

Tomasz STYPKA • Agnieszka FLAGA-MARYAŃCZYK

MOŻLIWOŚCI STOSOWANIA ZMODYFIKOWANEJ METODY AHP W PROBLEMACH INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Tomasz Stypka, dr inż. – Politechnika Krakowska

Agnieszka Flaga-Maryańczyk, dr inż. – Politechnika Krakowska

adres korespondencyjny:

Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza

ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

e-mail: stypka@gmail.com

THE APPLICABILITY OF A MODIFIED AHP METHOD IN ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING PROBLEMS

SUMMARY: The article presents the idea of different single criterion and multi-criteria methods of analysis focusing on a method known as Analytic Hierarchy Process (AHP). The modified version of the AHP method is presented. This modified method directly uses the performance parameters of the compared options creating "satisfaction function" used in the final analysis. The presented simple hypothetical example of road crossing traffic organisation shows the potential of the modified AHP method and HIPRE software. Additionally, the problem of many evaluating groups with different evaluation criteria is described.

KEYWORDS: AHP, Analytic Hierarchy Process, multicriteria analysis, HIPRE

Wstęp

Przy podejmowaniu decyzji, w tym tych z zakresu inżynierii środowiska, decydent świadomie lub nieświadomie stosuje albo metodę jednokryterialną, szukając rozwiązania, które najlepiej spełnia jedno wybrane kryterium, albo uznając fakt, że jest wiele kryteriów, które należy brać pod uwagę przy podejmowaniu decyzji, stosuje metody wielokryterialne, w których ostateczne rozwiązanie ma charakter kompromisu pomiędzy przyjętymi kryteriami. Metoda jednokryterialna daje jasny wynik, jaką decyzję należy podjąć ze świadomością, że wiele istotnych parametrów analizowanych rozwiązań w ogóle nie było branych pod uwagę. Z kolei metoda wielokryterialna wymaga zarówno wypracowania wielu kryteriów oceny, jak i zasad podejmowania decyzji w oparciu o mnogość kryteriów. Metoda ta daje pełniejszy obraz analizowanych wariantów, ale ostateczny wynik analizy nie jest tak jednoznaczny.

Zarys analizy jednokryterialnej i wielokryterialnej

Do podstawowych jednokryterialnych metod analitycznych należą: analiza kosztów i korzyści (z ang. *Cost-Benefit Analysis*, CBA) oraz analiza kosztów i efektywności (z ang. *Cost-Effectiveness Analysis*, CEA). Analizę metodą CBA przeprowadza się w trzech etapach. W etapie pierwszym, po zdefiniowaniu jakie warianty rozwiązań powinny być porównywane, nadaje się wszystkim kosztom i korzyściom każdego z wariantów wartość pieniężną. W czasie etapu drugiego, dla wszystkich analizowanych wariantów, następuje porównanie kosztów oraz korzyści. Porównanie przeprowadza się stosując różne miary efektywności ekonomicznej. Do najpopularniejszych należy wartość bieżąca netto (NPV) czy stopa zwrotu z inwestycji. Etap trzeci to wybór najlepszego rozwiązania, czyli takiego, które najlepiej spełnia przyjętą funkcję celu¹.

Mimo, że metoda CBA jest metodą starą (najwcześniejsze przykłady jej zastosowania pochodzą z początku XIX wieku), to każdy z jej etapów stwarza pewne trudności. Okazuje się, że nie jest nawet oczywiste określenie co jest kosztem, a co korzyścią. Często akt destrukcji zasobów naturalnych, jakim jest na przykład drenowanie terenów podmokłych, przez jednych określany jest jako korzyść, podczas gdy inni uważają takie zmiany za koszt. Kolejnym problemem jest problem wyceny w wartościach monetarnych wszystkich kosztów i korzyści, którymi często są tak trudne do wyceny kwestie jak

¹ A. Woś, *Ekonomika Odnawialnych zasobów naturalnych*, Warszawa 1995.

poprawa lub pogorszenie jakości środowiska naturalnego lub ludzkiego zdrowia, a nawet ludzkie życie. Istnieją metody wyznaczania tego typu kosztów lub korzyści, takie jak metoda kosztów podróży, cen hedonicznych czy wyceny warunkowej, ale otrzymane wyniki są tylko szacunkami rzeczywistych wartości². W CBA pojawia się również problem wyceny wartości czasu, czyli przyjęcia odpowiedniej wartości stopy dyskonta³.

Analiza kosztów i efektywności (z ang. *Cost-Effectiveness Analysis*, CEA) jest rodzajem analizy jednokryterialnej, w której celem jest wybór rozwiązania gwarantującego osiągnięcie określonego wcześniej celu w sposób najbardziej ekonomiczny. Mierzy ona relację efektów do nakładów i nie oceniając, czy nakłady na dany cel są efektywne, w sposób absolutny umożliwia wybór najlepszego rozwiązania. Przykładowo, jeżeli celem projektu jest wyprodukowanie jak najtaniej największej ilości energii, CEA odpowiada na pytanie, które z analizowanych urządzeń produkuje jednostkę ciepła najniższym kosztem i w związku z tym, przy tak przyjętym kryterium, jest najlepsze.

Z praktyki decyzyjnej wynika, że większość sytuacji decyzyjnych rozważana jest przez decydentów z perspektywy więcej niż jednego kryterium. Przyczyną takiego podejścia jest złożoność otaczającego świata i wielowymiarowość ludzkiej percepcji. Człowiek z natury dąży do maksymalizacji swojego zadowolenia we wszystkich możliwych aspektach⁴. Istota metod wielokryterialnych polega na próbie uwzględnienia w procesie decyzyjnym wielości wymagań, którymi kieruje się decydent. Istnieje cały szereg metod wielokryterialnych (z ang. *Multi Criteria Decision Analysis*, MCDA) oraz bogata literatura opisująca ich stosowanie⁵. Istnieje również kilka kategorii

² T. Żylicz, *Ekonomika środowiska i zasobów naturalnych*, Warszawa 2004.

³ T. Stypka, K. Berbeka, *Drinking Water Consumption in Cracow – an Assessment from a Sustainable Development Perspective*, „Problemy Ekorozwoju” 2014 t. 9, nr 2, s. 121-130; R. Layard, S. Glaister, *Cost-Benefit Analysis*, Cambridge 1994.

