

Dariusz Meiser

ELZAB SA

Maciej Nowak

Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach, Wydział Informatyki i Komunikacji,
Katedra Badań Operacyjnych

Autor do korespondencji: Maciej Nowak, maciej.nowak@ue.katowice.pl

WYKORZYSTANIE METOD WIELOKRYTERIALNYCH DO WSPOMAGANIA WYBORU WARIANTU INWESTYCYJNEGO – STUDIUM PRZYPADKU¹

Streszczenie: Artykuł jest poświęcony problematyce wyboru wariantu inwestycyjnego. Przedstawiono studium przypadku opisujące procedurę, jaka została wykorzystana do wyboru kosztownego urządzenia produkcyjnego typu wykrawarka laserowa. Zastosowany w praktyce proces wyboru składał się z dwóch etapów: (1) etapu parametryzacji funkcjonalnej i technicznej, (2) etapu wyboru konkretnego modelu maszyny (wykrawarki). Celem pracy jest przedstawienie zalet i wad zastosowanej procedury oraz zaprezentowanie, w jaki sposób do rozwiązania problemu może być wykorzystane podejście wielokryterialne. Na podstawie oceny przebiegu procesu decyzyjnego określono, jakimi cechami powinna się charakteryzować metoda wspomaganie decyzji, by mogła być zastosowana do rozwiązania problemów podobnych do rozważanego w pracy. Przedstawiono również propozycję takiej metody uwzględniającą fakt, że decyzja jest podejmowana grupowo.

Słowa kluczowe: wybór wariantu inwestycyjnego, metody wielokryterialne, grupowe podejmowanie decyzji.

Klasyfikacja JEL: C44, H43, O22.

¹ Pokazane tutaj rezultaty zostały zaprezentowane na XXXV Konferencji „Metody i zastosowania badań operacyjnych” im. Profesora Władysława Bukietyńskiego (MZBO'16).

APPLICATION OF MULTIPLE CRITERIA METHODS TO INVESTMENT PROJECT SELECTION – A CASE STUDY

Abstract: The article is devoted to the project selection problem. A case study is presented, illustrating the procedure, which was applied to select an expensive production equipment – laser punching. The selection process consisted of two stages: (1) functional and technical parameterization, (2) the selection of a particular machine (puncher). The goal of the paper is to describe the advantages and disadvantages of the procedure applied in practice and to present in what way multiple criteria approach can be used for solving the problem. Taking into account the real decision process, the requirements for decision aiding procedure are formulated. An proposal of such method is also presented. The method takes into account that the decision is made collectively (group decision making).

Keywords: project selection, multiple criteria methods, group decision making.

Wstęp

Projekty inwestycyjne odgrywają niebagatelną rolę w życiu każdej organizacji. Efektywne inwestowanie w istotny sposób wpływa na pozycję rynkową i wzrost wartości firmy. Realizacja projektu niejednokrotnie wymaga poniesienia znaczących nakładów, a ich efekty są w dużym stopniu niepewne. Z tego względu podjęcie decyzji inwestycyjnej każdorazowo jest poprzedzane drobiazgową analizą, w ramach której analizowana jest zarówno finansowa opłacalność przedsięwzięcia, jak i kwestie o charakterze technicznym, środowiskowym czy społecznym.

Punktem wyjścia rozważań prowadzonych w pracy jest studium przypadku opisujące procedurę, jaka została wykorzystana do wyboru wariantu inwestycyjnego polegającego na zakupie i instalacji kosztownego urządzenia produkcyjnego typu wykrawarka laserowa. Celem pracy jest przedstawienie zalet i wad zastosowanej procedury oraz zaprezentowanie, w jaki sposób do rozwiązania problemu może być wykorzystane podejście wielokryterialne. Na podstawie oceny przebiegu procesu decyzyjnego określono, jakimi cechami powinna się charakteryzować metoda wspomagania decyzji, by mogła być zastosowana do rozwiązania problemów podobnych do rozważanego w pracy. Przedstawiono również propozycję takiej metody, uwzględniając, że decyzja podejmowana jest grupowo.

1. Wybór wariantu inwestycyjnego jako problem wielokryterialny

Na decyzję o podjęciu inwestycji wpływa wiele czynników o różnorodnym charakterze (Marcinek, 1998, s. 19). Chociaż pierwszorzędne znaczenie ma finansowa opłacalność projektu, to przygotowując inwestycję, trzeba uwzględnić także czynniki o charakterze społecznym, środowiskowym czy technicznym.

Problem wyboru wariantu inwestycyjnego często jest formułowany jako zagadnienie wielokryterialnego podejmowania decyzji. Bogaty przegląd publikacji na ten temat znaleźć można w pracy (Heidenberg i Stummer, 1999). Zagadnieniom selekcji projektów do portfela jest również poświęcona monografia (Graves i Ringuest, 2003).

Wybór wariantu inwestycyjnego jest bardzo często formułowany jako problem dyskretnego wspomaganie decyzji (Trzaskalik, 2014). Przyjmuje się wówczas, że liczba rozważanych wariantów jest na tyle niewielka, że można je przedstawić poprzez listę dostępnych możliwości, a oceny wariantów ze względu na kryteria – w formie macierzy ocen, której wiersze odpowiadają wariantom decyzyjnym, a kolumny kryteriom. W zależności od rodzaju dostępnej informacji oceny te mogą być podane w postaci liczby rzeczywistej, wartości ze skali porządkowej, rozkładu prawdopodobieństwa lub liczby rozmytej.

Jedną z najczęściej wykorzystywanych metod wielokryterialnych jest AHP (*analytic hierarchy process*), zaproponowana przez Saaty'ego (1980). Lootsma, Mensch i Vos (1990) wykorzystali ją do wyznaczenia rankingu projektów badawczych z obszaru energetyki. Podobne podejście zastosował również Ferrari (2003), który w swej analizie uwzględnił dwa różne typy interwencji włączonych w proces podejmowania decyzji: ekspertów od spraw technicznych oraz polityków. Ocenę projektów inwestycyjnych z obszaru technologii informacyjnej przy wykorzystaniu metody AHP przeprowadził Kearns (2004). W ostatnich latach do rozwiązania problemu wyboru wariantu inwestycyjnego coraz częściej wykorzystywana jest również metoda ANP (*analytic network process*), która w przeciwieństwie do metody AHP pozwala na uwzględnienie wzajemnych zależności pomiędzy poszczególnymi kryteriami. Sposób rozwiązania problemu wyboru projektu inwestycyjnego przy pomocy metody ANP przedstawiono na przykład w pracy (Mohanty, Agarwal, Choudhury i Tiwary, 2005).

