

Ranking of Generation Source Locations by a Hybrid Multi-Criteria Method

Authors

Alicja Stoltmann
Marcin Jaskólski
Paweł Bućko

Keywords

multi-criteria analysis methods, biogas plant, wind farm, solar farm

Abstract

The paper presents a ranking of the locations of eight renewable energy sources (RES) made using a hybrid multi-criteria analysis method. The method is a combination of the analytical hierarchical process (AHP) method and numerical taxonomy. The considered generating sources, i.e. solar plants, biogas plants, and wind farms are sources that will significantly contribute to implementing the provisions of the energy and climate package for Poland (by 2030). Increasing the share of energy from renewable sources will increase the country's energy security. Low-emission generation sources obtain energy from renewable sources. Therefore, their location is influenced by factors such as environmental impact, availability and origin of raw materials, e.g. biogas, as well as technological aspects. The multitude of factors mentioned makes the location of a biogas plant a multi-threaded issue. The AHP method is a mathematical method with a high degree of sophistication and time consumption. The method's advantage is its ability to compare countable and uncountable factors with each other, which was used in conjunction with the numerical taxonomy method. The analysis' effect is ranking of the locations in question.

DOI: 10.12736/issn.2330-3022.2019302

Received by the editor: 02.10.2019

Received in revised form: 19.11.2019

Accepted: 19.11.2019

Available online: 26.03.2020

Introduction

The constant increase in demand for electricity, increase in prices related to its generation, as well as the effect of promotion mechanisms make the share of renewable energy sources (RES) in electricity production increase year by year [1].

The renewable sources include wind, solar, hydro and biomass and biogas plants. In the Polish power system, wind farms represent the highest installed RES capacity. Fig. 1 shows the RES power output breakdown in 2018. According to the WindEurope report, the share of wind plants' installed capacity in the total capacity installed in Europe increased from 6% in 2005 to 18% in 2017 [2].

According to data published by the URE Energy Regulatory Office, wind farms have been the most actively developed in recent years, as shown in Fig. 2.

Due to the shutdown of more than half of conventional generating units in the near future, it is necessary to develop the energy sector with low-carbon sources [4].

Finding the locations of new generation sources is a multi-criteria issue because of the number of decisions that need to be made and the criteria that need to be considered in the decision-making process.

Literature review

In the energy sector, multi-criteria analysis methods have been used for the analysis of new electricity source locations and the generation method selection [5]. In the relevant literature, the multicriteria methods have been referenced, inter alia, for the selection of the scenario of a state's energy mix [6], the location of measuring masts, [7] or the specific generating source capacity [8].

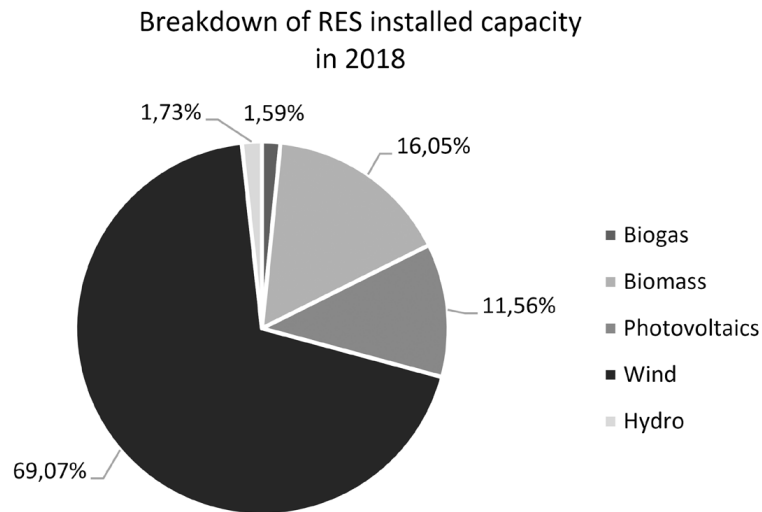


Fig. 1. RES installed capacity in Poland in 2018, according to URE Energy Regulatory Office data [1]

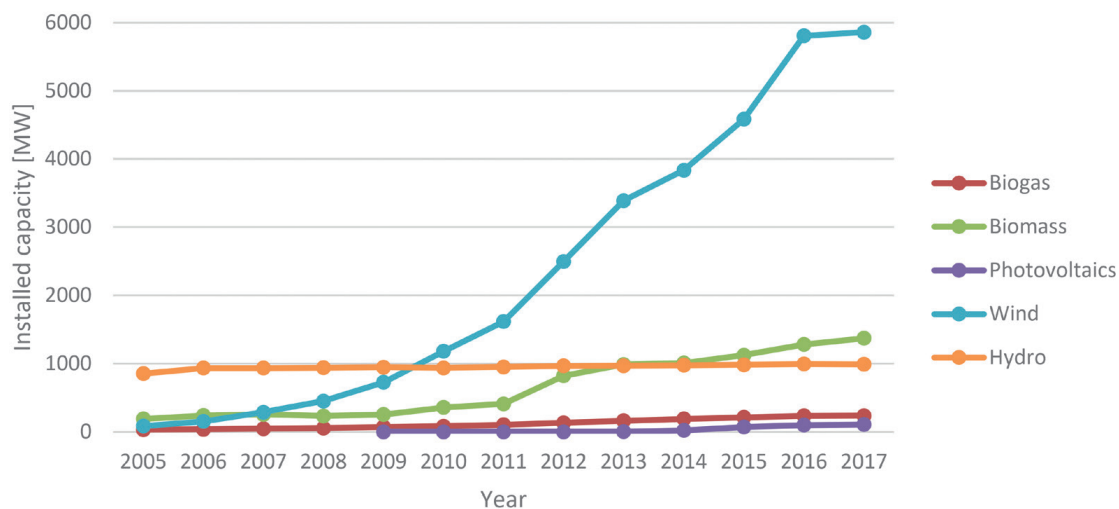


Fig. 2. RES installed capacity in 2005–2017, according to URE [3]