⁴ B. Roy, *Paradigms and challenges, Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art surveys*, New York 2005, s. 3-24; Z. Piotrowski, *Algorytm doboru metod wielokryterialnych w środowisku niedoprecyzowania informacji preferencyjnej*, rozprawa doktorska, Szczecin 2009, s. 23-32.

⁵ G.A. Mendoza, H. Martins, *Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms*, „Forest Ecology and Management” 2006 nr 230, s. 1-22; I.B. Huang, J. Keisler, I. Linkov, *Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends*, „Science of the Total Environment” 2011 nr 409, s. 3578-3594; E. Drużyńska, *Metody wspomagania wielokryterialnych wyborów w zarządzaniu zasobami wodnymi*, rozprawa doktorska, Kraków 1997; T. Buchholz, E. Rametsteiner, T.A. Volk, V.A. Luzadis, *Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments*, „Energy Policy” 2009 nr 37, s. 484-495; J.A. Scott, W. How, P.K. Dey, *A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy systems*, „Energy” 2012 nr 42, s. 146-156; C. Zopounidis, P.M. Pardalos, *Handbook of multicriteria analysis*, Heidelberg 2012; E. Triantaphyllou, *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, Dordrecht 2010; B. Roy, op.cit.

podziału metod wielokryterialnych⁶. Do najważniejszych można zaliczyć podział ze względu na naturę możliwych rozwiązań. Według tego kryterium istnieją takie metody, które analizują skończoną ilość rozwiązań i starają się o znalezienie rozwiązania najlepszego (choć nie optymalnego) i takie które szukają rozwiązania najlepszego z nieskończonej puli rozwiązań. Przykładowo, wybór urządzenia ze skończonej listy produkowanych urządzeń należy do pierwszej grupy problemów, podczas gdy projektowanie urządzenia do spełnienia konkretnego zadania należy do grupy drugiej. Do pierwszej grupy metod należy rodzina metod ELECTRE⁷, a do drugiej można zaliczyć takie metody jak: programowanie celowe, Analizy Obwiedni Danych (z ang. *Data Envelopment Analysis*, DEA), SMART (z ang. *Specific, Measurable, Achievable, Realistic, Time-bound*) i AHP (z ang. *Analytic Hierarchy Process*)⁸. Drugim istotnym kryterium podziału metod wielokryterialnych jest to, czy kryteria preferencji poszczególnych kategorii są jasno sprecyzowane i używane w czasie analizy, czy też są dopiero precyzowane po przeprowadzeniu analizy. Ze względu na to kryterium metody ELECTRE, SMART, programowanie celowe i AHP zalicza się do pierwszej grupy, podczas gdy metoda DEA należy do grupy drugiej.

W przypadku zastosowania metody wielokryterialnej, osoba podejmująca decyzję musi w pierwszym rzędzie wybrać konkretną metodę, a następnie wybrać kryteria oceny i zasady podejmowania decyzji opierając się na licznych kryteriach. Ostateczne rozwiązanie w metodzie wielokryterialnej ma charakter kompromisu pomiędzy przyjętymi kryteriami. Metoda ta daje pełniejszy obraz analizowanych wariantów, ale ostateczny wynik analizy nie jest tak jednoznaczny jak w metodzie jednokryterialnej.

Metody wielokryterialne (MCDA) są doskonałymi narzędziami przy rozwiązywaniu problemów dotyczących zarządzania środowiskiem. Nowoczesne podejście do wypracowywania rozwiązań problemów środowiskowych opartych na koncepcji trwałego rozwoju wymaga brania pod uwagę i równoważenia racji społecznych, środowiska naturalnego i ekonomicznych. Dodatkowo, pojawiają się również zasadnicze różnice interesów pomiędzy różnymi grupami społecznymi, które także powinny być wzięte pod uwagę. Popularność zastosowania metod wielokryterialnych do problemów środowiska naturalnego systematycznie wzrasta, co potwierdza rosnąca ilość artykułów

⁶ E. Drużyńska, op. cit.; B. Roy, op.cit.; Z. Piotrowski, op. cit.

⁷ J. Figueira, V. Mousseau, B. Roy, *ELECTRE methods, Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art surveys*, New York 2005, s. 133-153.

⁸ C. Revelle, A.E. McGarity, *Design and Operation of Civil and Environmental Engineering Systems*, New York 1997.

na ten temat (wzrosła od kilku na początku lat dziewięćdziesiątych do setek pod koniec 2000 roku)⁹.

Metoda AHP na tle innych metod analizy wielokryterialnej

Metoda Procesu Analizy Hierarchicznej (z ang. *Analytic Hierarchy Process*, AHP) jest jedną z najpopularniejszych metod analizy wielokryterialnej (MCDA). Jest to stosunkowo nowa metoda, która została opracowana dopiero w latach siedemdziesiątych XX wieku przez Thomasa L. Saaty'ego z Uniwersytetu w Pittsburgu, USA¹⁰. Jej popularność podnosi fakt, że posiada darmowe oprogramowanie dla potencjalnych użytkowników (Expert Choice, HIPRE¹¹).

Mierząc liczbą opublikowanych artykułów, jest to metoda najważniejsza. Jak podaje Huang¹², artykuły o metodzie AHP stanowią aż 48% artykułów o metodach wielokryterialnych (na 312 przeanalizowanych artykułów, aż 150 dotyczyło metody AHP). Jest to najpopularniejsza metoda wśród azjatyckich, amerykańskich i europejskich badaczy zajmujących się wszystkimi dziedzinami z wyjątkiem jakości powietrza, a popularność metody na tle innych metod MCDA z czasem rośnie¹³.

Od momentu wprowadzenia, metoda AHP jest szeroko stosowana w bardzo wielu dziedzinach¹⁴, takich jak: zarządzanie¹⁵, politologia, socjologia, wytwarzanie, transport i logistyka czy bankowość¹⁶. AHP pomaga między

⁹ I.B. Huang, J. Keisler, I. Linkov, op. cit.

¹⁰ R.W. Saaty, *The analytic hierarchy process-what it is and how it is used*, "Mathematical Modelling" 1987 t. 9, nr 3-5, s. 161-176; T.L. Saaty, *Decision making with the analytic hierarchy process*, "International Journal of Services Sciences" 2008 t. 1, nr 1, s. 83-98.

¹¹ www.hipre.aalto.fi [20-03-2016].

¹² I.B. Huang, J. Keisler, I. Linkov, op. cit.

¹³ Ibidem.