Inną grupą metod często wykorzystywanych do rozwiązania problemu wyboru wariantu inwestycyjnego są techniki oparte na relacji przewyższania, takie jak ELECTRE oraz PROMETHEE (Costa, Melo, Godinho i Dias, 2003; Mavrotas, Diakoulaki i Capros, 2003; Nowak, 2005).

Rozważany problem bywa również rozwiązywany za pomocą metod opartych na wieloatrybutowej funkcji użyteczności. W tym wypadku przyjmuje się, że decydent dąży do maksymalizacji funkcji użyteczności, która agreguje oceny wariantów ze względu na wszystkie kryteria wykorzystywane w analizie (Moselhi i Deb, 1993; Wong, Norman i Flanagan, 2000).

W wielu wypadkach liczba wariantów inwestycyjnych jest na tyle duża, że rozważany problem nabiera charakteru kombinatorycznego. W takim wypadku do rozwiązania problemu konieczne jest wykorzystanie algorytmów metaheurystycznych, takich jak algorytmy genetyczne, algorytmy mrówkowe czy optymalizacja rojem cząstek. Przykłady ich zastosowań w problemie wyboru projektu inwestycyjnego przedstawiono między innymi w pracach (Doerner, Gutjahr, Hartl, Strauss i Stummer, 2006; Ghorbani i Rabbani, 2009; Rabbani, Aramoon Bajestani i Baharian Khoshkhou, 2010).

2. Opis analizowanego przypadku

Rozważany w pracy problem decyzyjny był związany z przedsięwzięciem inwestycyjnym polegającym na zakupie, instalacji i uruchomieniu maszyny produkcyjnej – wykrawarki laserowej do wycinania blach stalowych różnego rodzaju. Bezpośrednią przyczyną tej inwestycji było zwiększające się zapotrzebowanie produkcyjne oraz niewystarczające moce i możliwości produkcyjne w tym zakresie. Wiązało się to z koniecznością korzystania z zewnętrznych podwykonawców dysponujących wyspecjalizowanym sprzętem w postaci wykrawarek laserowych, wykorzystywanych do wycinania blach różnego rodzaju i gatunku. Zakup własnej wykrawarki miał na celu zmniejszenie kosztów produkcyjnych, zwiększenie zdolności wytwórczych oraz zaoferowanie klientom nowej, komplementarnej usługi wykrawania blach.

Do wykonania tego zadania inwestycyjnego został powołany zespół roboczy mający równocześnie kompetencje decyzyjne. Składał się on z interesariuszy z różnych działów, bezpośrednio związanych z procesami produkcyjnymi w zakresie planowanej inwestycji. W skład zespołu weszły następujące osoby:

- współautor tego artykułu – kierownik Działu Projektów Korporacyjnych, który kierował pracami zespołu,
- dyrektor ds. produkcji kontraktowej,
- dyrektor produkcji,
- kierownik działu technologicznego,
- kierownik wydziału mechanicznego (ostateczny użytkownik maszyny),

- inżynier procesu z działu technologicznego – docelowo odpowiedzialny za programowanie wykrawarki.

Na planowaną inwestycję został przydzielony budżet składający się z dwóch części:

- kosztów przygotowania infrastruktury (gruntowny remont i przebudowa pomieszczenia, wyposażenie w media, instalacje przemysłowe, przygotowanie fundamentów itp.),
- kosztów zakupu, transportu, rozładunku oraz instalacji i uruchomienia maszyny.

Przyjęty i zatwierdzony budżet tej inwestycji był jednym z czynników ograniczających, mających wpływ na wybór konkretnego modelu wykrawarki.

Przed przystąpieniem do prac została opracowana, przyjęta do stosowania oraz wdrożona procedura postępowania w fazie analitycznej projektu. Wyróżniono w niej dwa etapy: etap parametryzacji funkcjonalnej i technicznej oraz etap wyboru konkretnego modelu maszyny (wykrawarki).

Celem etapu pierwszego było wyselekcjonowanie modeli wykrawarek spełniających wstępnie sformułowane wymagania. Czas trwania tych prac został określony na 3 miesiące. Pierwszym zadaniem było sprecyzowanie „warunków brzegowych” poprzez zdefiniowanie parametrów funkcjonalnych i technicznych wykrawarki, z uwzględnieniem przyjętych celów produkcyjnych, do jakich maszyna miała być wykorzystana. Analizie zostały poddane następujące cechy urządzenia:

- technologia wykrawania laserowego: CO₂ lub światłowodowa (fiber),
- moc rezonatora wykrawarki,
- wymiary stołu roboczego,
- wyposażenie dodatkowe.

Na podstawie dokładnej analizy potrzeb produkcyjnych oraz rodzajów maszyn dostępnych na rynku określono warunki, jakie musi spełniać poszukiwana wykrawarka (tzw. *must be*). Były to:

- technologia fiber (światłowodowa),
- moc rezonatora 4 kW,
- wymiary stołu roboczego: 3 × 1,5 m,
- system dwóch stołów, wymiennych automatycznie,
- zmieniacz dysz laserowych (nie miało przy tym znaczenia, czy jest to wyposażenie standardowe czy opcjonalne),
- możliwość grawerowania laserowego,
- szeroki zakres materiałów, które można obrabiać (stal nierdzewna, stal tłoczna, aluminium, alucynk, stal ocynkowana elektrolitycznie i ogniowo, mosiądz, miedź).

Ponadto określono również minimalne wymagania dla kilku kolejnych parametrów, przy czym było pożądanym, aby ich wartości były jak najlepsze, przy uwzględnieniu ograniczenia wynikającego z przyjętego budżetu. Zostały one sformułowane w sposób następujący:

- grubość minimalna obrabianych blach: 0,4 mm (im mniejsza, tym lepiej),
- grubość maksymalna obrabianych blach: 8 mm (im większa, tym lepiej),
- minimalna dokładność wykrawania 0,1 mm (im mniejsza wartość, tym lepiej),
- koszty eksploatacyjne maszyny (im mniejsze, tym lepiej),
- szybkość przesuwu osi (im większa, tym lepiej),
- okres gwarancji (im dłuższy, tym lepiej).