One of the most commonly used multicriteria analysis methods is the analytical hierarchical process (AHP) method, which has been used to select the electricity generation method in natural gas or hydrogen-based technologies[9]. In this paper, the optimization criteria are selected that consider greenhouse gas emissions, energy generation efficiency, and capital and operating expenses. The AHP method, as a tool for selecting the best investment project option in the electric power industry, was also discussed in [10]. The criteria that were considered in the analysis include installed electrical capacity, annual costs, net profit, and operating efficiency.

Optimization criteria constitute a set of factors that describe a specific location intended as the site of a new generation source, so their choice and number are of key importance from an analysis adequacy point of view. The number of criteria depends on the amount of data and location details available [11]. The most common generation source location evaluation criteria referenced in the literature can be grouped into environmental, technological, economic, and social issues.

The technological criteria include availability of raw energy materials [12, 13]; required area of land [14]; planned electricity output [14]; technology maturity and system reliability [15–19]; deficit probability and cumulative energy deficit [17]; fuel consumption, distance from the existing power grid or the need to build a new connection [12]; saving of fossil fuels [15]; energy efficiency; primary energy consumption rate per unit of energy demand; safety indicators (technical assessment and social effects) [16]. Requirements for new generation sources, and therefore the sets of optimization criteria, differ depending on the planned source's capacity and nature.

The environmental criteria include the amount of CO₂ and NO_x atmospheric emissions. Renewable sources are characterized by the rate of avoided CO₂ emission [12], [14–17], [20–25], avoided noise emission [16, 25–27]; avoided dust emission[28]; impact on animal population[12]; costs of compensation for environmental effects [18], impact on the landscape [29].

The economic criteria are related to the costs that should be incurred during the power plant construction and operation, such as the cost of construction of the power plants and access

roads [15, 19, 24, 28, 30–32], operating costs of electricity generation [25, 33], fuel costs [28] and reliability costs (cost of undelivered energy, costs of failures, repairs, total cost of interruptions in electricity supply) [31]. The measure of the economic criterion is the net present value NPV, investment payback period, service life and construction period [16, 17, 24, 26, 28, 34].

The social criterion includes the favourable attitude of society and local authorities to the generation source development [14, 27]. Fulfilment of local energy policy goals in terms of primary energy savings [17] and likely creation of new jobs [16, 17] affect public acceptance of the project.

Hybrid multicriteria methods

Applying several methods or a combination of them to solve decision-making problems or verify the validity of results obtained has been referenced in studies [12, 26], whereby two or more methods were applied at different stages of the decision-making process, relying on a combination of the superiority relations and utility functions, e.g. VIKOR-AHP method, Fuzzy AHP-TOPSIS.

There are also studies in the literature that combine the AHP method and geographic information system (GIS) methods. GIS is a computer system designed to process geographical data, that is, spatial data that consider the size of a variable and its position in space. With computers, large data sets can be stored, processed and analysed. Maps, tables, and graphs obtained from geoinformatics analysis are often used to support multi-criteria analysis of problems [35]. In [36] a combination of the AHP and GIS methods was used to select the best site for the construction of a photovoltaic power plant in the Turkish province of Karapinar. The paper takes into account the criteria of distance from buildings, required site area, and distance from roads and power lines.

Description of the method algorithm

The method of finding the optimal site for a distributed generation source proposed in this paper should be understood as an algorithm that allows one to rank the available location options, considering the dependencies between the options' evaluation criteria parameters that describe these options. The location ranking obtained using the method should be considered as a support for the decision-making process rather than its fulfilment. The proposed method contains elements of the AHP method and numerical taxonomy. According to the energy sector development problem solving methodology, the analysis should begin with determining the generating source types. The method allows one to rank the location of power generation sources, such as photovoltaic and wind farms, and biogas and biomass plants. Various generation source types can be ranked in the same procedure, as shown in this article.

After the places under consideration have been identified, the AHP method was used to determine the optimization criteria weights. The criteria weights are obtained by comparing them in pairs. The resulting weights were then considered when performing the ranking using the numerical taxonomy method. The use of the AHP method to determine the generating source location evaluation criteria weights allows obtaining a measure of the distance of values describing individual locations

from the reference values in accordance with the numerical taxonomy methodology. The numerical taxonomy method allows comparing locations in terms of their metric distances from standard and anti-standard values. This enables examining the problem more closely, but it takes setting the standard and anti-standard.

The distance from the evaluation measure standard values (r_i) determined as the sum of distances of Euclidean locations from the standard and anti-standard values for each specific criterion, further multiplied by the criterion weight. Thus, locations at significant distances from the standard values for low-weight criteria are not ranked the lowest (R_i).

Requirements for renewable energy source locations

As has already been mentioned, the investment process of the construction of a new electricity generating source is complex and time-consuming. This is due to the need to meet formal/legal and technological requirements. The requirements can be divided into those that are directly related to the electricity generating plant, and the requirements for the power grid that outputs the generated energy to the power system [11]. Below are the location requirements for the selected renewable energy sources.

