

Comparison of AHP and Numerical Taxonomy Methods Based on Biogas Plant Location Analysis

Authors

Alicja Stoltmann
Paweł Bućko

Keywords

biogas plant, bioenergy, multicriteria analysis method

Abstract

The paper presents a comparison of the multi-criteria Analytic Hierarchy Process (AHP) method and numerical taxonomy in biogas plant location selection. Biogas plants are sources that will significantly contribute to the implementation of the provisions of the energy and climate package for Poland by 2030. Increasing the share of energy produced from renewable sources, e.g. biogas plants, will increase the country's energy security. Biogas plants obtain energy from biogas of various origins. Therefore, biogas plant location choice depends on such factors as environmental impact, biogas availability and origin, technological aspects, and possible output energy use. The multitude of these factors makes the biogas plant location choice a multithreaded issue. The AHP is a highly sophisticated mathematical method. Its advantage is the ability to compare countable and uncountable factors with each other. The analysis outcome is a vector containing the ranking of considered variants. The numerical taxonomy is a much less complex method. It consists in determining the tested solutions' distances from a hypothetical ideal solution, the so-called standard, in effect creating their ranking. The methods were compared in terms of sensitivity to change of decision options and criteria, decision-makers' and experts' involvement level, as well as computational complexity.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2018204

Received: 14.03.2017

Accepted: 10.07.2017

Available online: 8.02.2019

1. Introduction

Poland, as a Member States of the European Union, is obliged to meet the energy policy requirements aimed at reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere. Therefore, the energy sector development strategy contained in the document *Energy Policy of Poland until 2030* [1] has been defined. The document assumes that the renewable energy sources (RES) share in the total energy mix will amount to 15% by 2020. Investment in RES is beneficial in economic and environmental terms alike [2]. The Act of 10 April 1997 *The Energy Law* defines RES as such that exploits in the conversion process the energy of wind, solar radiation, geothermal, waves, sea currents and tidal flows, river drop, and the energy procured from biomass, landfill biogas, as well as biogas produced in the processes of sewage disposal and treatment or decomposition of plant and animal debris deposits [3]. Due to its special conditions, Poland may become a leader among EU countries in the production of energy from biogas plants, in

particular from biogas plants producing energy from agricultural substrates [4], i.e. from agricultural raw materials, agricultural by-products, by-products and residues from the agricultural and food industry, and from forest biomass [5]. It should be noted that by 2012 nearly 55% of the total energy output from RES was generated by using biomass in energy production (in complete incineration and co-incineration processes) [6]. Biogas plants are among sources of distributed electricity and heat generation [7]. Currently, many research centres in Poland are involved in research od effective methods of obtaining, enriching and using biogas [8]. Biogas is used to produce electricity, heat, and cold, and to produce biomethane fed into gas network or to drive vehicles.

In Poland, as a result of the introduction of a support system for installations using renewable energy sources, including biogas, the capacity installed in biogas plants in 2006–2016 features an upward trend. This is shown in Fig. 1.

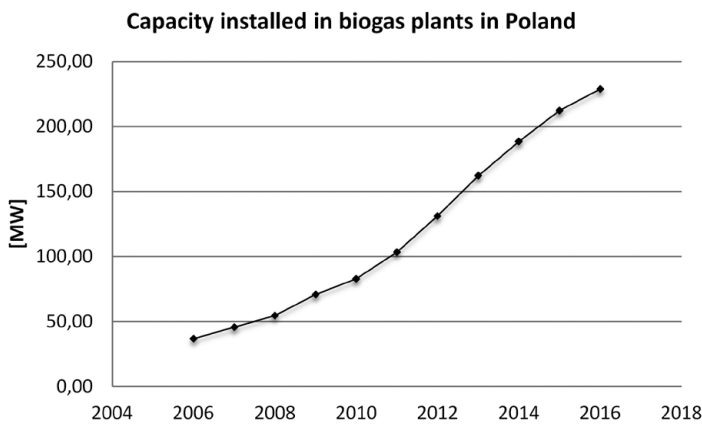


Fig. 1. Capacity installed in biogas plants in 2006–2016, according to ERO [9]

Breakdown of electricity output from RES in 2016

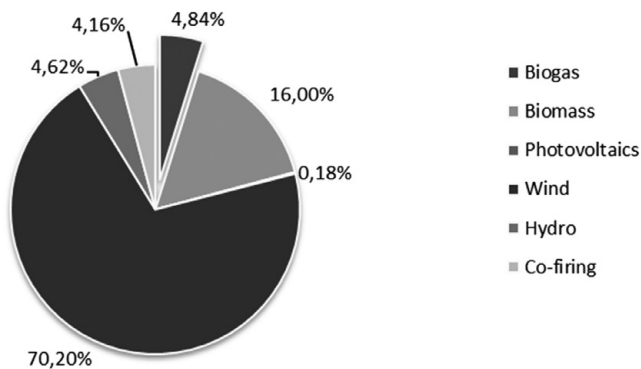


Fig. 2. Breakdown of electricity output from RES in 2016 in Poland, according to ERO [10]

Despite the increase in generators' interest in energy generated in biogas plants, in 2016 it accounted for only 5% of the total electricity production from RES sources (Fig. 2).

The biogas plant characteristics are determined at the investment stage due to the need to meet urban planning requirements. During a biogas plant's construction and operation many environmental protection-related legal and administrative requirements must be met.

It is also necessary to determine the target location of plant facilities, planned capacity and technology, as well as the heat output management methods. Requirements for the raw material to be processed in the bio-fermentation process relate to its quantity, type, costs and logistics of deliveries, as well as the digestate management options. It is assumed that due to transport costs, a biomass source should be located within 20 km distance from the biogas plant [11]. The threat to a biogas plant development project may be the lack of appropriate land reserve, lack of social acceptance, the possible occurrence of excessive odour nuisances, and the occurrence of the project development's conflict with areas of landscape and tourist merit. Therefore, a biogas plant development project should be preceded by a

thorough analysis of the conditions necessary to meet during the pre-development, construction, and operation phases. These conditions, otherwise referred to as criteria, are related to environmental, economic, technical, legal and social requirements [12]. A tool for concurrent consideration of many, often contradictory or mutually exclusive requirements, are multi-criteria decision analysis (MCDA) methods. MCDA methods include the analytic hierarchy process (AHP), and the numerical taxonomy method. This study compares both methods on the biogas plant location choice example.

2. Literature review

The choice of biogas plant type, size, and location has been addressed in the literature. In [13] the model course of investor proceedings during an agricultural biogas plant development was characterized. It was noted that there is no unified course of investor proceedings in Poland and it depends on individual projects. In [14] various types and sizes of agricultural biogas plants were compared in terms of biogas production profitability. It was pointed out that there is no economic justification for the development of a new biogas plant in commercial conditions, and that external funding is needed to extent of 60–70% in order to improve the project profitability. In [15] several options were compared of the transport and logistics of animal waste and biomass used for biogas production. They were compared by methods of single-criterion optimization of each parameter (operational, economic, and energy profitability). Due to the complex nature of the electricity and heat generation source location problem, analysts employ multi-criteria analysis methods in search of the best solution to a given problem. For example, the multi-criteria PROMETHEE [16] and VIKOR [17] methods were used to determine the best RES development scenario. The effect of the analysis is the selection of scenarios that assume a significant share of energy from biogas and biomass. In [18], the ELECTRE TRI method was used to compare the performance of 41 agricultural biogas plants. In [19] the MAGBETH method and the fuzzy AHP method were used to create a hierarchy of 15 criteria influencing RES source location, including biomass, and a ranking of electricity sources that indicated that for Turkey the sources were ranked equal by both methods. In [20] the multi-criteria Monte Carlo method was used to rank RES sources in the generation sector in Scotland. It can be concluded from this literature review that the multi-criteria analysis methods have been used for analyses related to the use of biogas in the generation sector.

3. Description of methods

The compared (AHP and numerical taxonomy) methods are ranking methods, i.e. such that present the analysis results in the form of ranking of the considered decision-making options. The AHP method is based on the comparison of criteria in pairs according to a 9-step comparison scale, while the numerical taxonomy method uses the distance from the ideal solution, the so-called standard. The main assumptions of both methods are summarized below.