Etap wyboru konkretnego modelu maszyny (wykrawarki) rozpoczął się od przeprowadzenia badania rynku: zebrano i przeanalizowano informacje dostępne w katalogach producentów tego typu urządzeń oraz wybrano sześć modeli wykrawarek spełniających warunki opisane powyżej. Były to maszyny, które na potrzeby tego artykułu oznaczono jako:

- model A – produkt firmy belgijskiej,
- model B – produkt firmy szwajcarskiej,
- model C – produkt firmy szwajcarsko-niemieckiej,
- model D – produkt firmy japońskiej,
- model E – produkt firmy polskiej,
- model F – produkt firmy tureckiej.

Pozwoliło to na przejście do drugiego etapu analizy, którego celem był wybór jednego konkretnego modelu rekomendowanego do zakupu oraz modelu rezerwowego, który miałby być alternatywą na wypadek niepowodzenia w negocjacjach z dostawcą modelu rekomendowanego. Czas na wykonanie prac na drugim etapie został określony na 5 miesięcy.

Do producentów lub dystrybutorów wcześniej wyselekcjonowanych urządzeń zwrócono się o przedstawienie ofert na sprzedaż i instalację wykrawarki spełniającej warunki przyjęte na etapie parametryzacji funkcjonalnej i technicznej. Oferty te poddano dokładnym analizom, tak od strony technicznej, jak też finansowej. Przeprowadzono spotkania i negocjacje z potencjalnymi dostawcami. Złożono również wizyty referencyjne u użytkowników oraz zebrano opinie rynkowe na temat analizowanych modeli wykrawarek.

Zbiór kryteriów, które były brane na tym etapie analizy, był następujący:

- cena, z uwzględnieniem opcji oferowanych w zakładanym budżecie,
- opinia rynkowa o danej firmie,
- opinie użytkowników zebrane podczas wizyt referencyjnych,
- warunki gwarancji oraz SLA (Service Level Agreement),

- koszty eksploatacji,
- elastyczność i łatwość programowania,
- innowacyjne rozwiązania technologiczne i funkcjonalne.

Każdy z członków zespołu został poproszony o przedstawienie własnego rankingu rozpatrywanych urządzeń wraz z uzasadnieniem. Wyniki tej ewaluacji zostały następnie przedyskutowane w trakcie spotkania zespołu. W wyniku tych działań do dalszych analiz wybrano wykrawarki trzech firm: B, C i D. Aby wykluczyć cenę jako kryterium determinujące ostateczny wybór, przeprowadzono kilka rund negocjacji z potencjalnymi dostawcami, w wyniku których doprowadzono do tego, że ceny wszystkich trzech rozpatrywanych modeli były na bardzo zbliżonym poziomie: różnica pomiędzy najtańszą a najdroższą ofertą kształtowała się na poziomie 2%. Poszczególne producenci przedstawili następujące oferty cenowe:

- firma B (Szwajcaria): 465 k€,
- firma C (Szwajcaria / Niemcy): 470 k€,
- firma D (Japonia): 475 k€.

W wyniku bardzo dokładnej analizy kosztów eksploatacyjnych okazało się, że również one nie są kryterium różnicującym poszczególne oferty – dla wszystkich maszyn kształtowały się praktycznie na tym samym poziomie (+/- 1%, czyli w granicach błędu statystycznego).

Z trzech rozpatrywanych maszyn ostatecznie wybrano jeden model rekomendowany i jeden rezerwowy. Modelem rekomendowanym była maszyna firmy C (Szwajcaria/Niemcy) w cenie 470 k€, natomiast jako model rezerwowy wybrano maszynę firmy D (Japonia).

Ostatecznie zakupiona i wdrożona do działalności produkcyjnej została wykrawarka oznaczona jako C (Szwajcaria / Niemcy), która była wybrana jako model rekomendowany.

3. Wnioski z przeprowadzonego procesu decyzyjnego

Przyjęta procedura postępowania, chociaż ostatecznie skuteczna i zakończona sukcesem, wykazała pewne niedogodności skutkujące wnioskami naprawczymi i propozycjami zmian na przyszłość:

1. Brak jednoznacznie określonej, dokładnie opisanej i znanej wszystkim interesariuszom procedury postępowania. Mimo że procedura działań została wstępnie określona i zakomunikowana, to jednak nie była ona opisana w sposób formalny, jednoznaczny i niebudzący wątpliwości interpretacyjnych.

2. Nie dla wszystkich etapów zostały jednoznacznie określone terminy wykonania i zakończenia poszczególnych etapów procesu decyzyjnego (choć niektóre z nich były uzależnione od czynników zewnętrznych). Mimo że został opracowany i zatwierdzony harmonogram prac, to terminy na niektórych etapach nie były jednoznacznie określone.
3. Rozważano jednocześnie kryteria jakościowe i ilościowe. Powodowało to liczne wątpliwości i zakłócenia przebiegu prac analitycznych, a zwłaszcza procesów decyzji pośrednich.
4. Nie dla wszystkich kryteriów jakościowych zostały jednoznacznie określone oceny (np. opinie użytkowników, opinia rynkowa), co powodowało pewne problemy z porównaniem różnych wariantów.
5. Nie dla wszystkich kryteriów zostały określone wagi, co powodowało trudności w ich ocenie, np. czy ważniejsza jest opinia rynkowa, prędkość wykrawania, czy też opinia użytkownika. Ponadto liczne grono interesariuszy przykładało różną, subiektywną wagę do poszczególnych kryteriów – np. dla inżyniera procesu ważniejsza była szybkość wykrawania niż koszty eksploatacyjne, dla kierownika wydziału mechanicznego większe znaczenie miały z kolei warunki gwarancji itp.

Na podstawie analizy przeprowadzonego procesu decyzyjnego za uzasadnione uznano opracowanie lub zaadaptowanie do tego typu działań jednej z wielokryterialnych metod wspomagania decyzji. Zastosowanie sprawdzonej, uznanej, a jednocześnie niezbyt skomplikowanej metody wspomagania decyzji z pewnością ułatwiłoby pracę zespołu analitycznego i pomogłoby wyeliminować wymienione powyżej niedogodności.

4. Problem w ujęciu wielokryterialnym

Podejmując próbę wyboru konkretnej wielokryterialnej metody wspomagania decyzji dla rozważanej klasy zagadnień, należy w pierwszej kolejności poszukać odpowiedzi na następujące kwestie o charakterze metodologicznym:

1. Z jakim problemem decyzyjnym mamy tu do czynienia?
2. Czy zbiór wariantów ma charakter stabilny, czy rewidowalny?
3. Czy zbiór kryteriów jest stabilny, czy też ulega modyfikacjom?
4. W jakim zakresie metody wielokryterialne mogą stanowić użyteczne narzędzie w poszukiwaniu rozwiązania problemu?