The location of a wind farm should be characterized by appropriate wind energy resources and low terrain roughness. For a wind farm location, the wind's kinetic energy must be monitored by pre-installing measuring masts on the sites under consideration [37]. Because of the noise that a wind turbine operation produces, the placement of individual turbines should take into account the distances from human residences [38] and conservation areas, such as Nature 2000 areas or woodlands [39].

The location of a photovoltaic power plant should be characterized by a high annual-average solar radiation density in order to maximize the power generation output [40]. An important location aspect is also the terrain's shape, the extent of its coverage and air clearness, and obstacles near the photovoltaic panels that cast shadows on them and therefore reduce their output. Due to the low solar radiation density, photovoltaic panels occupy a large area of land compared to other electricity sources with the same capacity [41].

The location of biogas plants is determined by the generating source's distance from the existing gas and heat networks. In connection with the transport of substrates, an important element is also the proximity to their supplies and sites for the disposal of post-fermentation residues [42]. The proximity to post-fermentation waste management sites is required to minimise the transport costs.

Selecting a set of evaluation criteria

Five groups of main criteria were selected K_i and then further detailed by partial criteria:

- technological criteria (K_1): availability of primary raw materials ($K_{1,1}$), time of installed power usage ($K_{1,2}$), distance from the power system ($K_{1,3}$), distance from the heating network ($K_{1,4}$), energy efficiency ($K_{1,5}$)

- economic criteria (K_2): capital cost ($K_{2,1}$), the cost of generating energy over the facility's life cycle ($K_{2,2}$), net present value (NPV) ($K_{2,3}$), internal rate of return (IRR) ($K_{2,4}$)
- social criteria (K_3): the favourable attitude of society ($K_{3,1}$), favourable attitude of local authorities ($K_{3,2}$), project compliance with local policies ($K_{3,3}$)
- environmental criteria (K_4): CO₂ emission avoidance rate ($K_{4,1}$), noise emission ($K_{4,2}$), impact on animal populations ($K_{4,3}$), impact on landscape ($K_{4,4}$), impact on conservation areas ($K_{4,5}$), land area rate ($K_{4,6}$), post-fermentation waste management site location ($K_{4,7}$)
- legal criteria (K_5): planning documents – power output ($K_{5,1}$), planning documents – project area ($K_{5,2}$), environmental decision – power output ($K_{5,3}$), environmental decision – project area ($K_{5,4}$).

Locations identification

As part of the multicriteria analysis, eight renewable source locations with the symbols $l_1 - l_8$ were listed. The following objects were considered: 1 MW solar power plant, 0.5 MW solar power plant, 1.5 MW agricultural biogas plant with corn silage and manure substrate, 1.81 MWe biomass utilisation plant fed with food and meat industry waste, and four wind farms with capacities of 20, 30, 40, and 30 MW.

The site with symbol l_1 is located in an area with insolation above 1,250 kWh/m², and the location with symbol l_2 – in an area with insolation 1,051–1,150 kWh/m².

The economic analysis showed that all projects would be profitable. Interviews with the local community and authorities indicated high support for the project.

Of all the locations analyzed, the location l_5 featured the highest level of avoided CO₂ emissions.

Solar and wind plant locations do not require close proximity to heating systems (criterion $K_{1,4}$), because they do not produce useful heat. Therefore, the post-fermentation waste management criterion (criterion $K_{4,7}$) does not apply to these power plants. Solar power plants emit no audible noise when operated, so their values for criterion $K_{4,2}$ are zero, unlike wind farms and biogas plants. Since all these criteria should be considered as destimulant, it can be concluded that solar plants will be better than biomass plants in terms of these criteria.

Results of the multi-criteria analysis

According to the methodology described in the previous section, the main criteria were compared in pairs (Tab. 1), as a result of which criterion K_4 was identified as that of the greatest impact on the main goal implementation.

The paired comparison of the criteria showed that criterion $K_{1,2}$ was weighted the highest among the analysed specific technological criteria, since it directly impacts the source's output, which in turn affects other criteria, e.g. economic and environmental.

The highest weighted specific economic criterion was $K_{2,3}$. This is due to the fact that it covers the entire financial flow of the planned capex project and on its basis, its project's economic viability can be assessed.

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	w_i
K_1	0.12	0.06	0.22	0.13	0.12	0.13
K_2	0.24	0.13	0.22	0.13	0.08	0.16
K_3	0.06	0.06	0.11	0.19	0.12	0.11
K_4	0.35	0.38	0.22	0.38	0.46	0.36
K_5	0.24	0.38	0.22	0.19	0.23	0.25
Σ	8.50	8.00	9.00	2.67	4.33	1.00
$\lambda_{\max} = 5.35$ $CI = 0.09$ $RI = 1.12$ $CR = 0.08$						

Tab. 1. Paired comparison of the main criteria

The highest weighted social criterion was $K_{3,2}$. Local authorities plan and implement certain actions in the process of implementing the energy policies, local and national alike. They direct their actions to meet the energy needs of the local community. Without their support, it is impossible to obtain all the decisions and permits necessary for the project implementation.

The highest weighted environmental criterion was $K_{4,1}$. This is due to the health and economic benefits of reducing greenhouse gas emissions. The lowest weighted criterion was $K_{4,4}$. All the plants, solar, wind, and biogas alike, have a modern appearance and if appropriately designed, they improve the landscape quality of their environments.

Among all the specific criteria, criterion $K_{4,1}$ – the avoided emissions – was weighted the highest, and criterion $K_{1,4}$ – the distance from a heating network – the lowest.

Locations ranking

In Tab. 2. the values of the distance from the standard multiplied by the global weights of specific criteria are presented, as well as their sum (r_i) and normalized ranking values (R_i).