4. AHP method

In order to solve multi-criteria problems in many areas, such as political science, sociology, management or capex project assessment, analysts most often use the AHP method developed by TL. Saaty in 1980 [21]. The method's main assumption is to compare in pairs criteria and decision options on the basis of a 9-step comparison scale, in which the decision-maker's preferences correspond to specific numerical values [21]. The decision maker in the pairwise comparison process is a person who, depending on the issue assessed, is an expert in the respective field or belongs to a group of stakeholders or investors.

Decision options, criteria, and the main goal alike are arranged in a hierarchical structure [22]. The comparisons are arranged in a pairwise comparison matrix (\mathbf{A}), which consists of n ones placed on the main diagonal. The comparison is made by indicating the effect of the elements in the left side of the matrix (i) on the elements on the top of the matrix (j), to obtain the comparison result a_{ij} . Below the main diagonal there are inverse comparisons in pairs, this means that the i -th row is the inverse of the j -th column. The formula for matrix \mathbf{A} is presented below:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

The matrix \mathbf{A} eigenvector components determine the vector of criteria priorities (\mathbf{w}) due to the main goal accomplishment:

$$\mathbf{w} = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij} \quad (2)$$

The AHP method's advantage is its ability to determine consistency and coherence of pairwise comparisons [23], by determining CR consistency ratio. In order to recognize the results as consistent, the CR may not exceed 0.10, otherwise, the comparison shall be deemed inconsistent [24]. In addition, the use of the 9-step pairwise comparison scale allows for ranking the criteria and decision options in terms of quality and quantity.

5. Numerical taxonomy method

Numerical taxonomy has been derived from biological sciences, where it was used to classify living organisms based on their characteristics. It is used to describe economic and natural phenomena, and allows to establish relations between the examined objects, reducing the excess of information and organizing them [25]. Taxonomy tasks may lead to sorting, grouping or selecting, e.g. objects [26]. The method's basis is the creation of data matrix \mathbf{X} , that contains a set of objects $\mathbf{O} = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ (locations) and a set of features $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ (criteria). Matrix \mathbf{X} is presented below:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & \cdots & X_m & o_1 \\ x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,m} & o_2 \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,m} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,m} & o_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

where: X_{ij} – elements of data matrix \mathbf{X} , value of the X_j -th feature of the o_i -th object ($i = 1, \dots, n$ and $j = 1, \dots, m$).

To rank the objects, the features must be standardised, so that they are comparable with each other, and give them weights to obtain a hierarchy of the features' importance. In ranking methods, the features must also be transformed, so that they are all stimulants. The next step is to determine a matrix of the objects' distances from the so-called standard object by means of orthogonal projection of the point to the straight line defined by the standard coordinates.

6. Biogas plant location conditions

The biogas plant location selection determines the success of the project investment and its economic viability. For the purposes of this analysis, 8 location assessment criteria were adopted. Criterion K1 was related to the availability and procurement terms and conditions of raw materials from which the biogas is produced. Criteria K2 and K3 were related, successively, to the access to a medium voltage power grid and to a heating network. Criterion K4 concerned the completeness of planning documents related to the biogas plant site, the biogas plant's inclusion in the local zoning plan, and the availability of rights to erect the facility on the site. The biogas plant distance from areas exposed to noise, odour nuisance hazard and water protection areas were included in criterion K5. The distance from a digestate residue management site was included in criterion K6. The last two criteria, K7 and K8, related to the plants' annual capacity for electricity and heat generation. Subject to the analysis were three potential locations of the agricultural biogas plants, whose characteristics in relation to the criteria are presented in Tab. 1.

7. Results of the multi-criteria analysis

As mentioned in the chapter describing the discussed multi-criteria analysis methods, the first step in order to rank the locations is to select criteria and set their hierarchy. The biogas plant location selection criteria are classified differently for the AHP and numerical taxonomy methods. The AHP method showed that the most important criterion is the biogas plant's smallest distance from areas exposed to noise, odour nuisance and water protection areas, while the numerical taxonomy method showed that the most important criterion is the access to a heating network. In fact, close proximity to a heating network is not a criterion of a biogas plant development project's success. Also, as regards criteria with the least impact on the biogas plant location decision, the methods' indications differed. For the AHP method, the criterion of the distance from a digestate residue management site was the least influential, while for the numerical taxonomy method the plant performance indices proved to be the least influential. These differences are shown in Fig. 3.

In the AHP method the criteria are weighted by their pairwise comparison. As mentioned, the AHP method can determine CR consistency ratio, which in this case was 0.093 (below 0.1) meaning that the pairwise comparison was consistent and coherent. The numerical taxonomy cannot objectively verify the results' consistency. Regardless of the difference in the set criteria weights, both methods indicated that the preferred location

Criterion No.	Location 1	Location 2	Location 3
K1	full access	need for additional 30% of substrate	need for 100% of substrate
K2	up to 5 km	5–10 km	up to 2 km
K3	above 5 km	none	above 10 km
K4	complete documentation	complete documentation	preliminary contract concluded with plot owner
K5	0.5 km	above 1 km	100 m
K6	up to 1 km	above 1 km	above 5 km
K7	10,000 MW	7,876.116 MW	9,000 MW
K8	9,600 MW	8,199.36 MW	9,300 MW

Tab. 1. Location characteristics in relation to criteria

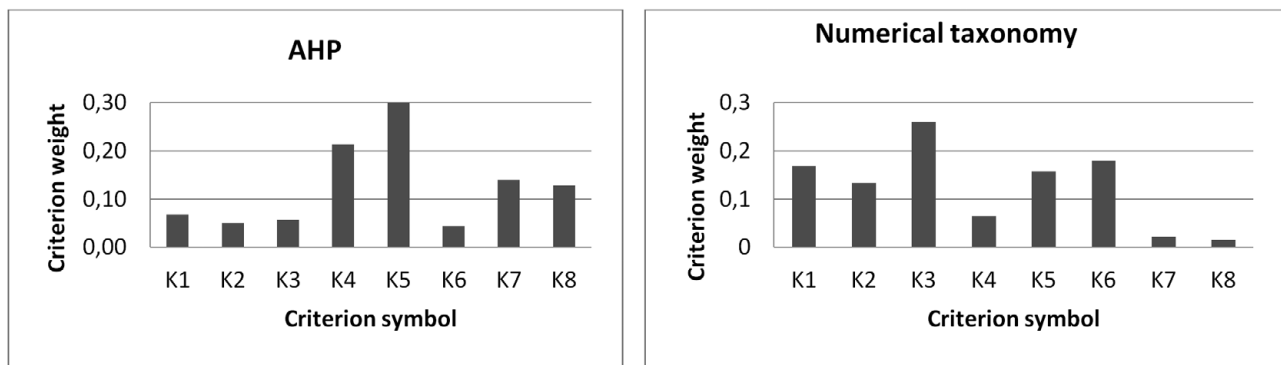


Fig. 3. Weighting of biogas plant location criteria

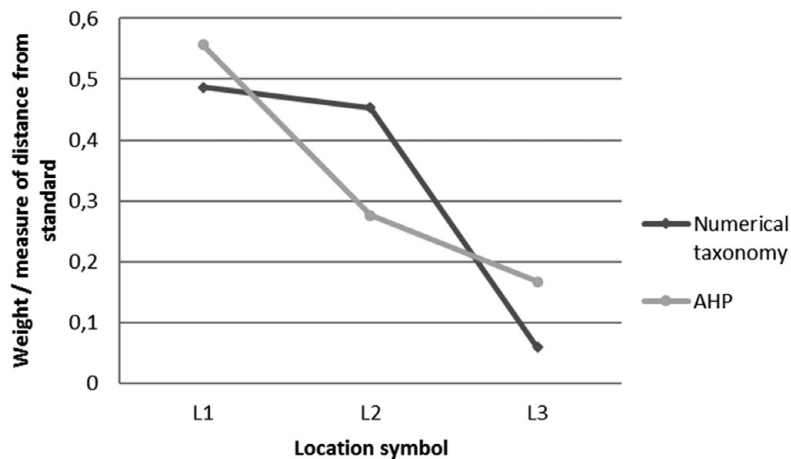


Fig. 4. Location ranking by AHP and numerical taxonomy methods

is location 1, as shown in Fig. 4. In the AHP method, the difference in the assessment between location L1 and the second in the ranking location L2 is larger than in the numerical taxonomy method. The order of the options is the same.