¹⁴ A. Ishizaka, A. Labib, *Review of the main developments in the analytic hierarchy process*, "Expert Systems with Applications" 2011 nr 38, s. 14336-14345; O.S. Vaida, S. Kumar, *Analytic hierarchy process: An overview of applications*, "European Journal of Operational Research" 2006 nr 169, s. 1-29.

¹⁵ O. Downarowicz, J. Krause, M. Sikorski, W. Stachowski, *Zastosowanie metody AHP do oceny i sterowania poziomem bezpieczeństwa złożonego obiektu technicznego*, w: O. Downarowicz (red.), *Wybrane metody ergonomii i nauki o eksploatacji*, Gdańsk 2000, s. 7-42; A. Florek-Paszkowska, P. Cymanow, *Zrównoważona produkcja elementem determinującym wzrost wartości przedsiębiorstwa – analiza przy pomocy metody AHP/ANP*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego” nr 786 „Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia” 2013 nr 64(1), s. 21-31.

¹⁶ S. Omkarprasad, S.K. Vaidya, *Analytic hierarchy process: An overview of applications*, "European Journal of Operational Research" 2006 t. 169(1), s. 1-29.

innymi w wyborze lokalizacji, wyborze strategii, doborze dostawców¹⁷, wyborze pracowników, wyborze projektów czy uwzględnianiu wymagań klientów¹⁸. Jest również stosowana w różnych obszarach zarządzania środowiskiem¹⁹.

Obecnie łączy się również metodę AHP z innymi narzędziami pomagającymi w podejmowaniu decyzji. Do najważniejszych należą programowanie liniowe, Dopasowanie Funkcji Jakości (z ang. *Quality Function Deployment*, QFD), metaheurystyki, analizy SWOT (z ang. *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*), czy Analizy Obwiedni Danych (z ang. *Data Envelopment Analysis*, DEA)²⁰. AHP próbuje się również wykorzystywać w połączeniu z takimi narzędziami zarządzania środowiskiem jak LCA (z ang. *Life Cycle Assessment*) i wskaźnikami oddziaływania na środowisko, by stworzyć lepsze narzędzia zarządzania środowiskiem dla firm²¹.

Opis metody AHP wraz z przykładem zastosowania

Metoda AHP jest oparta na następujących podstawach psychologicznych:

- człowiek dokonuje najłatwiej: porównań względnych i niemianowanych, porównań stosunków a nie różnicowych,

¹⁷ V. Mani, A. Rajat, V. Sharma, *Supplier selection using social sustainability: AHP based approach in India*, "International Strategic Management Review" 2014 nr 2, s. 98-112; M. Matusek, *Proces wyboru dostawcy wspierający zrównoważony rozwój – identyfikacja kryteriów oceny metoda AHP (Analytic Hierarchy Process)*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Organizacja i Zarządzanie” 2015 z. 78 (nr 1928), s. 263-278.

¹⁸ P. Skowron, *Wybór klientów metodą AHP (Analytic Hierarchy Process) na przykładzie przedsiębiorstwa z branży spożywczej*, w: P. Rogala, T. Borys (red.), *Orientacja na klienta jako kryterium doskonałości*, Wrocław 2011, s. 532-549.

¹⁹ C. Revelle, A.E. McGarity, op. cit.; T. Stypka, A. Flaga-Maryańczyk, *Comparative analysis of municipal solid waste systems: Cracow case study*, "Environment Protection Engineering" 2013 t. 4, s. 135-153; T. Stypka, K. Berbeka, op. cit.; T. Stypka, *Modelowanie systemów gospodarki odpadami komunalnymi*, Monografia 464, seria Inżynieria Środowiska, 2014; T. Stypka, A. Flaga-Maryańczyk, J. Schnotale, *Developing an Environmentally sound selection method for heating appliances using ecolabeling, Analytic Hierarchy Process, and Cost-Benefit analysis: a heat pump case study*, "Polish Journal of Environmental Studies" 2015 t. 24, nr 3, s.1327-1338; W. Sobczyk, A. Kowalska, E.J. Sobczyk, *Wykorzystanie wielokryterialnej metody AHP i macierzy Leopolda do oceny wpływu eksploatacji złóż żwirowo-piaskowych na środowisko przyrodnicze doliny Jasiółki*, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2014 t. 30, z. 2, s.157-172; M. Zawilski, G. Sakson, *Wybór metody modernizacji systemu kanalizacyjnego przy wykorzystaniu metody AHP*, „Ekonomia i Środowisko” 2013 nr 4(47), s. 10-23; K. Ogrodnik, *Możliwość implementacji metody AHP do procedury wyboru optymalnego wariantu lokalizacyjnego zespołu elektrowni wiatrowych*, „Ekonomia i Środowisko” 2014 nr 1(48), s. 64-79.

²⁰ W. Ho, *Integrated analytic hierarchy process and its applications – A literature review*, "European Journal of Operational Research" 2008 nr 186, s. 211-228.

²¹ B.G. Hermann, C. Kroeze, W. Jawjit, *Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators*, "Journal of Cleaner Production" 2007 nr 15, s. 1787-1796.

- człowiek jest zdolny do 7 porównań jednocześnie,
- człowiek widzi świat jako hierarchię celów powiązanych relacjami,
- ludzkie reakcje na bodźce mają często charakter nie liniowy a logarytmiczny,
- wszelkie osądy obarczone są preferencjami.

Na podstawie tych założeń zbudowano metodę AHP, którą realizuje się w czterech etapach:

1. Wybór uszeregowanych hierarchicznie kryteriów analizy.
2. Ustalenie wag poszczególnych kryteriów poprzez porównania parami z zastosowaniem dziewięciostopniowej skali Satty'ego
3. Ocena, jak analizowane rozwiązania spełniają poszczególne kryteria, poprzez porównania rozwiązań parami z zastosowaniem dziewięciostopniowej skali Satty'ego.
4. Obliczenie ostatecznej oceny poszczególnych rozwiązań, którą jest suma iloczynów wag przypisanych poszczególnym kryteriom i stopnia spełnienia danego kryterium przez analizowane rozwiązanie.

Korzyści wynikające z zastosowania metody AHP to między innymi:

- spojrzenie na problemy decyzyjne z innej perspektywy, poprzez uporządkowanie kryteriów i wariantów w ramach hierarchii,
- redukcja problemu wielokryterialnego do szeregu prostych porównań parami poszczególnych kryteriów i wariantów,
- możliwość łącznej analizy kryteriów wymiernych i niewymiernych,
- racjonalne uzasadnienie wyboru.