The first in the ranking was the location of the wind farm denoted with the symbol l_5 . The small differences between the ranking coefficients R_i for individual sources are worth noting. This is due to the locations' ranking but does not indicate differences in the likelihood of the projects' implementation.

Summary

The combination of AHP methods and numerical taxonomy allowed ranking the locations of eight renewable sources: two solar power plants, agricultural and utilization biogas plant, and four wind farms. Using the AHP method, an accurate description of individual locations was obtained, and the weights of optimization criteria were determined. The numerical taxonomy method reduced the analysis complexity, mathematically simplified the actions performed, and ranked the locations based on their distance from the standard and anti-standard values. As a result of the presented application of the combined methods, the locations have been ranked and the location with the highest chances of project implementation has been identified.

	Distances of each location from the standard								r_j	R_j
	$K_{1,1}$	$K_{1,3}$	...	$K_{4,1}$	$K_{4,2}$	...	$K_{5,3}$	$K_{5,4}$		
I_1	0.020	0.003	...	0.012	0.081	...	0.006	0.058	0.509	0.125
I_2	0.010	0.009	...	0.000	0.081	...	0.005	0.049	0.457	0.112
I_3	0.010	0.004	...	0.043	0.009	...	0.008	0.049	0.438	0.107
I_4	0.015	0.007	...	0.055	0.000	...	0.008	0.044	0.404	0.099
I_5	0.010	0.005	...	0.133	0.020	...	0.006	0.058	0.611	0.150
I_6	0.005	0.009	...	0.128	0.013	...	0.003	0.015	0.515	0.126
I_7	0.015	0.004	...	0.130	0.018	...	0.008	0.068	0.610	0.147
I_8	0.010	0.021	...	0.130	0.009	...	0.008	0.044	0.548	0.134

Tab. 2. Resulting distances and ranking coefficients

REFERENCES

1. Sprawozdanie z działalności Prezesa URE w 2018 r. [Report on the activities of the President of the ERO in 2018.], Urząd Regulacji Energetyki, Warsaw 2019.
2. Fraile D., Mbistrova A., Wind in power 2017, WindEurope, 2018, p. 25.
3. Moc zainstalowana OZE 2016 [RES installed capacity in 2016], Urząd Regulacji Energetyki, 2016.
4. Ecke J. et al., Polski sektor energetyczny 2050, 4 scenariusze [The Polish Energy Sector, 4 Scenarios], Forum Energii [online], <https://forum-energii.eu/pl/analizy/polska-energetyka-2050-4-scenariusze>, 2007 [access: 27.11.2019].
5. Stoltmann A., Przegląd metod wielokryterialnych stosowanych w analizie rozwoju sektora wytwórczego energii elektrycznej [Review of multi-criteria methods used in the analysis of the development of the electricity generation sector], *Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, Vol. 6, 2015, pp. 128–136.
6. Haralambopoulos D.A., Polatidis H., Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework, *Renew. Energy*, Vol. 28, 2003, pp. 961–973.
7. Aras H., Erdoğmuş Ş., Koç E., Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process, *Renew. Energy*, Vol. 29, No. 8, 2004, pp. 1383–1392.
8. Nixon J.D., Dey P.K., Davies P.A., Design of a novel solar thermal collector using a multi-criteria decision-making methodology, *J. Clean. Prod.*, Vol. 59, 2013, pp. 150–159.
9. Pilavachi P.A. et al., Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 29, No. 11–12, 2009, pp. 2228–2234.
10. Kamrat W., Zastosowanie hierarchicznej analizy problemowej w badaniach efektywności inwestowania [Application of hierarchical problem analysis in capital expenses effectiveness studies], *Energetyka*, No. 10, 2013, pp. 721–725.
11. Bućko P., Jaskólski M., Stoltmann A., Kryteria stosowane w wielokryterialnym planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego [Criteria used in multi-criteria planning of power system development] [in:] *Rynek Energii Elektrycznej: Energetyka rozproszona*, editor Z. Połacki, Politechnika Lubelska 2016, pp. 17–27.
12. Choudhary D., Shankar R., An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India, *Energy*, Vol. 42, No. 1, 2012, pp. 510–521.
13. Mohsen M.S., Akash B.A., Evaluation of domestic solar water heating system in Jordan using analytic hierarchy process, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 38, No. 18, 1997, pp. 1815–1822.
14. 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, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 39, 2014, pp. 1173–1184.
15. Tsoutsos T. et al., Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete, *Energy Policy*, Vol. 37, No. 5, 2009, pp. 1587–1600.
16. Wang J.-J. et al., Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 13, No. 9, 2009, pp. 2263–2278.
17. Beccali M., Cellura M., Mistretta M., Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology, *Renew. Energy*, Vol. 28, No. 13, 2003, pp. 2063–2087.
18. Buygi M.O. et al., Network planning in unbundled power systems, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 21, No. 3, 2006, pp. 1379–1387.
19. Chakravorty S., Ghosh S., Power Distribution Planning Using Multi-Criteria Decision Making Method, *Int. J. Comput. Electr. Eng.*, Vol. 1, No. 5, 2009, pp. 622–627.
20. Bućko P. et al., Metoda analizy wielokryterialnej do planowania rozwoju sieci elektroenergetycznej średniego i niskiego napięcia [Multi-criteria analysis method for planning the development of medium and low voltage power grid], *Zesz. Nauk. Wydz. Elektrotechniki i Autom. Politech. Gdańskiej*, No. 42, 2015, pp. 143–146.
21. Løken E., Botterud A., Holen A.T., Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 197, No. 3, 2009, pp. 1075–1083.
22. Wang J., Lin Y., A fuzzy multicriteria group decision making approach to select configuration items for software development, *Fuzzy Sets Syst.*, Vol. 134, 2003, pp. 343–363.
23. Brand B., Missaoui R., Multi-criteria analysis of electricity generation mix scenarios in Tunisia, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 39, 2014, pp. 251–261.
24. Diakoulaki D., Karangelis F., Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation

- sector in Greece, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 11, No. 4, 2007, pp. 716–727.
25. Ribeiro F., Ferreira P., Araújo M., Evaluating future scenarios for the power generation sector using a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) tool: The Portuguese case, *Energy*, Vol. 52, 2013, pp. 126–136.
 26. Kaya T., Kahraman C., Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul, *Energy*, Vol. 35, No. 6, 2010, pp. 2517–2527.
 27. Wang J.-J. et al., A fuzzy multi-criteria decision-making model for tri-generation system, *Energy Policy*, Vol. 36, No. 10, 2008, pp. 3823–3832.
 28. Voropai N.I., Ivanova E.Y., Multi-criteria decision analysis techniques in electric power system expansion planning, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 24, No. 1, 2002, pp. 71–78.
 29. Tegou L.-I., Polatidis H., Haralambopoulos D.A., Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study, *J. Environ. Manage.*, Vol. 91, No. 11, 2010, pp. 2134–2147.
 30. Chung T.S. et al., Multi-objective transmission network planning by a hybrid GA approach with fuzzy decision analysis, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 25, No. 3, 2003, pp. 187–192.
 31. Ganguly S., Sahoo N.C., Das D., Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 46, 2013, pp. 65–78.
 32. Zhang T. et al., A Novel Evaluation Approach for Power Distribution System Planning based on Linear Programming Model and ELECTRE III, *2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE) 2014*, pp. 1921–1928.
 33. Ramirez-Rosado I.J., Dominguez-Navarro J.A., Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electrical power distribution networks, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 19, No. 4, 2004, pp. 1801–1810.
 34. Mourmouris J.C., Potolias C., A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece, *Energy Policy*, Vol. 52, 2013, pp. 522–530.
 35. Magnuszewski A., *GIS w geografii fizycznej [GIS in physical geography]*, Warsaw, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999.
 36. Uyan M., GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region Konya/Turkey, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 28, 2013, pp. 11–17.
 37. Suska-Szczerbicka M., Weiss E., Ocena opłacalności przedsięwzięcia inwestycyjnego produkcji energii elektrycznej farmy wiatrowej [Profitability assessment of wind farm capex projects], *Rynek Energii*, Vol. 1, 2013, pp. 1–9.
 38. Stoltmann A. et al., Wspomaganie decyzji lokalizacyjnych źródeł wytwórczych metodami analizy wielokryterialnej [Support for generation sources location decisions by multi-criteria analysis methods], *Rynek Energii*, Vol. 122, No. 1, 2016, pp. 26–33.
 39. Stoltmann A., Application of AHP method for comparing the criteria used in locating wind farms, *Acta Energetica*, No. 3/28, 2016, pp. 144–154.
 40. Mendecka B., Stoltmann A., Application of multi-criteria methods to compare different solutions of supplying buildings in electricity from photovoltaic systems, *E3S Web Conf.*, Vol. 10, 2016, pp. 1–8.
 41. Trela G., Analiza opłacalności projektów fotowoltaicznych [Profitability analysis of solar projects], *Czysta Energ.*, No. 3, 2013.
 42. 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.

Alicja Stoltmann

Gdańsk University of Technology
 e-mail: alicja.stoltmann@pg.gda.pl

An associate professor at the Department of Electric Power Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Automation of Gdańsk University of Technology. Currently, her research covers issues related to capex project implementation processes in the energy sector. Her research interests also include modelling power systems of steam and gas power plants in the GateCycle environment.

Marcin Jaskólski

Gdańsk University of Technology
 e-mail: marcin.jaskolski@pg.edu.pl

Graduated from Gdańsk University of Technology (2002). An assistant professor at the Electric Power Engineering Department of Gdańsk University of Technology. He completed a course in biomass use at the University of Lund in Sweden (2002–2003) and research fellowships at the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) in Laxenburg, Austria (2003) and the Institute of Energy Economics and Rational Use of Energy (IER) at the University of Stuttgart (2004). He participated in courses in nuclear power engineering at the Atomic Energy and Alternative Energy (CEA) Commission in Saclay, France (2010). In 2011 he took up an internship in nuclear reactor safety analysis at EDF SEPTEN research centre in Lyon. His scientific interests, besides integrated modelling of power system development, include the use of RES and nuclear power generation.