8. Comparison of methods

In order to compare the AHP and numerical taxonomy methods, the three areas on the basis of which the comparison was made were specified. The first of these was the method's sensitivity to changes in the number of decision options and criteria. Sensitivity analysis allows to check the impact of changes in

the number of criteria on the selection of especially important criteria, and of changes in the number of decision options on the location ranking. In order to test the sensitivity of both methods to changes in the number of criteria, the biogas plant location ranking was re-analysed under the following assumptions:

- criteria K2 and K3 are replaced with criterion K2* denoting access to a medium voltage power grid and a heating network alike
- criteria K7 and K8 are replaced by criterion K7* denoting the plant's annual aggregate capacity of electricity and heat generation.

Method	AHP	Numerical taxonomy
Biogas plant location ranking	L1 -> L4 -> L2 -> L3	L1 -> L2 -> L4 -> L3

Tab. 2. Analysis result of the AHP and numerical taxonomy methods' sensitivity to changes in the number of decision options

It has been shown that in the AHP method, the reduction of the number of criteria (including similar features) does not affect the final ranking of the criteria. However, the individual criteria weights change. In the numerical taxonomy, the reduction of the same criteria caused a significant change in their ranking, indicating criterion K6 (distance from a digestate residue management site) as the most important (Fig. 5).

In neither method, the change in the number and weights of the criteria affected the location ranking.

In order to test the methods' sensitivity to changes in the number of options, an additional, fourth, biogas plant location was added. The proposed biogas plant was located more than 10 km from a medium voltage power grid and within 5 km from a heating network. Additional 60% of silage should be purchased in the production process. Areas sensitive due to noise, hygiene rules and/or water protection were situated more than 1 km away. The biogas plant expected capacity was ca. 8,500 MWe and 8,750 MWt.

As a result of the repeated analysis, it was shown that neither method was sensitive to the addition of an additional decision option in the form of the fourth biogas plant location. This meant that the ranking of the first three locations remained unchanged. The results are presented in Tab. 2. It is worth noting that in the AHP method, the added option L4 was rated higher than L2 (unlike in the numerical taxonomy).

The second area, in respect of which the methods were compared, was the degree of decision-makers' and experts' involvement. AHP takes into account the decision-maker's preferences, which may lead to subjectivisation of results. Choosing the right person for the decision maker position in the multi-criteria analysis process is of great importance for the correctness of the analysis results. When the decision-maker's preferences differ from the company's priorities, due

to the decision-maker's incompetence, he or she should be trained or replaced [27]. The numerical taxonomy method also requires location-related information collection, although the collected information can be analysed by an analyst, without the participation of an expert, because the expertise is not required in the analysis process.

The AHP and numerical taxonomy methods differ also in terms of computational complexity. This is the third area in respect of which the methods were compared. Multi-criteria analysis by the AHP and numerical taxonomy methods may be done using an off-the-shelf software (e.g. AHP-based Expert Choice [28] or numerical taxonomy-based Taksonomia [25]) or using a calculation sheet. For the purpose of this study, the biogas plant location was analysed in an MS Excel spreadsheet. It was noted that the biogas plant location analysis by either AHP or numerical taxonomy features a similar degree of computational complexity. However, in these authors' subjective assessment, the tests of the methods' sensitivity to changes in the number of criteria and decision option by the numerical taxonomy method was less time-consuming than by the AHP method, which required repeating the whole analysis process.

9. Summary

This paper demonstrates that the biogas plant location analysis by the AHP and the numerical taxonomy method results in the same ranking of the analysed locations, with different weights of the decision criteria. With its ability to determine the ratio of pairwise comparisons' consistency and coherence, the criteria ranking resulting from the AHP method was in line with the authors' predictions based on their experience. The numerical taxonomy method indicated the criterion of the biogas plant distance from a heating network as strategic for the project implementation, which in the authors' opinion is not consistent with reality. The paper also presents an analysis of both methods' sensitivity to changes in the number of criteria and decision options. In the AHP method, after reducing the number of criteria, the same criterion was indicated as that of the greatest impact on the biogas plant location selection. The numerical taxonomy method, after the same reduction of criteria as in the AHP method, indicated that the criterion, which previously had a small impact on the project implementation, turned out

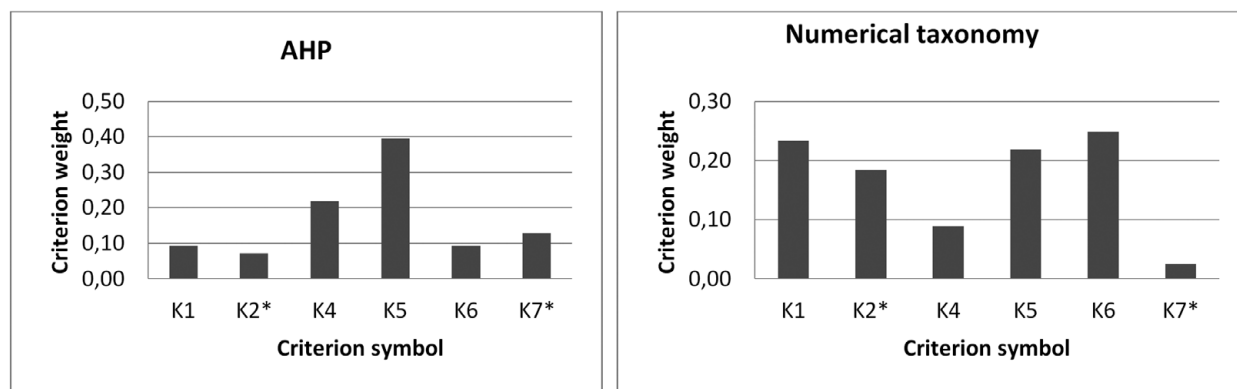


Fig. 5. Criteria weighting results for the analysis of the methods' sensitivity to changes in the number of criteria

to have the greatest impact. For this reason, the numerical taxonomy method proved to be sensitive to a change in the number of criteria.

The methods were also compared in terms of the degree of decision-makers' and experts' involvement in the biogas plant location analysing process. It was shown that in the AHP method, the decision-makers' and experts' participation is crucial, whereas in the numerical taxonomy method an analyst, after gathering the necessary information would need no expert knowledge.

The paper also characterizes the degree of computational complexity of both methods, indicating the AHP method as the one with the greater degree of time-consuming and computational complexity.