Stosowanie metody AHP ułatwia istniejące darmowe oprogramowanie komputerowe (Expert Choice, HIPRE). W artykule przedstawiono zastosowanie i możliwości programu HIPRE, który jest programem dostępnym na stronie Politechniki w Helsinkach²².

Skuteczne przeprowadzenie analizy metodą AHP stwarza szereg trudności. Podstawowym problemem jest to, że analizowana kwestia jest często oceniana przez różne strony, które przypisują różne wagi do poszczególnych kryteriów; co więcej, same strony mogą mieć bardzo różne kryteria. Obliczanie ostatecznych wag jako średniej ważonej ocen poszczególnych stron jest całkowicie niewłaściwe. Problem ten można rozwiązać wprowadzając te różne oceniające strony jako osobne kryteria do analizy. Można również zrobić osobne analizy AHP z punktu widzenia poszczególnych stron, następnie zagregować otrzymane wyniki jako średnią ważoną poszczególnych ocen.

Kolejnym problemem jest trudność w przeprowadzeniu trzeciego etapu analizy, czyli porównywanie analizowanych rozwiązań z punktu widzenia spełnienia poszczególnych kryteriów z zastosowaniem dziewięciostopniowej skali Satty'ego. Porównanie takie jest bardzo intuicyjne i obarczone

²² www.hipre.aalto.fi [20-03-2016].

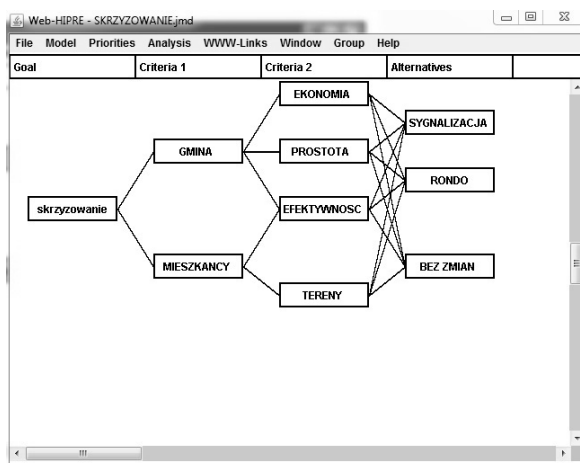
dużym błędem. W przypadku analizy rozwiązań z dziedziny inżynierii środowiska, gdzie poziom spełnienia poszczególnych kryteriów przez analizowane rozwiązania jest często precyzyjnie mierzony w wielkościach fizycznych, porównywanie tych rozwiązań za pomocą dziewięciostopniowej skali jest informacyjnie ubożające. Zaproponowanym przez autorów rozwiązaniem jest modyfikacja analizy AHP. Polega ona na przeprowadzeniu oceny rozwiązań z punktu widzenia poszczególnych kryteriów, z wykorzystaniem fizycznych parametrów poszczególnych rozwiązań, które przez porównanie z maksymalnymi i minimalnymi dopuszczalnymi wartościami zostają zamienione na standaryzowane wartości, opisujące stopień zadowolenia oceniającego ze spełnienia poszczególnych kryteriów. Wartość tego spełnienia waha się w granicach od zera do jeden. Ostateczna ocena poszczególnych rozwiązań jest ważoną sumą spełnienia poszczególnych kryteriów.

Ostateczny wynik otrzymany taką zmodyfikowaną metodą różni się od wyniku otrzymanego klasyczną metodą AHP. W wypadku klasycznej metody AHP suma wszystkich ocen analizowanych rozwiązań wynosi jeden, natomiast przy zastosowaniu metody zaproponowanej przez autorów ocenę jeden otrzymuje rozwiązanie, które całkowicie spełnia wymagania we wszystkich założonych kryteriach. Wynik ten jest niezależny od ocen uzyskanych przez inne analizowane rozwiązania.

W celu zobrazowania sposobu działania zmodyfikowanej metody AHP przedstawiono prosty, hipotetyczny problem wyboru sposobu organizacji ruchu na skrzyżowaniu w małym miasteczku. W analizowanym przypadku są trzy sposoby zorganizowania ruchu na skrzyżowaniu: sygnalizacja świetlna (SYGNALIZACJA), budowa ronda (RONDO), pozostawienie stanu aktualnego (BEZ ZMIAN), oraz dwie zasadnicze grupy oceniające, które posiadają różne kryteria oceny: władze gminy (GMINA) i mieszkańcy gminy (MIESZKAŃCY).

Pierwszy etap metody AHP realizuje się budując drzewo hierarchii kryteriów analizy (rysunek 1). Na najwyższym poziomie hierarchii określa się cel. W tym wypadku rozwiązanie problemu niebezpiecznego skrzyżowania. Na kolejnych poziomach ustala się kryteria i podkryteria, a na końcu – dostępne warianty rozwiązań. Problem różnych grup oceniających, posiadających różne kryteria, został rozwiązany poprzez wprowadzenie tych grup jako osobnego poziomu w drzewie kryteriów (rysunek 1). W tym wypadku istnieją dwa zasadnicze podmioty analizy, czyli władze gminy (GMINA) i mieszkańcy (MIESZKAŃCY). Założono, że władze gminy są zainteresowane, aby rozwiązanie było niedrogie (EKONOMIA), technicznie proste w realizacji (PROSTOTA), oraz powinno zmniejszać niebezpieczeństwo wypadków na skrzyżowaniu (EFEKTYWNOŚĆ). Mieszkańcy natomiast uważają, że dobre rozwiązanie powinno zmniejszać niebezpieczeństwo wypadków (EFEKTYWNOŚĆ) oraz

nie zajmować terenów prywatnych sąsiadujących ze skrzyżowaniem (TERENY). Na podstawie takich założeń, przy pomocy programu HIPRE²³, zbudowano drzewo kryteriów, które przedstawia rysunek 1.