Paweł Bućko

Gdańsk University of Technology
 e-mail: pawel.bucko@pg.edu.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 22–27. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Ranking lokalizacji źródeł wytwórczych wykonany hybrydową metodą wielokryterialną

Autorzy

Alicja Stoltmann
Marcin Jaskólski
Paweł Bućko

Słowa kluczowe

metody analizy wielokryterialnej, biogazownia, elektrownia wiatrowa, elektrownia fotowoltaiczna

Streszczenie

Artykuł przedstawia ranking lokalizacji ośmiu odnawialnych źródeł energii (OZE) wykonany za pomocą hybrydowej metody analizy wielokryterialnej. Metoda jest połączeniem metody analitycznego procesu hierarchicznego (AHP) oraz taksonomii numerycznej. Rozpatrywane źródła wytwórcze, tj. elektrownie słoneczne, biogazownie oraz farmy wiatrowe, 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 spowoduje wzrost bezpieczeństwa energetycznego kraju. Niskoemisyjne źródła wytwórcze pozyskują energię ze źródeł odnawialnych. Dlatego też na ich lokalizację wpływają takie czynniki, jak: oddziaływanie na środowisko, dostępność oraz pochodzenie surowców, np. biogazu, a także aspekty technologiczne. Mnogość wymienionych czynników czyni lokalizację biogazowni zagadnieniem wielowątkowym. Metoda AHP jest metodą matematyczną o dużym stopniu zaawansowania i czasochłonności. Zaletą metody jest możliwość porównania ze sobą czynników policzalnych oraz niepoliczalnych, co wykorzystano w połączeniu z metodą taksonomii numerycznej. Efektem analizy jest wyznaczenie rankingu zawierającego uszeregowanie rozpatrywanych lokalizacji.

Data wpływu do redakcji: 02.10.2019

Data wpływu do redakcji po recenzjach: 19.11.2019

Data akceptacji artykułu: 19.11.2019

Data publikacji online: 26.03.2020

Wprowadzenie

Ciągły wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną, podwyżka cen związanych z jej wytwarzaniem, jak również funkcjonowanie mechanizmów promowania sprawiają, że udział odnawialnych źródeł energii (OZE) w produkcji energii elektrycznej wzrasta z roku na rok [1].

Wśród źródeł odnawialnych znajdują się elektrownie wiatrowe, słoneczne, wodne oraz elektrownie na biomasę i biogaz. W polskim systemie elektroenergetycznym najwyższą moc zainstalowaną wśród OZE stanowią elektrownie wiatrowe. Na rys. 1 przedstawiono strukturę produkcji energii elektrycznej z instalacji OZE w 2018 roku. Według raportu WindEurope udział mocy zainstalowanej w energetyce wiatrowej w całkowitej mocy zainstalowanej w Europie wzrósł z 6% w 2005 roku do 18% w 2017 roku [2].

Jak wynika z danych publikowanych przez Urząd Regulacji Energetyki, w ostatnich latach najprężniej rozwijały się elektrownie wiatrowe, co przedstawiono na rys. 2.

Z powodu wyłączenia w niedalekiej przyszłości ponad połowy konwencjonalnych jednostek wytwórczych konieczny jest rozwój sektora energetycznego z uwzględnieniem źródeł niskoemisyjnych [4]. Poszukiwanie lokalizacji nowych źródeł wytwórczych należy do zagadnień wielokryterialnych ze względu na liczbę decyzji, które należy podjąć, oraz kryteriów, jakie trzeba uwzględnić w procesie decyzyjnym.

Przegląd literatury

W sektorze energetycznym metody analizy wielokryterialnej wykorzystuje się w analizach lokalizacyjnych nowych źródeł

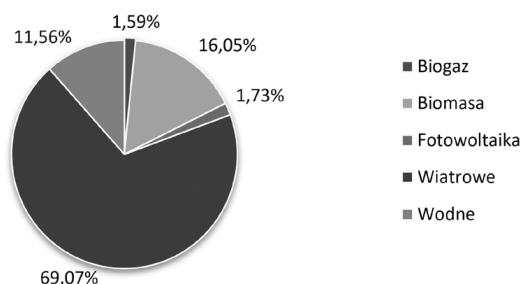
wytwórczych energii elektrycznej oraz przy wyborze sposobu jej produkcji [5]. W literaturze metody wielokryterialne znalazły zastosowanie m.in. do wyboru scenariusza struktury energetycznej państwa [6], wyboru miejsca posadowienia masztów pomiarowych [7] lub doboru mocy konkretnych źródeł wytwórczych [8].

Jedną z najczęściej wykorzystywanych metod analizy wielokryterialnej jest metoda analitycznego procesu hierarchicznego (AHP), którą wykorzystano do wyboru sposobu produkcji energii elektrycznej w technologiach opartych na zużyciu gazu ziemnego lub wodoru [9]. W artykule wybrano kryteria optymalizacyjne, uwzględniające emisje gazów cieplarnianych, sprawność produkcji energii, nakłady inwestycyjne oraz koszty eksploatacyjne. Metodę AHP, jako narzędzie do wyboru najlepszego wariantu

projektu inwestycyjnego w elektroenergetyce, omówiono również w [10]. Kryteria, które zostały uwzględnione w analizie, to: elektryczna moc zainstalowana, koszty roczne, zysk netto oraz wskaźnik efektywności operacyjnej.

Kryteria optymalizacji jest to zbiór czynników opisujących daną lokalizację przeznaczoną do budowy nowych źródeł wytwórczych, dlatego też ich dobór oraz liczba są kluczowe z punktu widzenia poprawności wykonanej analizy. Liczba kryteriów uzależniona jest od ilości posiadanych danych oraz informacji o danej lokalizacji [11]. Najczęstsze kryteria oceny lokalizacji źródeł wytwórczych energii elektrycznej, odnotowywane w literaturze, można pogrupować na zagadnienia środowiskowe, techniczne, ekonomiczne oraz społeczne.