REFERENCES

1. The Ministry of Economy, Polityka energetyczna Polski do 2030 roku [Polish Energy Policy until 2030], Annex to Resolution No. 202/2009 of the Council of Ministers of November 10, 2009, 2009.
2. Woźniak E., Występowanie elektrowni biogazowych w Polsce i czynniki ich lokalizacji [The occurrence of biogas power plants in Poland and their location factors], 2015 [online], <http://www.eko-dok.pl/2016/128.pdf> [access: 02.05.2017].
3. The Act of 10 April 1997, the Energy Law, Journal of Laws of 2006 No. 89, item 625 with later amendments.
4. Jasiulewicz M., Janiszewska D., Potencjał biomasy województwa zachodniopomorskiego w aspekcie wykorzystania do celów energetycznych [Biomass potential of the West Pomeranian Voivodeship in view of the use for energy generation], *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie Problemy Rolnictwa Światowego*, Vol. 12, book 1, 2012, pp. 83–93.
5. Piwowar A., Biogazownie rolnicze w Polsce – lokalizacja i parametry techniczne instalacji [Agricultural biogas plants in Poland – locations and technical parameters of installation], *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna*, No. 6, 2014, pp. 7–9.
6. Miller A., Analiza świadectw pochodzenia energii elektrycznej z odnawialnych źródeł na przełomie lat 2005–2014 [Analysis of certificates of origin of electricity from renewable sources at the turn of 2005–2014] [in:] *Globalizacja i regionalizacja w ochronie środowiska*, edited by: T. Noch, J. Sączuk, A. Wesołowska, Wydawnictwo Gdańskiej Szkoły Wyższej, Gdańsk 2014.
7. Paska J., Distributed generation and renewable energy sources in Poland, 9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation, 2007, pp. 1–6.
8. Iglński B. et al., Bioenergy in Poland, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 6, 2011, pp. 2999–3007.
9. URE Energy Regulatory Office, Moc zainstalowana OZE 2016 [RES installed capacity 2016], 2016.
10. Energy Regulatory Office, Ilość energii elektrycznej wytworzonej z OZE w latach 2005–2016, potwierdzonej świadectwami pochodzenia, wydanymi do dnia 30.06.2016 [Electricity output from RES in 2005–2016, as documented by certificates of origin issued until 30.06.2016], 2016.
11. Zarębski P., Uwarunkowania przestrzenne lokalizacji biogazowni w Polsce [Spatial conditions of biogas plant locations in Poland], *Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, Vol. 16, No. 3, 2013, pp. 331–336.
12. Franc-Dąbrowska J., Jarka S., Specyficzne uwarunkowania inwestycji w biogazownie rolnicze w Polsce [Specific conditions for investments in agricultural biogas plants in Poland], *Roczniki Ekonomii Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich*, Vol. 101, No. 4, 2014, pp. 19–28.
13. Maj G., Piekarski W., Modelowy tok postępowania inwestycyjnego jako element prawidłowego zarządzania projektem budowy biogazowni rolniczej [Model course of investment proceedings as an element of proper management of agricultural biogas plant development projects] [in:] *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, Vol. I, edited by R. Knosala, Opole 2014, pp. 867–878.
14. Kosewska K., Kamiński R., Analiza ekonomiczna budowy i eksploatacji biogazowni rolniczych w Polsce [Economic analysis of construction and operation of agricultural biogas plants in Poland], *Inżynieria Rolnicza*, No. 1(99), 2008, pp. 189–194.
15. Berruto R. et al., Comparison of distribution systems for biogas plant residual, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 52, 2013, pp. 139–150.
16. Madlener R., Kowalski K., Stagl S., New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: The case of renewable energy use in Austria, *Energy Policy*, Vol. 35, No. 12, 2007, pp. 6060–6074.
17. Cristobal San J.R., Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 2, 2011, pp. 498–502.
18. Madlener R., Antunes C.H., Dias L.C., Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis, *European Journal of Operational Research*, Vol. 197, No. 3, 2009, pp. 1084–1094.
19. Ertay T., Kahraman C., Kaya I., Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multi-criteria methods: the case of Turkey, *Technological and Economic Development of Economy*, Vol. 19, No. 1, 2013, pp. 38–62.
20. Troldborg M., Heslop S., Hough R.L., Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 39, 2014, pp. 1173–1184.
21. Saaty T.L., Vargas, L.G., Dellmann K., The allocation of intangible resources: The analytic hierarchy process and linear programming, *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 37, 2003, pp. 169–184.
22. Downarowicz O. et al., Zastosowanie metody ahp do oceny i sterowania poziomem bezpieczeństwa złożonego obiektu technicznego [Application of the ahp method to assess and control the safety level of a complex technical facility], Gdańsk University of Technology, 2000.
23. Srichetta P., Thurachon W., Applying Fuzzy Analytic Hierarchy Process to Evaluate and Select Product of Notebook Computers, *International Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 2, No. 2, 2012, pp. 168–173.
24. Prusak A., Stefanów P., Gardian M., Graficzna forma kwestionariusza w badaniach AHP/ANP [Graphic form of the questionnaire in AHP / ANP research], *Modern Management Review*, Vol. 34, No. 20, 2013, pp. 171–189.

25. Kolenda M., Taksonomia numeryczna. Klasyfikacja, porządkowanie i analiza obiektów wielocechowych [Numerical taxonomy. Classification, ranking and analysis of multi-feature objects], University of Economics in Wrocław, 2006.
26. Czermińska M., Zastosowanie metod taksonomicznych w klasyfikacji krajów Unii Europejskiej z punktu widzenia poziomu ich rozwoju gospodarczego [Application of taxonomic methods in the classification of European Union countries with regard to their economic development], *Zeszyty Naukowe Akademii Ekonomicznej w Krakowie*, Vol. 575, No. 284, 2002, pp. 149–161.
27. Walentynowicz P., Jankowska-Mihułowicz M., Wykorzystanie analizy wielokryterialnej w podejmowaniu decyzji kierowniczych, w przedsiębiorstwach województwa pomorskiego [The use of multi-criteria analysis in making managerial decisions in enterprises in the Pomeranian Voivodeship], *Zarządzanie i Finanse*, Vol. 2, No. 1, 2012, pp. 205–221.
28. Sikorski M., Instrukcja do programu Expert Choice v.9.5 [Operating manual for Expert Choice v.9.5 software], *Gdańsk University of Technology*, 2000.

Alicja Stoltmann

Gdańsk University of Technology

email: alicja.stoltmann@pg.gda.pl

Dr. Stoltmann works at the Power Engineering Department of Gdańsk University of Technology. She defended her doctoral thesis on multi-criteria methods of investments profitability analysis in the energy sector. Her research interests also include modelling power systems of steam and gas power plants in the GateCycle environment.

Paweł Bućko

Gdańsk University of Technology

email: pawel.bucko@pg.gda.pl

Prof. Bućko works at the Power Engineering Department of Gdańsk University of Technology. His scientific activity is associated with the power sector's economics with special focus on the issues of power system development planning in market conditions. His professional activity is focused on capital expenditure analysis for renewable generation sources, and on analysis of market mechanisms and settlement of accounts principles in electricity supply. He is also an energy auditor and deals with the issues of rational energy usage.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 45–51. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Porównanie metod AHP i taksonomii numerycznej na podstawie analizy lokalizacji biogazowni

Autorzy

Alicja Stoltmann
Paweł Bućko

Słowa kluczowe

biogazownia, bioenergetyka, metody analizy wielokryterialnej

Streszczenie

Artykuł przedstawia porównanie wielokryterialnej metody analytic hierarchy proces (AHP) oraz taksonomii numerycznej w przypadku wyboru lokalizacji biogazowni. Biogazownie należy zaliczyć do źródeł, które w znaczny sposób przyczynią się do realizacji postanowień pakietu energetyczno-klimatycznego dla Polski do 2030 roku. Zwiększenie udziału produkcji energii pochodzącej z OZE, np. biogazowni, spowoduje wzrost bezpieczeństwa energetycznego kraju. Biogazownie pozyskują energię pochodzącą z biogazu różnego pochodzenia. Dlatego też na lokalizację biogazowni wpływają takie czynniki, jak: oddziaływanie na środowisko, dostępność oraz pochodzenie biogazu, aspekty technologiczne, możliwość wykorzystania wyprodukowanej energii. Mnogość wymienionych czynników czyni kwestię lokalizacji biogazowni zagadnieniem wielowarunkowym. Metoda AHP jest metodą matematyczną o dużym stopniu zaawansowania. Zaletą metody jest możliwość porównania ze sobą czynników policzalnych oraz niepoliczalnych. Efektem analizy jest wyznaczenie wektora zawierającego uszeregowanie rozpatrywanych wariantów. Metoda taksonomii numerycznej jest metodą o znacznie mniejszym stopniu skomplikowania. Polega na wyznaczeniu odległości badanych rozwiązań od hipotetycznego rozwiązania idealnego, tzw. wzorca, w efekcie tworząc ranking rozwiązań. Metody porównano pod względem wrażliwości na zmianę wariantów decyzyjnych i kryteriów, stopnia zaangażowania decydentów i ekspertów oraz złożoności obliczeniowej.

Data wpływu do redakcji: 14.03.2017

Data akceptacji artykułu: 10.07.2017

Data publikacji online: 8.02.2019

1. Wprowadzenie

Polska, jako jeden z krajów członkowskich Unii Europejskiej, zobowiązana jest do spełnienia wymagań polityki energetycznej mającej na celu redukcję emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. W związku z tym określono strategię rozwoju sektora energetycznego zawartą w dokumencie *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku* [1]. W dokumencie założono, że udział odnawialnych źródeł energii (OZE) w całkowitej produkcji energii będzie wynosić 15% do 2020 roku. Inwestycje w OZE przyniosą korzyści zarówno gospodarce, jak i środowiskowe [2]. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 roku *Prawo energetyczne* definiuje OZE jako takie, które wykorzystuje w procesie przetwarzania energię wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy, biogazu wysypiskowego, a także biogazu powstałego w procesach odprowadzania lub oczyszczania ścieków albo rozkładu składowanych szczątków roślinnych i zwierzęcych [3]. Ze względu na szczególne uwarunkowania Polska spośród państw UE może stać się liderem w produkcji energii pochodzącej z biogazowni, w szczególności z biogazowni produkującej energię z substratów rolniczych [4], tzn. z surowców rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, produktów ubocznych i pozostałości przemysłu rolno-spożywczego oraz biomasy leśnej [5]. Należy zauważyć, że do 2012 roku blisko 55% całkowitej produkcji energii pochodzącej z OZE wytwarzane było przez przedsiębiorstwa wykorzystujące biomasę