Aby udzielić odpowiedzi na powyższe pytania, należy wyraźnie wyodrębnić dwa – opisane wyżej – etapy przeprowadzonego procesu decyzyjnego. Warto przy tym podkreślić, że podział ten jest charakterystyczny dla każdego projektu

polegającego na zakupie urządzenia produkcyjnego. Współautor tego artykułu (D. Meiser) brał udział – jako członek zespołu albo jego kierownik – w kilkunastu tego typu procesach decyzyjnych w zakresie inwestycji maszynowych i w każdym przypadku proces wyboru oferty przebiegał w taki sam sposób.

Zgodnie z klasyfikacją zaproponowaną przez Roy (1990, s. 68–80) w ramach wielokryterialnego wspomagania decyzji można wyróżnić cztery rodzaje problematyki: wyboru (oznaczaną jako $P.\alpha$), sortowania ($P.\beta$), porządkowania ($P.\gamma$) oraz opisu ($P.\delta$). Problematyka wyboru odpowiada sytuacji, w której decydent jest zainteresowany ustaleniem jednego, konkretnego wariantu, który w najwyższym stopniu odpowiada jego preferencjom. Z problematyką sortowania mamy do czynienia, gdy celem analizy jest przydział wariantów do z góry określonych kategorii. Problematyka porządkowania oznacza, że prace powinny prowadzić do wyznaczenia klasyfikacji wariantów, czyli wyodrębnienia i uporządkowania klas grupujących warianty oceniane jako równie dobre. W przypadku ostatniej problematyki zainteresowania decydenta oraz wspomagającego go w rozwiązaniu problemu analityka ograniczają się do sformułowania rozważanego problemu jako zagadnienia wielokryterialnego, poprzez zdefiniowanie zbioru wariantów decyzyjnych oraz określenie, jakie konsekwencje pociąga za sobą wybór każdego z nich.

Na pierwszym etapie procedury, polegającym na parametryzacji funkcjonalnej i technicznej, celem było określenie wymagań oraz sformułowanie kryteriów, a następnie wyselekcjonowanie modeli wykrawarek spełniających wstępnie sformułowane wymagania. Można przyjąć, że rozważany problem był formułowany początkowo w kategoriach problematyki opisu, a następnie w kategoriach problematyki sortowania. Z kolei na etapie końcowym zespół miał do czynienia z wielokryterialnym problemem wyboru.

Cechami charakterystycznymi rozważanego procesu decyzyjnego były:

1. Rewidowalność zbioru wariantów: wariant, który we wczesnej fazie procesu (początek etapu 1) był uznawany za niedopuszczalny (cena była o ponad 20% wyższa niż zakładana w dostępnym budżecie projektu), w wyniku negocjacji z dostawcą został zmodyfikowany i ostatecznie włączony do analizy, a co więcej – ostatecznie został wybrany jako wariant rekomendowany.
2. Zbiór kryteriów nie ulegał modyfikacjom w trakcie całego procesu decyzyjnego.
3. Część kryteriów była zdefiniowana na tyle jednoznacznie (parametry techniczne), że porównanie poszczególnych urządzeń nie stanowiło problemu. Uczestnicy zespołu analitycznego największy problem mieli z oceną wariantów ze względu na kryteria jakościowe.

4. Proces nie obejmował analizy ryzyka – kwestia ta była rozważana na etapie poprzedzającym opisywany proces decyzyjny, w którego trakcie ustalano budżet projektu. Warto nadmienić, że opisywany proces decyzyjny był jedynie częścią złożonego procesu inwestycyjnego, który w fazie przedinwestycyjnej (konceptyjnej) – *pre-feasibility study* – (Nowak, 2014, s. 27) obejmował dokładną analizę planowanej inwestycji pod kątem: finansowym, rynkowym, biznesowym oraz technologicznym i zawierał również analizę ryzyka.
5. Decyzja była podejmowana grupowo. Poszczególni członkowie zespołu różnili się opiniami na temat znaczenia poszczególnych kryteriów. Większość z nich nie czuła się wystarczająco kompetentna, by oceniać rozważane urządzenia według wszystkich kryteriów.

5. Propozycja procedury wielokryterialnej dla problemu wyboru wariantu inwestycyjnego

Analiza przebiegu opisanego wyżej procesu decyzyjnego pozwala na sformułowanie wymagań, jakie powinna spełniać procedura decyzyjna, by mogła w sposób skuteczny wspierać zespół powołany do sformułowania rekomendacji dla decydenta. Są one następujące:

1. Należy uwzględnić wieloetapowość procesu decyzyjnego. Kolejne etapy procesu skutkują stopniowym zawężaniem pola decyzyjnego. Ponadto w wyniku prowadzonych negocjacji oferenci modyfikują swoje oferty, co może prowadzić do korekty wcześniejszej decyzji o wyeliminowaniu określonego wariantu jako niespełniającego wymagań sformułowanych w początkowej fazie procesu.
2. Procedura powinna pozwalać na zmianę charakteru problemu, z jakim zespół roboczy ma do czynienia. Oznacza to, że w kolejnych fazach procesu mogą być wykorzystane różne metody wielokryterialne.
3. Problem jest rozwiązywany zespołowo. Wiedza, jaką dysponują poszczególni członkowie zespołu, może się okazać niewystarczająca, by mogli oni rzetelnie ocenić warianty ze względu na wszystkie rozważane kryteria. Proponowana procedura powinna ten fakt uwzględnić.
4. Członkowie zespołu dysponują niewielką wiedzą na temat metodologii wielokryterialnego podejmowania decyzji. W związku z tym w trakcie procedury powinny być zastosowane jedynie metody uznawane przez osoby uczestniczące w procesie decyzyjnym za łatwe do zastosowania i zrozumiałe.

Poniżej przedstawiamy propozycję procedury, która może być wykorzystana do rozwiązania problemów podobnych do przedstawionego powyżej. W rezultacie jej zastosowania ma zostać wskazany wariant, który zostanie rekomendowany osobie lub grupie osób odpowiedzialnych za ostateczne podjęcie decyzji. Procedura składa się z następujących etapów:

1. Zdefiniowanie problemu jako zagadnienia wielokryterialnego.
2. Ustalenie podzbioru wariantów, spośród których zostanie wybrany wariant rekomendowany oraz rezerwowy.
3. Skonstruowanie rankingu wariantów wskazanych w fazie drugiej, z uwzględnieniem opinii poszczególnych członków zespołu oceniającego.