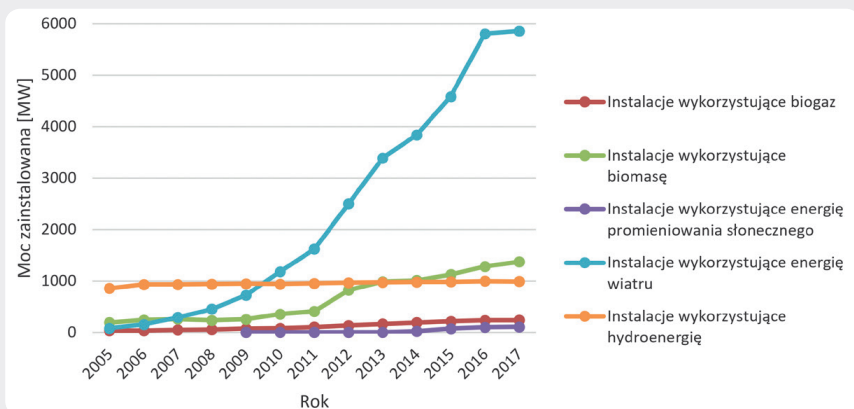
Struktura mocy zainstalowanej w instalacjach OZE w 2018 r.



Rys. 1. Struktura mocy zainstalowanej w instalacjach OZE w 2018 r. w Polsce, wg danych URE [1]

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 22–27. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 2. Moc zainstalowana w OZE w latach 2005–2017, wg danych URE [3]

Kryteria techniczne to: dostępność surowców energetycznych [12, 13]; wymagana powierzchnia terenu [14]; planowana produkcja energii elektrycznej [14]; dojrzałość technologii i niezawodność układu [15–19]; prawdopodobieństwo deficytu oraz skumulowany deficyt energii [17]; zużycie paliwa, odległość od istniejącej sieci elektroenergetycznej bądź konieczność budowy nowego przyłącza [12]; oszczędność paliw kopalnych [15]; sprawność energetyczna; wskaźnik zużycia energii pierwotnej na jednostkę energii zapotrzebowanej; wskaźniki bezpieczeństwa (ocena techniczna i efekty społeczne) [16]. Warunki stawiane nowym źródłom wytwarzania, a co za tym idzie zbiory kryteriów optymalizacji, różnią się w zależności od mocy i charakteru planowanego źródła.

Kryteria środowiskowe obejmują ilość emisji CO₂ i NO_x do atmosfery. Źródła odnawialne charakteryzuje wskaźnik unikniętej emisji CO₂ [12], [14–17], [20–25], unikniętej emisji hałasu [16, 25–27]; unikniętej emisji pyłów [28]; wpływ na populację zwierząt [12]; koszty rekompensaty za efekty środowiskowe [18], wpływ na krajobraz [29].

Kryteria ekonomiczne związane są z kosztami, jakie należy ponieść podczas budowy i eksploatacji elektrowni, takimi jak: koszt budowy elektrowni oraz dróg dojazdowych [15, 19, 24, 28, 30–32], koszty eksploatacyjne wytwarzania energii elektrycznej [25, 33], koszty paliwa [28] oraz koszty niezawodności (koszt energii niedostarczonej, koszty awarii, napraw, całkowity koszt przerw w dostawach energii elektrycznej) [31].

Miarą kryterium ekonomicznego jest zaktualizowana wartość netto – NPV, okres zwrotu inwestycji, okres eksploatacji oraz okres budowy [16, 17, 24, 26, 28, 34]. Kryterium społeczne obejmuje przychylność społeczeństwa oraz lokalnych władz dla budowy źródła wytórczego [14, 27]. Spełnienie celów lokalnej polityki energetycznej w zakresie oszczędności energii pierwotnej [17] oraz możliwości tworzenia nowych miejsc pracy [16, 17] wpływają na akceptację społeczeństwa dla inwestycji.

Hybrydowe metody wielokryterialne

Zastosowanie większej liczby metod lub łączenia ich w celu rozwiązania problemu decyzyjnego lub sprawdzenia poprawności

wyników zastosowano w opracowaniach [12, 26], w których zastosowano dwie lub więcej metod w różnych etapach procesu decyzyjnego, opierając się na łączeniu relacji przewyższenia oraz funkcji użyteczności, np. metoda VIKOR-AHP, Fuzzy AHP-TOPSIS. W literaturze występują także opracowania, w których połączono metodę AHP oraz metody systemów informacji przestrzennej (GIS). GIS są to systemy komputerowe przeznaczone do przetwarzania danych geograficznych, czyli danych przestrzennych, które uwzględniają wielkość zmiennej i jej położenie w przestrzeni. Dzięki wykorzystaniu komputerów możliwe jest przechowywanie dużych zbiorów danych, przetwarzanie ich oraz wykonywanie analiz. Mapy, tabele oraz wykresy powstałe w wyniku analiz geoinformacyjnych są często wykorzystywane we wspomaganiu analizy problemu metodami wielokryterialnymi [35]. W [36] wykorzystano połączenie metody AHP oraz GIS do wyboru najlepszego miejsca budowy elektrowni fotowoltaicznej w tureckiej prowincji Karapınar. W artykule uwzględniono kryterium odległości od zabudowań, wymaganej powierzchni terenu, odległości od dróg i linii przesyłowych.

Opis algorytmu metody

Wielokryterialną metodę poszukiwania najlepszej lokalizacji instalacji rozproszonego źródła wytwarzania energii elektrycznej, zaproponowaną w artykule, należy rozumieć jako algorytm postępowania umożliwiający wykonanie rankingu spośród dostępnych wariantów lokalizacji, uwzględniający zależności pomiędzy parametrami kryteriów oceny wariantów, opisujących te warianty. Ranking lokalizacji, otrzymany dzięki zastosowaniu metody, należy traktować jako element wspomagający decydenta, nie zaś podejmujący za niego ostateczną decyzję. Proponowana metoda zawiera w sobie elementy metody AHP oraz taksonomii numerycznej. Zgodnie z metodyką rozwiązywania problemów rozwoju sektora energetycznego analizę należy zacząć od określenia typów źródeł wytórczych. Metoda pozwala na wyznaczenie rankingu lokalizacji źródeł wytórczych energii elektrycznej, takich jak: farmy fotowoltaiczne i wiatrowe, biogazownie, elektrownie na biomasę. Możliwe jest wykonanie

jednego rankingu dla różnych typów źródeł wytwarzania energii elektrycznej, co zostało przedstawione w niniejszym artykule.