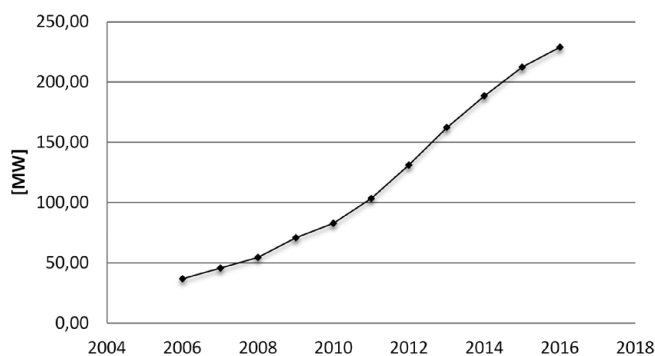
przy produkcji energii (w procesach spalania całkowitego oraz współspalania) [6]. Biogazownie zaliczane są do źródeł generacji rozproszonej energii elektrycznej i ciepła [7]. Obecnie wiele ośrodków badawczych w Polsce zajmuje się badaniami nad skutecznymi sposobami uzyskiwania, wzbogacania i wykorzystywania biogazu [8]. Biogaz wykorzystywany jest do produkcji energii elektrycznej, ciepła, chłodu, do produkcji biometanu wprowadzanego do sieci gazowej lub do napędu pojazdów. W Polsce, w wyniku wprowadzenia systemu wsparcia dla instalacji wykorzystujących odnawialne źródła energii, w tym biogaz, moc zainstalowana w instalacjach biogazowych w latach 2006–2016 charakteryzuje

się tendencją wzrostową. Przedstawiono to na rys. 1.

Pomimo wzrostu zainteresowania wytwórców energią wytwarzaną w instalacjach wykorzystujących biogaz, stanowił on w 2016 roku zaledwie 5% całkowitej produkcji energii elektrycznej pochodzącej z instalacji zaliczanych do odnawialnych źródeł energii (rys. 2).

Charakter biogazowni ustalany jest na etapie inwestycyjnym ze względu na konieczność spełnienia wymagań urbanistycznych. W trakcie budowy i eksploatacji biogazowni należy spełniać wiele wymogów prawnych i administracyjnych związanych z ochroną środowiska. Niezbędne jest także określenie docelowej lokalizacji obiektów, planowanej

Moc zainstalowana w instalacjach biogazowych w Polsce

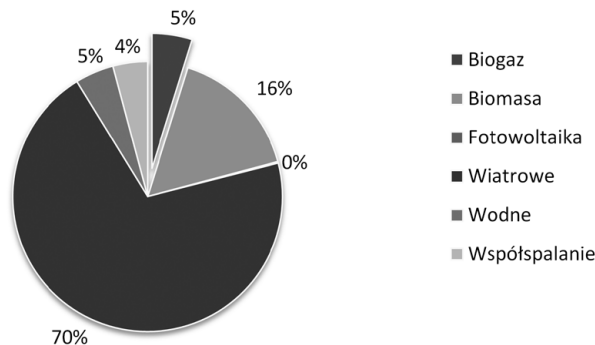


Rys. 1. Moc zainstalowana w instalacjach biogazowych w latach 2006–2016 wg danych URE [9]

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 45–51. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Struktura produkcji energii elektrycznej z instalacji OZE w 2016 r.



Rys. 2. Struktura produkcji energii elektrycznej z instalacji OZE w 2016 roku w Polsce, wg danych URE [10]

mocy i technologii instalacji oraz sposobów zagospodarowania wyprodukowanego ciepła. Wymagania dotyczące surowca do przetworzenia w procesie biofermentacji dotyczą ilości, rodzaju, kosztów oraz logistyki dostaw, a także możliwości zagospodarowania masy pofermentacyjnej. Zakłada się, że ze względu na koszty transportu źródło biomasy nie powinno być położone w większej odległości niż 20 km od biogazowni [11]. Zagrożeniem dla inwestycji w biogazownię może być brak stosownej rezerwy terenu, brak akceptacji społecznej oraz problem z występowaniem ewentualnych, ponadnormatywnych uciążliwości zapachowych oraz wystąpienie konfliktu inwestycji z terenami o walorach krajobrazowych i turystycznych. Dlatego też proces inwestycyjny biogazowni powinien być poprzedzony dokładną analizą warunków koniecznych do spełnienia w trakcie trwania fazy inwestycyjnej, fazy budowy oraz fazy eksploatacyjnej. Warunki te, inaczej określane jako kryteria, związane są z wymaganiami środowiskowymi, ekonomicznymi, technicznymi, prawnymi oraz społecznymi [12]. Narzędziem pozwalającym na uwzględnienie jednocześnie wielu, często sprzecznych lub wzajemnie wykluczających się wymagań są metody analizy wielokryterialnej (ang. *multi-criteria decision analysis* – MCDA). Wśród metod MCDA należy wyróżnić metodę analizy hierarchicznej (ang. *analytic hierarchy proces* – AHP) oraz metodę taksonomii numerycznej. W niniejszym opracowaniu dokonano porównania obu metod na przykładzie lokalizacji biogazowni.

2. Przegląd literatury

Wybór typu, wielkości oraz lokalizacji biogazowni jest tematem podejmowanym w literaturze. W [13] scharakteryzowano modelowy tok postępowania inwestorskiego podczas biogazowni rolniczej. Zauważono, że w Polsce nie występuje ujednolicony tok postępowania inwestorskiego i zależy on indywidualnie od danego projektu. W [14] dokonano porównania różnych typów oraz rozmiarów biogazowni rolniczych pod względem opłacalności wytwarzania biogazu. Zwrócono uwagę na brak ekonomicznego uzasadnienia budowy nowej

instalacji biogazowej w warunkach komercyjnych oraz na konieczność skorzystania z dofinansowania z zewnętrznego źródła finansowania na poziomie 60–70% w celu poprawy opłacalności inwestycji. W [15] przedstawiono porównanie kilku konfiguracji transportu i logistyki odpadów zwierzęcych oraz biomasy wykorzystywanej do produkcji biogazu. Porównania dokonano za pomocą metod optymalizacji jednokryterialnych każdego z parametrów (rentowności operacyjnej, gospodarczej i energetycznej). Ze względu na złożony charakter zagadnienia lokalizacyjnego źródeł wytwórczych energii elektrycznej i ciepła analitycy wspomagają się metodami analizy wielokryterialnej w poszukiwaniu najlepszego rozwiązania danego problemu. Na przykład wielokryterialne metody PROMETHEE [16] i VIKOR [17] wykorzystano do wyznaczenia najlepszego scenariusza rozwoju OZE. Efektem analizy jest wybór scenariuszy zakładających znaczny udział energii pochodzącej z biogazu i biomasy. W [18] wykorzystano metodę ELECTRE TRI do porównania wydajności 41 biogazowni rolniczych. W [19] za pomocą metod MAGBETH i rozmytej postaci metody AHP stworzono hierarchię 15 kryteriów wpływających na lokalizację odnawialnych źródeł energii, w tym biomasy, oraz wytypowano ranking źródeł energii elektrycznej, wskazując, że dla obszaru Turcji w obu metodach ranking źródeł był taki sam. W [20] również posłużono się metodą wielokryterialną Monte Carlo, do wyznaczenia rankingu odnawialnych źródeł energii w sektorze wytwarzania w Szkocji. Z powyższego przeglądu literatury można wywnioskować, że metody analiz wielokryterialnych są wykorzystywane do analiz związanych z wykorzystaniem biogazu w sektorze wytwórczym.

3. Opis metod

Porównywane metody (AHP i taksonomii numerycznej) są metodami rankingu, tzn. takimi, które wynik analizy przedstawiają za pomocą rankingu rozpatrywanych wariantów decyzyjnych. Metoda AHP bazuje na porównaniu parami kryteriów według 9-stopniowej skali porównań, zaś metoda taksonomii numerycznej

wykorzystuje odległość od rozwiązania idealnego, tzw. wzorca. Poniżej streszczono główne założenia obu metod.