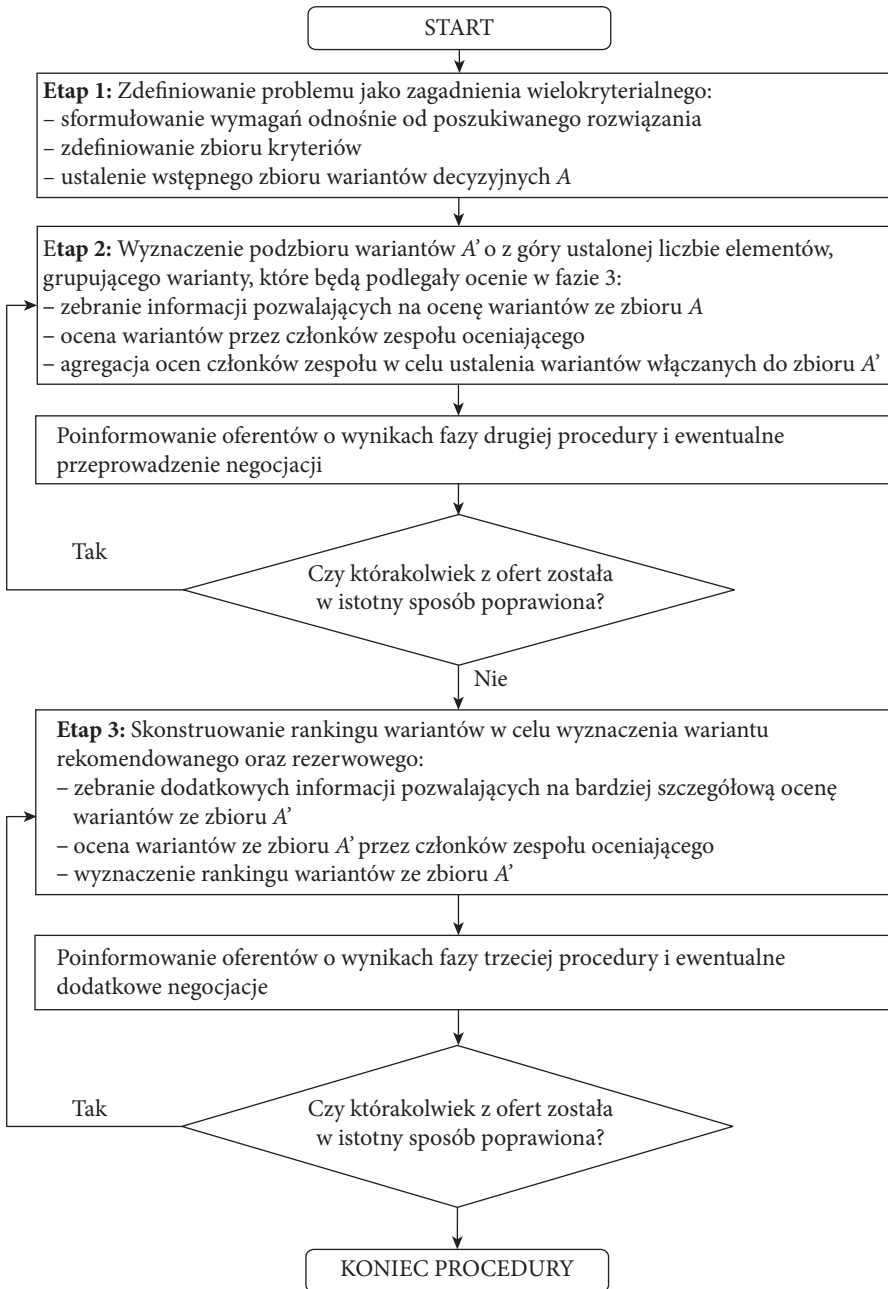
Warto zwrócić uwagę, że etapy drugi i trzeci mogą być wielokrotnie powtarzane. Po zakończeniu każdego z nich są przeprowadzane negocjacje z kontrahentami, które mogą prowadzić do modyfikacji przedstawionych przez nich propozycji. Schemat blokowy procedury przedstawiono na rysunku.

Z punktu widzenia metodologicznego najistotniejsze znaczenie ma sposób, w jaki na etapach drugim i trzecim członkowie zespołu oceniają poszczególne warianty, a także metoda wykorzystana do agregacji tych ocen.

Ze względu na niewielkie doświadczenie osób, które w analizowanym przedsiębiorstwie są angażowane do zespołów oceniających warianty realizacji przedsięwzięcia inwestycyjnego, na obecnym etapie badań autorzy zdecydowali się na skorzystanie z najprostszych metod wielokryterialnych. Doświadczenia, które zostaną zebrane w trakcie praktycznego wykorzystania proponowanej w pracy procedury, pozwolą w przyszłości na podjęcie próby zastosowania bardziej zaawansowanych narzędzi.

Rozpatrując metody wielokryterialne, które mogłyby zostać zastosowane lub zaadaptowane na potrzeby rozważanej klasy problemów decyzyjnych, należy w pierwszej kolejności przyjąć kilka ogólnych założeń dotyczących charakterystyki tych zagadnień. Po pierwsze, warianty oceniane są zarówno według kryteriów o charakterze ilościowym, jak i jakościowym. Po drugie, ze względu na fakt, że kryteria ilościowe są wykorzystywane wyłącznie do oceny parametrów technicznych rozpatrywanych rozwiązań, ich wartości podawane są w formie konkretnych wartości liczbowych. Zatem na rozważanym etapie procesu podejmowania decyzji nie bierzemy pod uwagę niepewności lub ryzyka związanego z inwestycją. Tego typu analiza jest prowadzona wcześniej, gdy ustalany jest budżet projektu.

Uwzględniając powyższe uwarunkowania, autorzy uznali, że w pierwszej kolejności należy rozważyć wykorzystanie metody scoringowej. Jest ona jedną z najprostszych i najczęściej stosowanych metod wielokryterialnych. Umożliwia ona zbudowanie rankingu wariantów decyzyjnych dzięki punktacji, jaką



Schemat procedury wspomaganie decyzji

warianty te uzyskały ze względu na poszczególne kryteria. W najprostszej postaci tej metody każdemu kryterium przypisywana jest maksymalna liczba punktów. Końcową ocenę wariantu stanowi suma uzyskanych punktów ze względu na poszczególne kryteria.

Ponieważ na ogół znaczenie przypisywane przez decydenta odpowiednim kryteriom jest różne, dlatego też dla każdego kryterium jest określany współczynnik wagowy, którego wartość odzwierciedla znaczenie, jakie do danego kryterium przywiązuje osoba dokonująca oceny. Po wyznaczeniu ocen wariantów według wszystkich kryteriów, określa się ważoną sumę ocen dla każdego wariantu. Na tej podstawie generowany jest ranking wszystkich analizowanych wariantów (Trzaskalik, 2014, s. 41–42).