Rysunek 1. Drzewo celów z wariantami rozwiązań (ekran programu HIPRE)

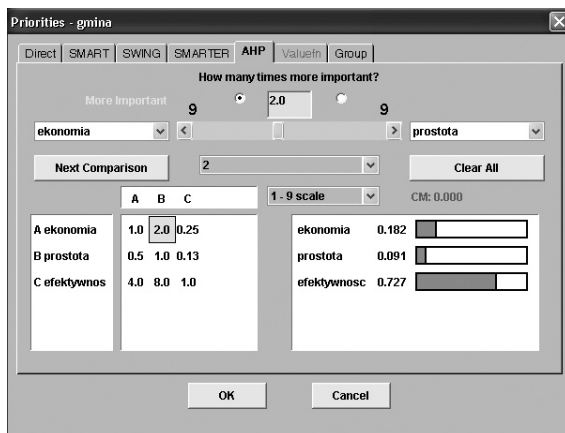
Kolejnym etapem analizy AHP jest ustalenie wag poszczególnych kryteriów. W metodzie AHP wagi ustala się poprzez porównanie poszczególnych kryteriów parami (rysunek 2). Porównuje się między sobą kryteria będące na tym samym poziomie hierarchii oraz będące uszczegółowieniem kryterium znajdującego się powyżej. Standardowa skala ocen wariantów decyzyjnych w metodzie AHP przedstawia się następująco:

- 1 – równoważność wariantów,
- 3 – umiarkowane przewyższenie pierwszego wariantu,
- 5 – silna przewaga pierwszego wariantu nad drugim,
- 7 – bardzo silna przewaga,
- 9 – krytyczna przewaga.

Porównań dokonuje się w skali od 1 do 9. Przyznanie oceny 1 oznacza, że porównywane kryteria są równie ważne, a 9 że jedno z kryteriów jest dominujące (dziewięciokrotnie ważniejsze). Oprócz tego dopuszczalne są wartości pośrednie (2,4,6,8). Jeżeli to możliwe, w pierwszej kolejności należy używać skali nieparzystej.

W analizowanym przykładzie, przy wprowadzeniu oceniających stron jako kryteriów w drzewie hierarchii celów, należy arbitralnie ustalić, jaka waga zostanie przypisana opinii władz, a jaka opinii mieszkańców gminy.

²³ Ibidem.

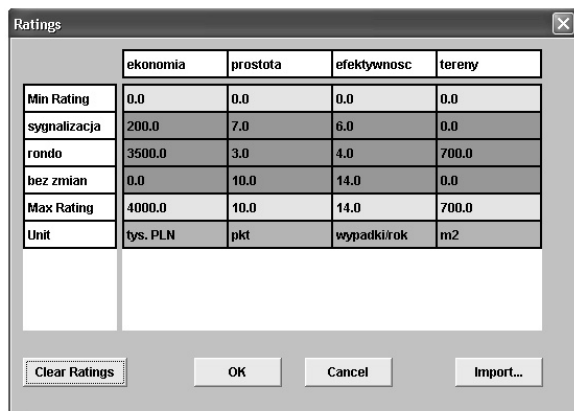


Rysunek 2. Przypisywanie wag poszczególnym kryteriom za pomocą porównywania parami (ekran programu HIPRE)

Program HIPRE umożliwia porównywanie zarówno przez wpisywanie wartości wag jak i robienie tego bardziej instynktownie za pomocą suwaka (rysunek 2). Po wypełnieniu pełnej macierzy program oblicza wagi i przedstawia je w formie graficznej, co daje użytkownikowi możliwość weryfikacji jego odczuć. Bardzo ważne jest, aby robione porównania były logiczne czyli spójne. Jeżeli kryterium B jest dwa razy ważniejsze od kryterium A, a kryterium C jest dwa razy ważniejsze od kryterium B to zgodnie z logiką należy przyjąć, że kryterium C jest czterokrotnie ważniejsze od kryterium A. Poziom takiej spójności przy podejmowaniu decyzji mierzy się za pomocą współczynnika spójności CM (z ang. *Consistency Measure*), który w wypadkach pełnej spójności ocen przyjmuje wartość zero. Dopuszcza się, aby poziom niespójności porównań był w zakresie CM od 0 do 0.1. W rzeczywistości trudno jest uzyskać taki poziom spójności, jeżeli ilość porównywanych kryteriów jest większa od czterech. Po wprowadzeniu początkowych wartości istnieje możliwość „doprecyzowania” wartości, za pomocą suwaka tak, aby współczynnik CM osiągnął zadawalającą wartość. Należy jednak pamiętać, że działania te nie mogą być na tyle inwazyjne, aby istotnie zmieniały odczucia oceniających.

W przedstawionym przykładzie wypracowanie spójnej opinii władz gminy jest łatwiejsze (ze względu na małą liczbę osób, które wchodzi w skład władz gminy) i może być osiągnięte w wyniku dyskusji. Problemem jest natomiast wypracowanie spójnej opinii mieszkańców, ponieważ różni mieszkańcy mogą mieć różne interesy, a ilość mieszkańców jest duża. Problem może być rozwiązany przez zebranie indywidualnych, ale wewnętrznie spójnych, ocen wielu mieszkańców, którzy zostaną włączeni do analizy z wagą odwrotnie proporcjonalną do ilości badanych osób. W programie HIPRE można to

zrealizować przez uruchomienie opcji modelu grupowego. W przedstawionym przykładzie założono, że mieszkańcy w drodze dyskusji wypracowali wspólną spójną opinię, której wynik został przyjęty do analizy.



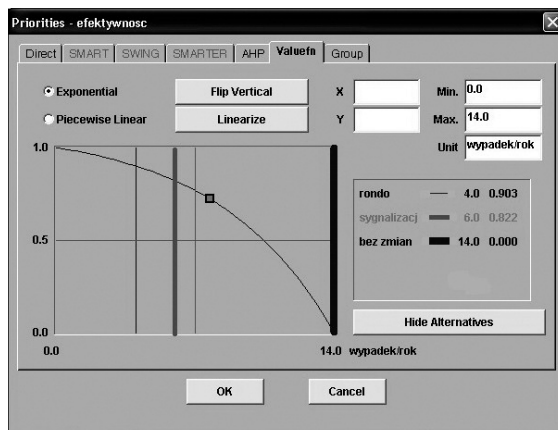
	ekonomia	prostota	efektywnosc	tereny
Min Rating	0.0	0.0	0.0	0.0
sygnalizacja	200.0	7.0	6.0	0.0
rondo	3500.0	3.0	4.0	700.0
bez zmian	0.0	10.0	14.0	0.0
Max Rating	4000.0	10.0	14.0	700.0
Unit	tys. PLN	pkt	wypadki/rok	m2