4. Metoda AHP

W celu rozwiązania problemu natury wielokryterialnej w wielu dziedzinach, takich jak: politologia, socjologia, zarządzanie czy ocena przedsięwzięć inwestycyjnych, analitycy najczęściej korzystają z metody AHP, która została opracowana przez T.L. Saaty'ego w 1980 roku [21]. Głównym założeniem metody jest porównanie parami kryteriów i wariantów decyzyjnych na podstawie 9-stopniowej skali porównań, w której preferencje decydenta odpowiadają konkretnym wartościom liczbowym [21]. Decydem w procesie porównywania parami jest osoba, która w zależności od ocenianego zagadnienia jest ekspertem w danej dziedzinie bądź należy do grupy interesariuszy lub inwestorów. Zarówno warianty decyzyjne, kryteria, jak i cel główny umieszczone są w strukturze hierarchicznej [22]. Porównania zostają umieszczone w macierzy porównań parami (A), która składa się z n jedynek umieszczonych na głównej diagonalnej. Porównania dokonuje się poprzez wskazanie wpływu elementów z lewej strony macierzy (i) na elementy znajdujące się na górze macierzy (j), otrzymując wynik porównania a_{ij} . Poniżej głównej diagonalnej znajdują się odwrotności porównań parami, oznacza to, że i -ty wiersz jest odwrotnością j -tej kolumny. Wzór na macierz A zamieszczono poniżej:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Składowe wektora własnego macierzy A wyznaczają wektor priorytetów (w) kryteriów ze względu na realizację celu głównego:

$$w = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij} \quad (2)$$

Zaletą metody AHP jest możliwość wyznaczenia konsekwencji i spójności porównań parami [23], poprzez wyznaczenie współczynnika zgodności CR. W celu uznania wyników za zgodne współczynnik CR nie może przekroczyć 0,10, w przeciwnym wypadku porównania należy uznać za niezgodne [24]. Ponadto zastosowanie 9-stopniowej skali porównań parami pozwala na uszeregowanie kryteriów i wariantów decyzyjnych pod względem jakościowym oraz ilościowym.

5. Metoda taksonomii numerycznej

Taksonomia numeryczna wywodzi się z nauk biologicznych, gdzie była wykorzystywana do klasyfikacji organizmów żywych na podstawie ich cech. Jest stosowana do opisu zjawisk ekonomiczno-przyrodniczych oraz pozwala ustalić relacje między badanymi obiektami, redukując nadmiar informacji oraz porządkując je [25]. Zadania taksonomiczne mogą prowadzić

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 45–51. When referring to the article please refer to the original text.

PL

do porządkowania, grupowania lub wyboru np. obiektów [26]. Podstawą metody jest utworzenie macierzy danych X , która zawiera zbiór obiektów $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ (lokalizacje) oraz zbiór cech $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ (kryteria). Macierz X przedstawiono poniżej:

$$X = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & \dots & X_m & o_1 \\ \begin{matrix} x_{1,1} \\ x_{2,1} \\ \vdots \\ x_{n,1} \end{matrix} & \begin{matrix} x_{1,2} \\ x_{2,2} \\ \vdots \\ x_{n,2} \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} x_{1,m} \\ x_{2,m} \\ \vdots \\ x_{n,m} \end{matrix} & & \begin{matrix} o_2 \\ \vdots \\ o_n \end{matrix} \end{matrix} \quad (3)$$

gdzie: $x_{i,j}$ – elementy macierzy danych X , wartość X_j -tej cechy dla o_i – tego obiektu ($i = 1, \dots, n$ oraz $j = 1, \dots, m$).

W celu dokonania rankingu obiektów należy dokonać normowania cech, tak aby były one ze sobą porównywalne, oraz nadać im wagi, aby uzyskać hierarchię ważności cech. W metodach rangowania należy także przekształcić cechy, tak aby wszystkie były stymulantami. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie macierzy odległości obiektów od tzw. obiektu wzorcowego za pomocą rzutu ortogonalnego punktu na prostą wyznaczoną przez współrzędne wzorca.

6. Uwarunkowania lokalizacyjne biogazowni

Dobór lokalizacji biogazowni decyduje o powodzeniu realizacji inwestycji oraz jej opłacalności ekonomicznej. Na potrzeby niniejszej analizy przyjęto 8 kryteriów decydujących o ocenie danej lokalizacji. Kryterium K1 związane jest z dostępnością i koniecznością zakupu surowców pierwotnych, z których produkowany jest biogaz. Kryteria K2 i K3 związane są kolejno z dostępem do sieci elektroenergetycznej średniego napięcia oraz dostępnością

do sieci ciepłowniczej. Kryterium K4 określa kompletność dokumentów planistycznych związanych z obszarem biogazowni, dotyczy umieszczenia biogazowni w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego oraz możliwości nabycia praw do dysponowania terenem na cele inwestycyjne. Odległość biogazowni od terenów narażonych na hałas, zagrożenie uciążliwym zapachem oraz tereny ochrony wód są określone w kryterium K5. Odległość od terenów do zagospodarowania resztek pofermentacyjnych określono w kryterium K6. Ostatnie dwa kryteria, K7 i K8, dotyczą rocznej wydajności instalacji kolejno dla energii elektrycznej i ciepła. Analizie poddano 3 potencjalne lokalizacje biogazowni rolniczych, których charakterystykę względem kryteriów przedstawiono w tab. 1.

7. Wyniki analizy wielokryterialnej

Jak wspomniano w rozdziale opisującym omawiane metody analizy wielokryterialnej, pierwszym krokiem w celu uszeregowania lokalizacji jest dobór kryteriów oraz wskazanie ich hierarchii. Uszeregowanie kryteriów determinujących lokalizację biogazowni nie jest takie same w przypadku zastosowania metody AHP oraz taksonomii numerycznej. Metodą AHP wykazano, że przeważającym kryterium jest jak najmniejsza odległość biogazowni od terenów narażonych na hałas, zagrożenie uciążliwym zapachem oraz tereny ochrony wód, zaś metoda taksonomii numerycznej wykazała, że najważniejszym kryterium jest dostęp do sieci ciepłowniczej. W rzeczywistości bliska odległość do sieci ciepłowniczej nie jest kryterium decydującym o powodzeniu realizacji inwestycji w biogazownię. W przypadku kryteriów charakteryzujących się najmniejszym wpływem na decyzję o lokalizacji biogazowni metody także

wskazały różne kryteria. Dla metody AHP najmniej wpływe okazało się kryterium dotyczące odległości od terenów do zagospodarowania resztek pofermentacyjnych, zaś dla metody taksonomii numerycznej najmniej wpływe okazały się wskaźniki wydajności instalacji. Omówione różnice przedstawiono na rys. 3.

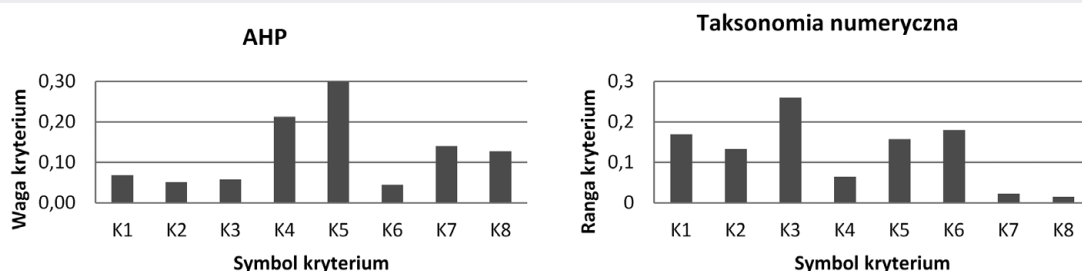
Wyznaczenie wag kryteriów w metodzie AHP odbywa się po porównaniu parami kryteriów. Jak wspomniano, metoda AHP umożliwia wyznaczenie współczynnika zgodności CR, który w analizowanym przypadku wyniósł 0,093 (poniżej 0,1), oznaczając, że porównanie parami jest konsekwentne i spójne. W przypadku taksonomii numerycznej nie ma możliwości obiektywnego sprawdzenia, czy wyniki, które otrzymano, są spójne. Bez względu na różnice w wyznaczonych wagach kryteriów obie metody wskazały, że preferowaną lokalizacją jest lokalizacja 1, co przedstawiono na rys. 4. W przypadku metody AHP różnica w ocenie między lokalizacją L1 a drugą w rankingu lokalizacją L2 jest większa niż w metodzie taksonomii numerycznej. Kolejność wariantów jest taka sama.