Najważniejszą zaletą metody scoringowej pod względem praktycznym jest jej prostota, co umożliwi wyjaśnienie jej idei decydentowi, albo – jak w tym przypadku – zespołowi analitycznemu niemającemu większego wiedzy ani doświadczenia w zakresie wykorzystania metod wielokryterialnych.

Przyjmijmy, że w wyniku realizacji fazy pierwszej procedury określono zbiór wariantów decyzyjnych A oraz zbiór kryteriów F :

$$A = \{a_1, \dots, a_m\},$$

$$F = \{f_1, \dots, f_n\}.$$

Ponadto przyjmujemy, że zespół roboczy powołany w celu wskazania rekomendowanego rozwiązania składa się z p osób.

Na etapie drugim procedury wyznaczamy podzbiór wariantów decyzyjnych zakwalifikowanych do ostatniego etapu oceny, oznaczany jako A' . Przyjmijmy, że liczba wariantów w tym zbiorze powinna wynosić q . Zbiór A' może być wyznaczony przy wykorzystaniu następującego algorytmu:

1. Każdy z członków zespołu jest proszony o wyznaczenie rankingu wariantów za pomocą metody scoringowej. W tym celu każda z tych osób w sposób subiektywny określa wagi dla tych kryteriów, ze względu na które jest w stanie ocenić warianty, a następnie ocenia każdy z wariantów według tych kryteriów. Następnie są ustalane oceny ważone oraz rankingi wariantów odpowiadające preferencjom poszczególnych członków zespołu.
2. Wyznaczamy macierz C o wymiarach $m \times m$, skonstruowaną w taki sposób, że element c_{ij} określa, ile razy wariant a_i znalazł się w rankingach skonstruowanych na podstawie ocen sformułowanych przez poszczególnych członków zespołu na miejscu j .
3. Przyjmujemy $A' = \emptyset$.

4. Przyjmujemy $l = q$.
5. Przyjmujemy $\mathbf{B} = \mathbf{A} \setminus \mathbf{A}'$
6. Dla każdego i takiego, że $a_i \in \mathbf{B}$ obliczamy wartość wskaźnika d_i , korzystając z następującej formuły:

$$d_i = \sum_{j=1}^l c_{ij}. \quad (1)$$

7. Wyznaczamy wartość wskaźnika d_{\max} , korzystając z formuły:

$$d_{\max} = \max_{i: a_i \in \mathbf{B}} d_i. \quad (2)$$

8. Ze zbioru \mathbf{B} usuwamy wszystkie te warianty, dla których $d_i < d_{\max}$:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B} \setminus \{a_i : d_i < d_{\max}\}. \quad (3)$$

9. Jeżeli $\text{card}(\mathbf{B}) > q - \text{card}(\mathbf{A}')$, gdzie $\text{card}(\mathbf{B})$ i $\text{card}(\mathbf{A}')$ oznaczają odpowiednio liczbę elementów zbiorów \mathbf{B} oraz \mathbf{A}' , przechodzimy do kroku (11). W przeciwnym wypadku przyjmujemy $\mathbf{A}' = \mathbf{A}' \cup \mathbf{B}$.
10. Sprawdzamy, czy $\text{card}(\mathbf{A}') = q$. Jeżeli tak, to przechodzimy do kroku (13), w przeciwnym wypadku przechodzimy do kroku (5).
11. Jeżeli $l < m$, przyjmujemy $l = l + 1$ i przechodzimy do kroku (6).
12. Przyjmujemy $\mathbf{A}' = \mathbf{A}' \cup \mathbf{B}$.
13. Koniec obliczeń.

Zgodnie z przedstawionym wyżej algorytmem do zbioru \mathbf{A}' włączane są te warianty, które w rankingach opracowanych na podstawie informacji pozyskanych od poszczególnych członków zespołu oceniającego najczęściej występowały na miejscach od 1 do q . W przypadku gdy liczba wariantów kandydujących przewyższa liczbę miejsc (krok 9), algorytm sprawdza, który z nich częściej był umieszczany na kolejnych miejscach w rankingu. W ostateczności, gdy warianty kandydujące do włączenia do zbioru \mathbf{A}' nie różnią się liczbą wystąpień na kolejnych miejscach w rankingu, wszystkie są włączane do zbioru \mathbf{A}' (krok 12). W tym ostatnim wypadku liczba wariantów włączonych do zbioru \mathbf{A}' jest większa od początkowo zaplanowanej. Sposób działania algorytmu ilustruje poniższy przykład.

Przykład

Rozważmy problem opisany w części drugiej pracy. Zespół oceniający składa się z sześciu osób. Rozważa sześć urzędzeń, z których w pierwszej kolejności

ma dokonać wyboru trzech, a następnie wybrać jedno urządzenie rekomendowane oraz jedno rezerwowe. Poniżej przedstawiamy, w jaki sposób można zrealizować pierwsze z tych zadań przy pomocy metody opisanej powyżej. Zbiór wariantów decyzyjnych (rozważanych urządzeń produkcyjnych) liczy sześć elementów:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}.$$

Każdy z członków zespołu oceniającego został poproszony o przygotowanie rankingu urządzeń zgodnie z własnymi preferencjami. Rezultaty przedstawia tabela.

Rankingi opracowane na podstawie ocen sformułowanych przez poszczególnych członków zespołu oceniającego

Pozycja	Członek zespołu oceniającego					
	1	2	3	4	5	6
1	a_1	a_4	a_3	a_1	a_3	a_3
2	a_2	a_3	a_2	a_3	a_4	a_1
3	a_3	a_1	a_5	a_4	a_1	a_2
4	a_4	a_2	a_1	a_6	a_2	a_4
5	a_5	a_6	a_6	a_2	a_5	a_5
6	a_6	a_5	a_4	a_5	a_6	a_6

Macierz C ma postać następującą:

$$C = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 3 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

Kolejne kroki algorytmu realizowane są w sposób następujący:

Krok 3: Przyjmujemy $A' = \emptyset$.

Krok 4: Przyjmujemy $l = q = 3$.

Krok 5: Przyjmujemy $B = A \setminus A' = A$.