Rysunek 3. Ocena analizowanych rozwiązań przy użyciu wypracowanych kryteriów oceny (ekran programu HIPRE)

Kolejnym etapem analizy jest porównanie rozwiązań przy użyciu wypracowanych kryteriów tj. kryteriów z ostatniego poziomu analizy. Można to zrobić na dwa zasadnicze sposoby. Sposób pierwszy, klasyczny, polega na porównaniu parami w skali od 1 do 9 poszczególnych rozwiązań z punktu widzenia poszczególnych kryteriów. Jest to kontynuacja tej samej procedury, według której wyznacza się wagi poszczególnych kryteriów. W praktyce, przeprowadzenie tej procedury jest trudne, ponieważ odpowiedzenie na pytanie: „o ile, w skali od 1 do 9, z punktu widzenia wypadkowości, lepsze jest rozwiązanie A od rozwiązania B?” nie jest łatwe. W przypadku zastosowania zaproponowanej zmodyfikowanej metody AHP problem sprowadza się do bezpośredniego mierzenia poszczególnych rozwiązań za pomocą wypracowanych kryteriów, a następnie przyjęcia funkcji satysfakcji, która daje odpowiedź na ile ten poziom spełnienia danego kryterium przez analizowane rozwiązanie jest dla oceniających satysfakcjonujący (rysunek 3 i 4).

Wartości odpowiadające maksymalnemu i minimalnemu poziomowi satysfakcji mogą wynikać z norm, osobistych preferencji oceniających, ograniczeń budżetowych, standardów branżowych lub innych.

W analizowanym przykładzie oszacowano, że aktualnie wydarza się 14 wypadków rocznie. Po wybudowaniu ronda liczba wypadków powinna zmniejszyć się do 4, a po wprowadzeniu sygnalizacji świetlnej do 6 wypadków rocznie. Jednocześnie stwierdzono, że stan aktualny z uwagi na wypadkowość jest absolutnie niezadowolający (wartość zero). W pełni satysfakcjonujący



Rysunek 4. Przykładowa funkcja satysfakcji kryterium skuteczności (ekran programu HIPRE)

nujące (wartość jeden), z uwagi na wypadkowość, byłoby rozwiązanie bezwypadkowe.

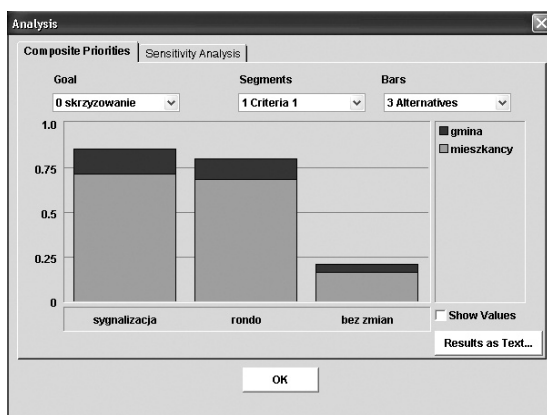
Funkcja satysfakcji łączy punkty odpowiadające minimalnej i maksymalnej dopuszczalnej wartości analizowanego kryterium, dla których poziom satysfakcji osiąga wartości ekstremalne. Przebieg krzywej satysfakcji pomiędzy punktami minimum i maksimum może mieć różny kształt, który powinien być indywidualnie dobrany przez oceniających. W analizowanym przypadku założono, że krzywa satysfakcji nie jest linią prostą i dopasowano wykres satysfakcji wg uznania oceniających (rysunek 4). W wyniku takiej analizy stwierdzono, że z punktu widzenia wypadkowości, rozwiązanie „bez zmian” satysfakcjonuje na poziomie zero, sygnalizacja świetlna na poziomie 0,822, a rondo na poziomie 0,903.

Program HIPRE umożliwia dopasowanie przebiegu funkcji satysfakcji oraz dopuszczalnych wartości minimalnych i maksymalnych do odczuć oceniającego. Jest to istotne, ponieważ analizowane kryteria mogą być zarówno opisowe (na przykład prostota rozwiązania) jak i wymierne (na przykład koszty). Dodatkowo, czasami dąży się by wartość funkcji była jak najmniejsza (EFEKTYWNOŚĆ – mierzona liczbą wypadków), a czasami dąży się by wartość danego kryterium osiągnęła wartość największą (PROSTOTA).

Ostatnim etapem analizy AHP jest obliczanie ostatecznej oceny poszczególnych rozwiązań. Ostateczna ocena jest sumą ważoną spełnienia poszczególnych kryteriów. Waha się ona od zero do jeden. W przypadku porównywania stopnia spełnienia poszczególnych rozwiązań za pomocą klasycznej metody AHP (względne porównywanie w skali od 1 do 9), ostateczna ocena jest również oceną względną, co znaczy, że suma ocen wszystkich rozwiązań wynosi 1. W przypadku zmodyfikowanej analizy AHP oceny stopnia speł-

nienia poszczególnych kryteriów poprzez analizowane rozwiązania za pomocą funkcji satysfakcji są od siebie niezależne, ocena ostateczna wariantów ma charakter obiektywny i pokazuje na ile dane rozwiązanie spełnia wymagania we wszystkich kategoriach. Jeżeli rozwiązanie spełnia całkowicie wszystkie kryteria to ocena ostateczna jest 1 i nie zależy od oceny pozostałych wariantów. Program HIPRE pokazuje zarówno całkowitą ocenę poszczególnych rozwiązań jak i jej składowe.

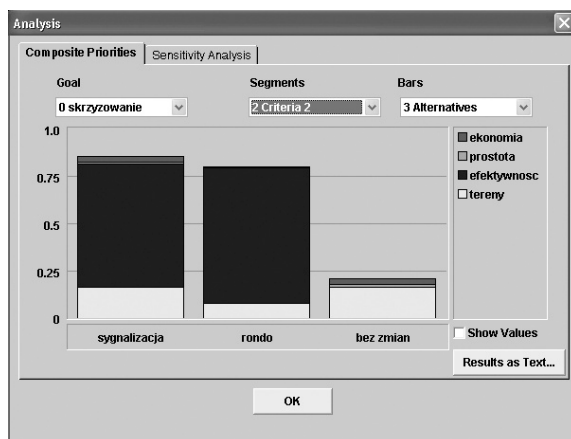
W analizowanym przykładzie rozwiązania SYGNALIZACJA i RONDO uzyskały bardzo porównywalną ocenę i okazały się zdecydowanie lepsze od stanu aktualnego. Stopień spełnienia wszystkich kryteriów obu rozwiązań jest wysoki i wynosi powyżej 80%, podczas gdy dotychczasowe rozwiązanie spełnia wszystkie kryteria jedynie na poziomie 21% (rysunki 5 i 6). Ocenę 100% uzyskuje rozwiązanie, które w 100% spełnia wszystkie kryteria, a rozwiązanie, które absolutnie nie spełnia wszystkich kryteriów uzyskuje ocenę 0%. Można powiedzieć, że zaproponowane rozwiązania są satysfakcjonujące w 80%, a dotychczasowe rozwiązanie tylko na poziomie 21%.