8. Porównanie metod

W celu porównania metody AHP oraz taksonomii numerycznej wyszczególniono trzy obszary, na podstawie których dokonano porównania. Pierwszym z nich jest wrażliwość metody na zmianę liczby wariantów decyzyjnych i kryteriów. Analiza wrażliwości umożliwia sprawdzenie wpływu zmiany liczby kryteriów na wybór kryteriów o szczególnym znaczeniu oraz zmiany liczby wariantów decyzyjnych na ranking lokalizacji. W celu zbadania wrażliwości obu metod na zmianę liczby kryteriów dokonano powtórnie analizy wskazania rankingu lokalizacji biogazowni przy założeniach:

Numer kryterium	Lokalizacja 1	Lokalizacja 2	Lokalizacja 3
K1	pełny dostęp	konieczność dokupu 30% substratu	konieczność substratu 100%
K2	do 5 km	5–10 km	do 2 km
K3	powyżej 5 km	brak	powyżej 10 km
K4	komplet dokumentów	komplet dokumentów	podpisano wstępną umowę z właścicielem działki ewidencyjnej
K5	0,5 km	powyżej 1 km	100 m
K6	do 1 km	powyżej 1 km	powyżej 5 km
K7	10 000 MW	7876,116 MW	9000 MW
K8	9600 MW	8199,36 MW	9300 MW

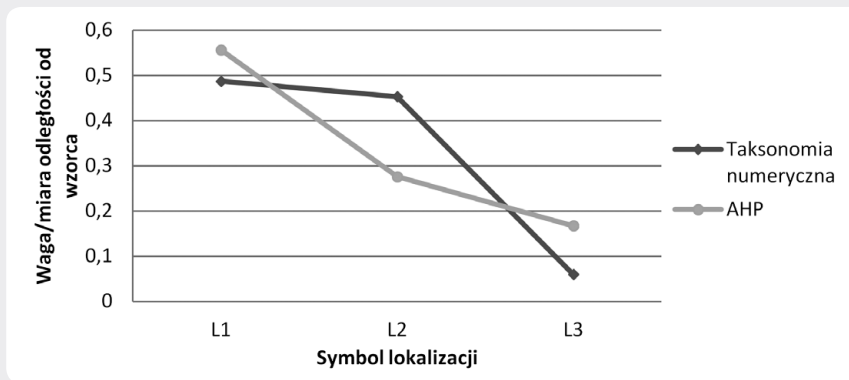
Tab. 1. Charakterystyka lokalizacji względem kryteriów



Rys. 3. Wagi kryteriów wpływających na decyzję o lokalizacji biogazowni

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 45–51. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 4. Wyniki uszeregowania lokalizacji wskazane metodą AHP oraz taksonomii numerycznej

Nazwa metody	AHP	Taksonomia numeryczna
Uszeregowanie lokalizacji biogazowni	L1 → L4 → L2 → L3	L1 → L2 → L4 → L3

Tab. 2. Wynik badania wrażliwości metody AHP i taksonomii numerycznej na zmianę liczby wariantów decyzyjnych

- a) kryteria K2 i K3 zostają zastąpione kryterium K2* i oznacza ono zarówno dostęp do sieci elektroenergetycznej średniego napięcia oraz sieci ciepłowniczej
- b) kryteria K7 i K8 zostają zastąpione kryterium K7* oznaczające roczną wydajność instalacji, obejmującą łącznie produkcję energii elektrycznej i ciepła.

Wykazano, że w przypadku metody AHP redukcja liczby kryteriów (obejmujących zbliżone cechy) nie ma wpływu na ostateczny ranking kryteriów. Zmianie ulegają jednak wartości wag poszczególnych kryteriów. W przypadku taksonomii numerycznej redukcja tych samych kryteriów spowodowała znaczącą zmianę w ich rankingu, wskazując kryterium K6 (odległość od terenów do zagospodarowania resztek pofermentacyjnych) jako najistotniejsze (rys. 5).

W przypadku obu metod zmiana liczby oraz wag kryteriów nie wpłynęła na uszeregowanie lokalizacji.

W celu zbadania wrażliwości metod na zmianę liczby wariantów dodano dodatkową, czwartą, lokalizację biogazowni. Proponowana biogazownia znajduje się w odległości powyżej 10 km od sieci elektroenergetycznej średniego napięcia oraz w odległości do 5 km od sieci ciepłowniczej. W procesie produkcyjnym należy dokupić

60% kiszonki. Powyżej 1 km znajdują się tereny wrażliwe ze względu na hałas, zasady higieny lub ochronę wód. Wydajność biogazowni przewidywana jest na poziomie ok. 8500 MWe oraz 8750 MWt.

W wyniku powtórnie przeprowadzonej analizy wykazano, że obie metody nie są wrażliwe na dodanie dodatkowego wariantu decyzyjnego w postaci czwartej lokalizacji biogazowni. Oznacza to, że uszeregowanie pierwszych trzech lokalizacji pozostało bez zmian. Wyniki przedstawiono w tab. 2. Warto zwrócić uwagę, że w metodzie AHP dodany wariant L4 został wyżej oceniony od wariantu L2 (inaczej niż w przypadku taksonomii numerycznej).

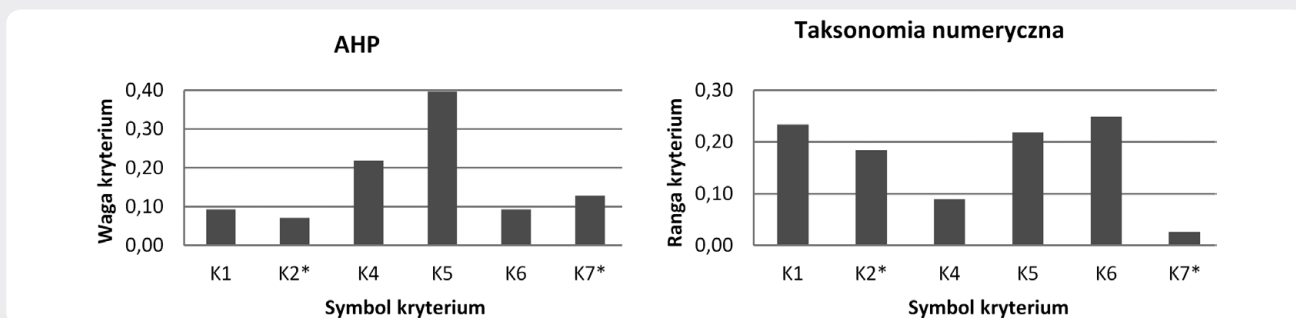
Drugim obszarem, pod względem którego dokonano porównania metod, jest stopień zaangażowania decydentów i ekspertów. AHP uwzględnia preferencje decydenta, co może prowadzić do subiektywizacji wyników. Wybór właściwej osoby na stanowisko decydenta w procesie analizy wielokryterialnej ma ogromne znaczenie dla poprawności wyników analizy. Gdy preferencje decydenta różnią się od priorytetów przedsiębiorstwa, ze względu na niekompetencje decydenta powinien on zostać przeszkolony bądź wymieniony [27]. Metoda taksonomii numerycznej również wymaga zgromadzenia informacji na temat danych

lokalizacji, aczkolwiek już sama analiza zgromadzonych informacji może być wykonana przez analityka, bez udziału eksperta, ponieważ nie wymaga ona wiedzy eksperckiej w procesie analizy.

Metody AHP i taksonomii numerycznej charakteryzują się różnym stopniem złożoności obliczeniowej. Jest to trzeci obszar, pod względem którego dokonano porównania metod. Przeprowadzenie analiz wielokryterialnych metodami AHP oraz taksonomii numerycznej może być wykonane przy wykorzystaniu gotowego oprogramowania (np. program Expert Choice bazujący na metodzie AHP [28] lub program Taksonomia bazujący na taksonomii numerycznej [25]) lub za pomocą arkusza kalkulacyjnego. Na potrzeby niniejszego opracowania analizę lokalizacji biogazowni przeprowadzono w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel. Zauważono, że dokonanie analizy lokalizacji biogazowni zarówno metodą AHP, jak i taksonomii numerycznej charakteryzuje się podobnym stopniem złożoności obliczeniowej. Jednakowoż, w subiektywnej ocenie autorów wykonanie badań wrażliwości metod na zmiany liczby kryteriów oraz wariantów decyzyjnych metodą taksonomii numerycznej okazało się mniej czasochłonne niż w przypadku metody AHP, która wymagała powtórzenia całego procesu analizy.