Krok 6: Obliczamy wartości współczynników d_i :

$$d_1 = 5, d_2 = 3, d_3 = 6, d_4 = 3, d_5 = 1, d_6 = 0.$$

- Krok 7: Wyznaczamy wartość $d_{\max} = 6$.
- Krok 8: Ze zbioru \mathbf{B} usuwamy wszystkie warianty, dla których $d_i < d_{\max}$:
 $\mathbf{B} = \mathbf{B} \setminus \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\} = \{a_3\}$.
- Krok 9: Otrzymujemy $\text{card}(\mathbf{B}) = 1$ oraz $\text{card}(A') = 0$. Wobec faktu, że $\text{card}(\mathbf{B}) < q - \text{card}(A')$, przyjmujemy $A' = A' \cup \mathbf{B} = \{a_3\}$.
- Krok 10: Ponieważ $\text{card}(A') < q$, przechodzimy do kroku (5).
- Krok 5: Przyjmujemy $\mathbf{B} = A \setminus A' = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$.
- Krok 6: Obliczamy wartości współczynników d_i :
 $d_1 = 5, d_2 = 3, d_4 = 3, d_5 = 1, d_6 = 0$.
- Krok 7: Wyznaczamy wartość $d_{\max} = 5$.
- Krok 8: Ze zbioru \mathbf{B} usuwamy wszystkie warianty, dla których $d_i < d_{\max}$:
 $\mathbf{B} = \mathbf{B} \setminus \{a_2, a_4, a_5, a_6\} = \{a_1\}$.
- Krok 9: Otrzymujemy $\text{card}(\mathbf{B}) = 1$ oraz $\text{card}(A') = 1$. Wobec faktu, że $\text{card}(\mathbf{B}) < q - \text{card}(A')$, $A' = A' \cup \mathbf{B} = \{a_1, a_3\}$.
- Krok 10: Ponieważ $\text{card}(A') < q$, przechodzimy do kroku (5).
- Krok 5: Przyjmujemy $\mathbf{B} = A \setminus A' = \{a_2, a_4, a_5, a_6\}$.
- Krok 6: Obliczamy wartości współczynników d_i :
 $d_2 = 3, d_4 = 3, d_5 = 1, d_6 = 0$.
- Krok 7: Wyznaczamy wartość $d_{\max} = 3$.
- Krok 8: Ze zbioru \mathbf{B} usuwamy wszystkie warianty, dla których $d_i < d_{\max}$:
 $\mathbf{B} = \mathbf{B} \setminus \{a_5, a_6\} = \{a_2, a_4\}$.
- Krok 9: Otrzymujemy $\text{card}(\mathbf{B}) = 2$ oraz $\text{card}(A') = 2$. Wobec faktu, że $\text{card}(\mathbf{B}) > q - \text{card}(A')$, przechodzimy do kroku 11.
- Krok 11: Ponieważ $l = 3 < m = 6$, przyjmujemy $l = l + 1 = 4$ i przechodzimy do kroku (6).
- Krok 6: Obliczamy wartości współczynników d_i :
 $d_2 = 5, d_4 = 5$.
- Krok 7: Wyznaczamy wartość $d_{\max} = 5$.
- Krok 8: Ze zbioru \mathbf{B} usuwamy wszystkie warianty, dla których $d_i < d_{\max}$:
 $\mathbf{B} = \mathbf{B} \setminus \emptyset = \{a_2, a_4\}$.
- Krok 9: Otrzymujemy $\text{card}(\mathbf{B}) = 2$ oraz $\text{card}(A') = 2$. Wobec faktu, że $\text{card}(\mathbf{B}) > q - \text{card}(A')$, przechodzimy do kroku 11.
- Krok 11: Ponieważ $l = 4 < m = 6$, przyjmujemy $l = l + 1 = 5$ i przechodzimy do kroku (6).
- Krok 6: Obliczamy wartości współczynników d_i :
 $d_2 = 6, d_4 = 5$.
- Krok 7: Wyznaczamy wartość $d_{\max} = 6$.
- Krok 8: Ze zbioru \mathbf{B} usuwamy wszystkie warianty, dla których $d_i < d_{\max}$:
 $\mathbf{B} = \mathbf{B} \setminus \{a_4\} = \{a_2\}$.

Krok 9: Otrzymujemy $\text{card}(\mathbf{B}) = 2$ oraz $\text{card}(\mathbf{A}') = 1$. Wobec faktu, że $\text{card}(\mathbf{B}) = q - \text{card}(\mathbf{A}')$, przyjmujemy $\mathbf{A}' = \mathbf{A}' \cup \mathbf{B} = \{a_1, a_2, a_3\}$.

Krok 10: Ponieważ $\text{card}(\mathbf{A}') = q$, przechodzimy do kroku (13).

Krok 13: Koniec obliczeń.

W pierwszej kolejności do zbioru urzędzeń, które powinny być uwzględnione w dalszej analizie, zostało włączone urządzenie nr 3, które według wszystkich członków zespołu znalazło się na jednym z trzech pierwszych miejsc. Jako następne uwzględnione zostało urządzenie nr 1, które tylko jedna osoba umieściła na pozycji niższej niż trzecia. Ustalając, które urządzenie jako ostatnie powinno być zakwalifikowane do dalszej analizy, rozpatrywano dwie maszyny: nr 2 oraz nr 4. Każda z nich została umieszczona na jednym z trzech najwyższych miejsc przez trzy osoby. Ponieważ można było wybrać tylko jedno z tych urzędzeń (do końcowej fazy oceny miały być zakwalifikowane jedynie trzy), sprawdzono najpierw, ilu członków zespołu umieściło każdą z nich na jednym z czterech pierwszych miejsc. Ponieważ i w tym wypadku oba urzędzenia uzyskały ten sam wynik (po 5 osób umieszczających je na jednym z czterech najwyższych pozycji), sprawdzono, czy występują różnice w przypadku uwzględnienia pięciu pierwszych pozycji. Ponieważ w przypadku urzędzenia nr 5 wszyscy członkowie zespołu umieścili urządzenie nr 2 na jednym z pierwszych pięciu pozycji, zaś jeden członek zespołu umieścił maszynę nr 4 na pozycji szóstej, ostatecznie do dalszej analizy zostało zakwalifikowane urządzenie nr 2.

Uzyskane rozwiązanie nie powinno być traktowane jako ostateczne. Po przedstawieniu go członkom zespołu, w wyniku przeprowadzonych dyskusji, niektórzy z członków zespołu mogą uznać, że ich wcześniejsze oceny nie były w pełni uzasadnione. W takim wypadku procedurę ewaluacji należałoby powtórzyć, a następnie ponownie uruchomić przedstawiony powyżej algorytm w celu ponownego wyznaczenia zbioru \mathbf{A}' .