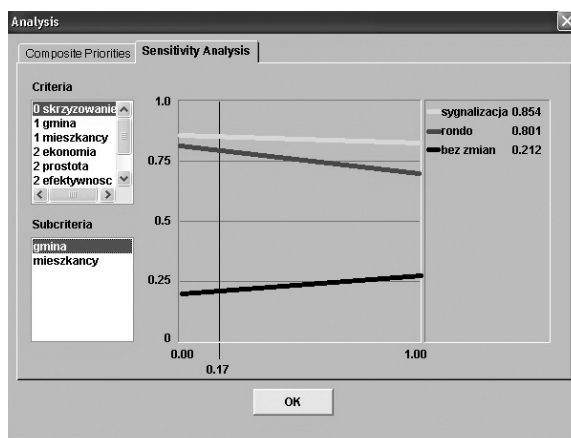
Rysunek 5. Ocenę końcowe poszczególnych rozwiązań w analizowanym przykładzie z podziałem na poszczególne poziomy kryteriów (poziom 1) (ekran programu HIPRE)

Rysunek 5 pokazuje, że decydujący wpływ na ostateczną ocenę wariantów i wybór rozwiązania ma opinia mieszkańców. Może to być spowodowane przypisaniem zbyt wielkiej wagi ich opinii.

Pełnej analizie powinna towarzyszyć analiza wrażliwości, która stara się odpowiedzieć na pytanie jak zmienią się wyniki, jeżeli ulegną zmianie dane wejściowe. Jednymi z podstawowych danych są wagi poszczególnych kryteriów. Program umożliwia śledzenie zmian wartości poszczególnych rozwiązań, gdy zmienia się jedna z wag, a pozostałe pozostają w takiej samej względnej relacji. Przykładowe wykresy dla zmiany wagi przedstawia rysunek 7 i 8.

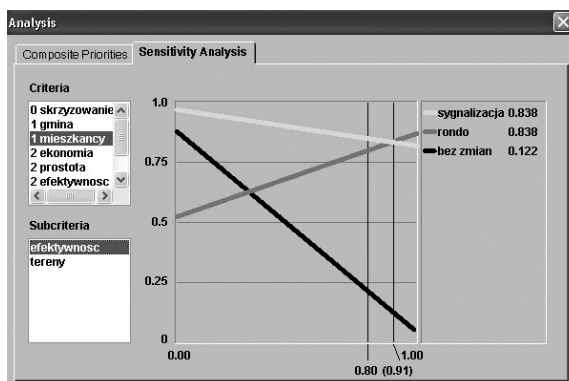


Rysunek 6. Oceny końcowe poszczególnych rozwiązań w analizowanym przykładzie z podziałem na poszczególne poziomy kryteriów (poziom 2) (ekran programu HIPRE)



Rysunek 7. Przykładowe wykresy analizy wrażliwości dla wagi kryterium GMINA (ekran programu HIPRE)

Bez względu na wagę kryterium GMINA zarówno kolejność rozwiązań jak i ich ostateczna ocena nie ulega istotnej zmianie (rysunek 7). W tym przypadku opinia władz gminy nie ma wpływu na ostateczny wybór. Powodem tego może być fakt, że zarówno GMINA jak i MIESZKAŃCY oceniają analizowane rozwiązania w podobny sposób. SYGNALIZACJA jest rozwiązaniem najlepszym i niewrażliwym na zmianę wartości wagi przyznanej kryterium GMINA.



Rysunek 8. Przykładowe wykresy analizy wrażliwości dla wagi kryterium EFEKTYWNOŚĆ (ekran programu HIPRE)

Gdyby waga kryterium EFEKTYWNOŚĆ wzrosła z dotychczasowej wartości 0,8 do wartości 0,91 to rozwiązanie RONDO okazuje się korzystniejsze (rysunek 8). Różnica bezwzględnych ocen tych dwóch wariantów nie byłaby duża, nawet jeżeli waga wynosiłaby 1. Oznacza to, że rozwiązanie SYGNALIZACJA jest najlepsze lub prawie najlepsze w całym zakresie zmiany wagi kryterium EFEKTYWNOŚĆ.

Podsumowanie

Metody wielokryterialne są wartościowym narzędziem przy podejmowaniu decyzji i ocenie różnych rozwiązań, w tym tych z zakresu inżynierii środowiska. Jedną z bardziej uniwersalnych metod wielokryterialnych jest metoda AHP. Dzięki swojej prostocie, podstawom naukowym, oraz darmowemu oprogramowaniu metoda AHP jest powszechnie stosowana. Metoda AHP posiada jednak wady takie, jak trudności ze zbudowaniem drzewa kryteriów szczególnie w sytuacji, gdy oceniający posiadają rozbieżne kryteria oceny. W metodzie AHP trudno jest również porównywać parami (w skali od 1 do 9) poszczególne rozwiązania z punktu widzenia spełnienia poszczególnych kryteriów. W artykule przedstawiono zmodyfikowaną analizę AHP, która ułatwia rozwiązanie tych problemów. Wprowadzenie oceniających do drzewa hierarchii kryteriów oraz wprowadzenie porównywania rozwiązań za pomocą funkcji satysfakcji wydaje się być pomocne. Należy jednak pamiętać, że w wyniku zaproponowanej modyfikacji otrzymane wyniki mają również inną fizyczną interpretację. O ile w klasycznej metodzie AHP suma ocen wszystkich analizowanych rozwiązań wynosi jeden, o tyle w zmodyfikowanej metodzie oceny poszczególnych rozwiązań są od siebie niezależne, a ocenę

jeden otrzymuje rozwiązanie, które spełnia wszystkie kryteria w 100%. Przedstawiony prosty, hipotetyczny przykład porównania różnych wariantów organizacji ruchu na skrzyżowaniu pokazuje zarówno możliwości zmodyfikowanej metody AHP jak i możliwości bezpłatnego oprogramowania HIPRE do rozwiązywania tego typu zagadnień wielokryterialnych.