9. Podsumowanie

W artykule wykazano, że przeprowadzenie analizy lokalizacji biogazowni metodą AHP oraz metodą taksonomii numerycznej wskazuje jednakowe uporządkowanie rozpatrywanych lokalizacji, przy jednocześnie różnych wagach kryteriów wpływających na podjęcie decyzji. Dzięki możliwości wyznaczenia wskaźnika konsekwencji i spójności porównań parami metoda AHP wskazała ranking kryteriów odpowiadający przewidywanym wynikającym z doświadczenia autorów. Metoda taksonomii numerycznej wskazała kryterium związane z odległością biogazowni od sieci ciepłowniczej jako strategiczne dla realizacji inwestycji, co zdaniem autorów nie jest zgodne z rzeczywistością. W artykule przedstawiono również badanie wrażliwości obu metod na zmianę liczby kryteriów i wariantów decyzyjnych. W metodzie AHP, po redukcji liczby kryteriów, wskazano to samo kryterium jako posiadające największy wpływ na wybór lokalizacji biogazowni. Metoda taksonomii numerycznej, po takiej samej redukcji



Rys. 5. Wyniki wyznaczenia wag kryteriów dla badania wrażliwości metod na zmianę liczby kryteriów

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 45–51. When referring to the article please refer to the original text.

PL

kryteriów jak w metodzie AHP, wskazała, że kryterium, które wcześniej miało niewielki wpływ na realizację inwestycji, okazało się mieć największy wpływ. Z tego względu metoda taksonomii numerycznej okazała się wrażliwa na zmianę liczby kryteriów.

Metody porównano także pod kątem stopnia zaangażowania decydentów i ekspertów w procesie analizy lokalizacji biogazowni. Wykazano, że w metodzie AHP udział decydentów i ekspertów jest kluczowy, podczas gdy w metodzie taksonomii numerycznej analityk, po zebraniu potrzebnych informacji, nie musi korzystać z wiedzy eksperckiej.

W artykule scharakteryzowano także stopień złożoności obliczeniowej obu metod, wskazując metodę AHP jako tę o większym stopniu czasochłonności i złożoności obliczeniowej.

Bibliografia

1. Ministerstwo Gospodarki, Polityka energetyczna Polski do 2030 roku, Załącznik do uchwały nr 202/2009 Rady Ministrów z dnia 10 listopada 2009, 2009.
2. Woźniak E., Występowanie elektrowni biogazowych w Polsce i czynniki ich lokalizacji, 2015 [online], <http://www.eko-dok.pl/2016/128.pdf> [dostęp: 2.05.2017].
3. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne, Dz.U. z 2006 r., nr 89, poz. 625, z późn. zm.
4. Jasiulewicz M., Janiszewska D., Potencjał biomasy województwa zachodniopomorskiego w aspekcie wykorzystania do celów energetycznych, *Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie Problemy Rolnictwa Światowego* 2012, t. 12, z. 1, s. 83–93.
5. Piwowar A., Biogazownie rolnicze w Polsce – lokalizacja i parametry techniczne instalacji, *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna* 2014, nr 6, s. 7–9.
6. Miller A., Analiza świadectw pochodzenia energii elektrycznej z odnawialnych źródeł na przełomie lat 2005–2014 [w:] *Globalizacja i regionalizacja w ochronie środowiska*, red. nauk. T. Noch, J. Sączuk, A. Wesołowska, Wydawnictwo Gdańskiej Szkoły Wyższej, Gdańsk 2014.
7. Paska J., Distributed generation and renewable energy sources in Poland, 9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation, 2007, s. 1–6.
8. Igliński B. i in., Bioenergy in Poland, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 2011, Vol. 15, No. 6, s. 2999–3007.
9. Urząd Regulacji Energetyki, Moc zainstalowana OZE 2016, 2016.
10. Urząd Regulacji Energetyki, Ilość energii elektrycznej wytworzonej z OZE w latach 2005–2016, potwierdzonej świadectwami pochodzenia, wydanymi do dnia 30.06.2016, 2016.
11. Zarębski P., Uwarunkowania przestrzenne lokalizacji biogazowni w Polsce, *Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu* 2013, t. 16, nr 3, s. 331–336.
12. Franc-Dąbrowska J., Jarka S., Specyficzne uwarunkowania inwestycji w biogazownie rolnicze w Polsce, *Roczniki Ekonomii Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich* 2014, t. 101, nr 4, s. 19–28.
13. Maj G., Piekarski W., Modelowy tok postępowania inwestycyjnego jako element prawidłowego zarządzania projektem budowy biogazowni rolniczej [w:] *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, tom 1, pod red. R. Knosali, Opole 2014, s. 867–878.
14. Kosewska K., Kamiński R., Analiza ekonomiczna budowy i eksploatacji biogazowni rolniczych w Polsce, *Inżynieria Rolnicza* 2008, nr 1(99), s. 189–194.
15. Berruto R. i in., Comparison of distribution systems for biogas plant residual, *Biomass and Bioenergy* 2013, Vol. 52, s. 139–150.
16. Madlener R., Kowalski K., Stagl S., New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: The case of renewable energy use in Austria, *Energy Policy* 2007, Vol. 35, No. 12, s. 6060–6074.
17. Cristobal San J.R., Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method, *Renewable Energy* 2011, Vol. 36, No. 2, s. 498–502.
18. Madlener R., Antunes C.H., Dias L.C., Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis, *European Journal of Operational Research* 2009, Vol. 197, No. 3, s. 1084–1094.
19. Ertay T., Kahraman C., Kaya I., Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multi-criteria methods: the case of Turkey, *Technological and Economic Development of Economy* 2013, Vol. 19, No. 1, s. 38–62.
20. Troldborg M., Heslop S., Hough R.L., Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 2014, Vol. 39, s. 1173–1184.
21. Saaty T.L., Vargas, L.G., Dellmann K., The allocation of intangible resources: The analytic hierarchy process and linear programming, *Socio-Economic Planning Sciences* 2003, Vol. 37, s. 169–184.
22. Downarowicz O. i in., Zastosowanie metody ahp do oceny i sterowania poziomem bezpieczeństwa złożonego obiektu technicznego, Politechnika Gdańska, 2000.
23. Srichetta P., Thurachon W., Applying Fuzzy Analytic Hierarchy Process to Evaluate and Select Product of Notebook Computers, *International Journal of Modeling and Optimization* 2012, Vol. 2, No. 2, s. 168–173.
24. Prusak A., Stefanów P., Gardian M., Graficzna forma kwestionariusza w badaniach AHP/ANP, *Modern Management Review* 2013, t. XVIII, nr 20, s. 171–189.
25. Kolenda M., Taksonomia numeryczna. Klasyfikacja, porządkowanie i analiza obiektów wielocechowych, Akademia Ekonomiczna we Wrocławiu, 2006.
26. Czermińska M., Zastosowanie metod taksonomicznych w klasyfikacji krajów Unii Europejskiej z punktu widzenia poziomu ich rozwoju gospodarczego, *Zeszyty Naukowe Akademii Ekonomicznej w Krakowie* 2002, t. 575, nr 284, s. 149–161.
27. Walentynowicz P., Jankowska-Mihułowicz M., Wykorzystanie analizy wielokryterialnej w podejmowaniu decyzji kierowniczych, w przedsiębiorstwach województwa pomorskiego, *Zarządzanie i Finanse* 2012, t. 2, nr 1, s. 205–221.
28. Sikorski M., Instrukcja do programu Expert Choice v.9.5, Politechnika Gdańska, 2000.

Alicja Stoltmann

dr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: alicia.stoltmann@pg.gda.pl

Pracuje w Katedrze Elektroenergetyki Politechniki Gdańskiej. Obroniła doktorat na temat wielokryterialnych metod analizy opłacalności inwestycji w sektorze energetycznym. Interesuje się także modelowaniem instalacji energetycznych elektrowni parowych i gazowych w środowisku GateCycle.

Paweł Bućko

dr hab. inż. prof. nadzw. PG

Politechnika Gdańska

e-mail: pawel.bucko@pg.gda.pl

Pracuje w Katedrze Elektroenergetyki Politechniki Gdańskiej. Jego działalność naukowa związana jest z ekonomiką energetyki, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki programowania rozwoju systemów energetycznych w uwarunkowaniach rynkowych. Aktywność zawodową koncentruje na analizie inwestycyjnej dla źródeł wytwórczych, analizie mechanizmów rynkowych i zasad rozliczeń w dostawie energii. Jest także audytorem energetycznym i zajmuje się problematyką racjonalnego użytkowania energii.