W fazie trzeciej procedury rozważanych jest już zwykle stosunkowo niewiele wariantów decyzyjnych. W tej sytuacji do wyznaczenia rankingów wariantów odzwierciedlających oceny poszczególnych wariantów mogą być zastosowane bardziej zaawansowane metody wielokryterialne, takie jak analityczny proces hierarchizacji AHP, metoda SAW, TOPSIS lub któraś z metod opartych na relacji przewyższania (Trzaskalik, 2014). Ostateczny ranking można ustalić, przyjmując np. zasadę stosowaną w klasyfikacji medalowej w rozgrywkach sportowych. Na pierwszym miejscu umieszczamy wariant, który w rankingach sporządzonych na podstawie opinii wyrażonych przez poszczególnych członków zespołu najczęściej występował na najwyższej pozycji, a w przypadku gdy zasada ta nie daje jednoznacznego wyniku, uwzględniana

jest liczba wystąpień na kolejnych miejscach w rankingach. W przypadku gdy zaproponowana wyżej zasada nie pozwala na wyznaczenie rankingu, konieczne jest poinformowanie członków zespołu, że wyrażone przez nich opinie nie pozwalają na wyznaczenie klarownego rankingu i przeprowadzenie ponownej ewaluacji wariantów.

Zakończenie

Wybór wariantu inwestycyjnego jest typowym problemem wielokryterialnym. Obok kryteriów o charakterze finansowym w analizie są uwzględniane czynniki o charakterze technicznym, społecznym, środowiskowym. Końcowe rozwiązanie jest zwykle wynikiem długotrwałego procesu, w trakcie którego zbiór wstępnie rozważanych opcji jest stopniowo zawężany. Warto zauważyć, że w procesie tym udział bierze wielu interesariuszy różniących się poglądami na temat tego, które kryteria powinny mieć decydujący wpływ przy wyborze rozwiązania.

Doświadczenia autorów wskazują, że praktycy (a przynajmniej ich część) są otwarci na stosowanie ilościowych metod wspomagania decyzji, jednak oczekują, że proponowane procedury będą uwzględniały specyfikę problemu oraz reguły, jakimi się kieruje organizacja przy podejmowaniu decyzji o uruchomieniu projektu inwestycyjnego. Są oni zainteresowani zwłaszcza takimi propozycjami, które nie wymagają stosowania wyspecjalizowanego, kosztownego oprogramowania.

Praca stanowi podsumowanie wstępnych, których celem jest zaproponowanie procedur wspomagania decyzji dedykowanych dla problemów związanych z podejmowaniem decyzji inwestycyjnych w przedsiębiorstwach. W ramach dalszych prac, autorzy zamierzają rozbudować procedurę o analizę ryzyka, poprzez uwzględnienie decyzji, które nie były rozważane w prezentowanej pracy, a które dotyczą m.in. określania budżetu projektu.

Bibliografia

- Costa, J. P., Melo, P., Godinho, P. i Dias, L. C. (2003). The AGAP system: a GDSS for project analysis and evaluation. *European Journal of Operational Research*, 145(2), 287–303. doi:10.1016/S0377-2217(02)00535-0

- Doerner, K. F., Gutjahr, W. J., Hartl, R. F., Strauss, C. i Stummer, C. (2006). Pareto ant colony optimization with ILP preprocessing in multiobjective project portfolio selection. *European Journal of Operational Research*, 171(3), 830–841. doi:10.1016/j.ejor.2004.09.009
- Ferrari, P. (2003). A method for choosing from among alternative transportation projects. *European Journal of Operational Research*, 150(1), 194–203. doi:10.1016/S0377-2217(02)00463-0
- Ghorbani, S. i Rabbani, M. (2009). A new multi-objective algorithm for a project selection problem. *Advances in Engineering Software*, 40(1), 9–14. doi:10.1016/j.advengsoft.2008.03.002
- Graves, S. B. i Ringuest, J. L. (2003). *Models & methods for project selection: concepts from management science, finance and information technology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Heidenberger, K. i Stummer, Ch. (1999). Research and development project selection and resource allocation: a review of quantitative modelling approaches. *International Journal of Management Reviews*, 1(2), 197–224. doi:10.1111/1468-2370.00012
- Kearns, G. S. (2004). A multi-objective, multi-criteria approach for evaluating IT investments: results from two case studies. *Information Resources Management Journal*, 17(1), 37–62.
- Lootsma, F. A., Mensch, T. C. A. i Vos F. A. (1990). Multi-criteria analysis and budget reallocation in long-term research planning. *European Journal of Operational Research*, 47(3), 293–305. doi:10.1016/S0377-2217(90)90216-X
- Marcinek, K. (1998). *Finansowa ocena przedsięwzięć inwestycyjnych przedsiębiorstw*. Katowice: Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej im. Karola Adamieckiego.
- Mavrotas, G., Diakoulaki, D. i Capros, P. (2003). Combined MCDA-IP approach for project selection in electricity market. *Annals of Operations Research*, 120 (1–4), 159–170. doi:10.1023/A:1023382514182
- Mohanty, R. P., Agarwal, R., Choudhury, A. K. i Tiwary M. K. (2005). A fuzzy ANP-based approach to R&D project selection: A case study. *International Journal of Production Research*, 43(24), 5199–5216. doi:10.1080/00207540500219031
- Moselhi, O. i Deb, B. (1993). Project selection considering risk. *Construction Management and Economics*, 11(1), 45–52. doi:10.1080/01446199300000063
- Nowak, M. (2005). Investment projects' evaluation by simulation and multiple criteria decision making procedure. *Journal of Civil Engineering and Management*, 11(3), 193–202. doi:10.1080/13923730.2005.9636350
- Nowak, M. (red.). (2014). *Wspomaganie decyzji w planowaniu projektów*. Warszawa: Difin.
- Rabbani, M., Aramoon Bajestani, M. i Baharian Khoshkhou, G. (2010). A multi-objective particle swarm optimization for project selection problem. *Expert Systems with Applications*, 31(1), 315–321. doi:10.1016/j.eswa.2009.05.056
- Roy, B. (1990). *Wielokryterialne wspomaganie decyzji*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.

-
- Saaty, T. L. (1980). *The analytical hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Trzaskalik T. (red.). (2014). *Wielokryterialne wspomaganie decyzji*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Wong, E. T. T., Norman, G. i Flanagan, R. (2000). A fuzzy stochastic technique for project selection. *Construction Management and Economics*, 18(4), 407–414. doi:10.1080/01446190050024824