzzy CODAS Method Based on Fuzzy Envelopes for Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets: A Case Study on a Personnel Selection Problem. *Symmetry* 2019, 11, 493, doi:10.3390/sym11040493
64. Zadeh, L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control* 1965, 8, 338–353, doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
65. Roy, B. Preference, Indifference, Incomparability: Binary Relations and Basic Structures. In *Multicriteria Methodology for Decision Aiding; Nonconvex Optimization and Its Applications*; Springer: Boston, MA, 1996; pp. 79–126 ISBN 978-1-4419-4761-1.
66. Brans, J.-P.; De Smet, Y. PROMETHEE Methods. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*; Greco, S., Ehrgott, M., Figueira, J.R., Eds.; International Series in Operations Research & Management Science; Springer New York: New York, NY, 2016; pp. 187–219 ISBN 978-1-4939-3094-4

72

72



Dziękuję za uwagę