Wkład autorów w powstanie artykułu

dr inż. Tomasz Stypka – opracowanie koncepcji i założeń artykułu, opracowanie badań, przegląd literatury (50%)

dr inż. Agnieszka Flaga-Maryńczyk – opracowanie koncepcji i założeń artykułu, opracowanie badań, przegląd literatury (50%)

Literatura

- Buchholz T., Rametsteiner E., Volk T.A., Luzadis V.A., *Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments*, "Energy Policy" 2009 nr 37, s. 484-495
- Downarowicz O., Krause J., Sikorski M., Stachowski W., *Zastosowanie metody AHP do oceny i sterowania poziomem bezpieczeństwa złożonego obiektu technicznego*, w: O. Downarowicz, *Wybrane metody ergonomii i nauki o eksploatacji*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2000
- Drużyńska E., *Metody wspomaganie wielokryterialnych wyborów w zarządzaniu zasobami wodnymi*, praca doktorska, Kraków 1997
- Figueira, J., Mousseau, V., Roy B., *ELECTRE methods, Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art surveys*, New York, 2005
- Florek-Paszowska A., Cymanow P., *Zrównoważona produkcja elementem determinującym wzrost wartości przedsiębiorstwa – analiza przy pomocy metody AHP/ANP*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego” nr 786 „Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia” 2013 nr 64/1, s. 21-31
- Hermann B.G., Kroeze C., Jawjit W., *Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators*, "Journal of Cleaner Production", 2007 nr 15, s. 1787-1796
- www.hipre.aalto.fi
- Ho W., *Integrated analytic hierarchy process and its applications – A literature review*, "European Journal of Operational Research" 2008 nr 186, s. 211-228
- Huang I.B., Keisler J., Linkov I., *Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends*, "Science of the Total Environment" 2011 nr 409, s. 3578-3594
- Ishizaka A., Labib A., *Review of the main developments in the analytic hierarchy process*, "Expert Systems with Applications" 2011 nr 38, s. 14336-14345
- Layard R., Glaister S., *Cost-Benefit Analysis*, Cambridge 1994
- Mani V., Rajat A., Sharma V., *Supplier selection using social sustainability: AHP based approach in India*, "International Strategic Management Review" 2014 nr 2, s. 98-112
- Matuszek M., *Proces wyboru dostawcy wspierający zrównoważony rozwój – identyfikacja kryteriów oceny metoda AHP (Analytic Hierarchy Process)*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria: „Organizacja i Zarządzanie” 2015 z. 78 (nr 1928), s. 263-278

- Mendoza G.A., Martins H., *Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms*, "Forest Ecology and Management" 2006 nr 230, s. 1-22
- Ogrodnik K., *Możliwość implementacji metody AHP do procedury wyboru optymalnego wariantu lokalizacyjnego zespołu elektrowni wiatrowych*, „Ekonomia i Środowisko” 2014 nr 1(48), s. 64-79
- Omkarprasad S., Vaidya, S.K., *Analytic hierarchy process: An overview of applications*, "European Journal of Operational Research" 2006 t. 169, nr 1, s. 1-29
- Piotrowski Z., *Algorytm doboru metod wielokryterialnych w środowisku niedoprecyzowana informacji preferencyjnej*, rozprawa doktorska, Szczecin 2009, s. 23-32
- Revelle C., McGarity A.E., *Design and Operation of Civil and Environmental Engineering Systems*, New York 1997
- Roy, B., *Paradigms and challenges, Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art surveys*, Springer New York, 2005, s. 3-24
- Saaty R.W., *The Analytic Hierarchy Process-What It Is And How It Is Used Mat/d Modelling*, 1987 t. 9, nr 3-5, s. 161-176.
- Saaty T.L., *Decision making with the analytic hierarchy process*, "Int. J. Services Sciences" 2008 t. 1, nr 1, s. 83-98
- Scott J.A., How W., Dey P.K., *A review of multi-criteria decision-making methods for bioenergy systems*, "Energy" 2012 nr 42, s. 146-156
- Skowron P., *Wybór klientów metodą AHP (Analytic Hierarchy Process) na przykładzie przedsiębiorstwa z branży spożywczej*, „Orientacja na klienta jako kryterium doskonałości”, Wrocław 2011, s. 532-549
- Sobczyk W., Kowalska A., Sobczyk E.J., *Wykorzystanie wielokryterialnej metody AHP i macierzy Leopolda do oceny wpływu eksploatacji złóż żwirowo-piaskowych na środowisko przyrodnicze doliny Jasiółki*, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2014 t. 30, z. 2, s.157-172
- Stypka T., Berbeka K., *Drinking Water Consumption in Cracow – an Assessment from a Sustainable Development Perspective*, "Problemy Ekorozwoju" 2014 t. 9, nr 2, s. 121-130
- Stypka T., Flaga-Maryńczyk A., *Comparative analysis of municipal solid waste systems: Cracow case study*, "Environment Protection Engineering", 2013 t. 4, s.135-153
- Stypka T., Flaga-Maryńczyk A., Schnotale J., *Developing an Environmentally sound selection method for heating appliances using ecolabeling, Analytic Hierarchy Process, and Cost-Benefit analysis: a heat pump case study*, "Polish Journal of Environmental Studies" 2015 t. 24, nr 3, s. 1327-1338
- Stypka T., *Modelowanie systemów gospodarki odpadami komunalnymi*, Kraków 2014
- Triantaphyllou E., *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, The Netherlands 2010
- Vaida O.S., Kumar S., *Analytic hierarchy process: An overview of applications*, "European Journal of Operational Research" 2006 nr 169, s. 1-29
- Woś A., *Ekonomia Odnawialnych zasobów naturalnych*, Warszawa 1995
- Zawilski M., Sakson G., *Wybór metody modernizacji systemu kanalizacyjnego przy wykorzystaniu metody AHP*, „Ekonomia i Środowisko” 2013 nr 4 (47), s. 10-23
- Zopounidis C., Pardalos P.M., *Handbook of multicriteria analysis*, Heidelberg 2012
- Żylicz T., *Ekonomia środowiska i zasobów naturalnych*, Warszawa 2004