Po dokonaniu identyfikacji rozpatrywanych lokalizacji wykorzystano metodę AHP do wyznaczenia wag kryteriów optymalizacji. Wagi kryteriów otrzymuje się w wyniku porównania ich ze sobą parami. Otrzymane wagi kryteriów uwzględniono następnie w wykonaniu rankingu metodą taksonomii numerycznej. Wykorzystanie metody AHP do wyznaczenia wag kryteriów oceny lokalizacji źródeł wytórczych pozwala na uzyskanie miary odległości wartości opisujących poszczególne lokalizacje od wartości wzorcowych, zgodnie z metodyką taksonomii numerycznej. Metoda taksonomii numerycznej pozwala na porównanie lokalizacji względem ich odległości metrycznych od wartości wzorcowych i antywzorcowych. Dzięki temu możliwe jest dokładniejsze zbadanie problemu, ale konieczne jest wyznaczenie wzorca i antywzorca.

Miara odległości lokalizacji od wartości wzorcowych miernika oceny (r_i), wyznaczona jako suma odległości euklidesowych lokalizacji od wartości wzorcowej i antywzorcowej względem każdego kryterium szczegółowego, dodatkowo przemnożona jest przez wagę kryterium. Dzięki temu lokalizacje znajdujące się w znacznej odległości od wartości wzorcowych dla kryteriów o niskiej wadze nie są umieszczane na końcowych miejscach w rankingu lokalizacji (R_i).

Uwarunkowania lokalizacyjne odnawialnych źródeł energii

Jak wspomniano, proces inwestycyjny związany z budową nowego źródła wytórczego energii elektrycznej jest skomplikowany i czasochłonny. Jest to spowodowane koniecznością spełnienia wymagań formalnoprawnych i technicznych. Wymagania można podzielić na te związane bezpośrednio z instalacją wytwarzającą energię elektryczną i na wymagania dotyczące sieci elektroenergetycznej wyprowadzającej wyprodukowaną energię do systemu elektroenergetycznego [11]. Poniżej przedstawiono wymagania lokalizacyjne dla wybranych odnawialnych źródeł energii.

Lokalizacja elektrowni wiatrowej powinna cechować się odpowiednimi zasobami energetycznymi wiatru oraz niską szorstkością terenu. Dla lokalizacji elektrowni wiatrowej należy przeprowadzić monitoring energii kinetycznej wiatru poprzez wcześniejszą instalację masztów pomiarowych w rozpatrywanych lokalizacjach [37]. Ze względu na hałas towarzyszący pracy turbin wiatrowych rozmieszczenie poszczególnych turbin powinno uwzględniać odległości od zabudowań ludzkich [38] i obszarów chronionych przyrodniczo, takich jak obszary Natura 2000 lub zalesienia [39].

Lokalizacja elektrowni fotowoltaicznej powinna cechować się wysoką średnioroczną gęstością promieniowania słonecznego, w celu maksymalizacji produkcji energii elektrycznej [40]. Ważnym aspektem lokalizacyjnym jest również ukształtowanie terenu, stopień jego pokrycia oraz czystość powietrza, a przeszkody znajdujące

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 22–27. When referring to the article please refer to the original text.

PL

się w pobliżu paneli fotowoltaicznych, rzucając na nie cień, powodując zmniejszenie produkcji energii. Ze względu na niską gęstość promieniowania słonecznego panele fotowoltaiczne zajmują duże powierzchnie terenu w porównaniu z innymi źródłami wytwórczymi energii elektrycznej o tych samych mocach [41].

Lokalizacja biogazowni uwarunkowana jest odległością źródła wytwórczego od istniejących sieci gazowych i ciepłowniczych. Ze względu na transport substratów ważnym elementem jest również bliskość ich dostaw oraz terenów utylizacji resztek pofermentacyjnych [42]. Bliskość terenów zagospodarowania resztek pofermentacyjnych wymagana jest ze względu na minimalizację kosztów transportu.

Wybór zbioru kryteriów oceny

Wyszczególniono pięć grup kryteriów głównych K_i , które dodatkowo uszczegółowiono kryteriami cząstkowymi:

- kryteria techniczne (K_1): dostępność surowców pierwotnych ($K_{1,1}$), czas użytkowania mocy zainstalowanej ($K_{1,2}$), odległość od SEE ($K_{1,3}$), odległość od sieci ciepłowniczej ($K_{1,4}$), sprawność energetyczna ($K_{1,5}$)
- kryteria ekonomiczne (K_2): nakłady inwestycyjne ($K_{2,1}$), koszt wytworzenia energii w cyklu życia obiektu ($K_{2,2}$), zaktualizowana wartość netto (NPV) ($K_{2,3}$), wewnętrzna stopa zwrotu (IRR) ($K_{2,4}$)
- kryteria społeczne (K_3): przychylność społeczeństwa ($K_{3,1}$), przychylność władz lokalnych ($K_{3,2}$), zgodność inwestycji z polityką lokalną ($K_{3,3}$)
- kryteria środowiskowe (K_4): wskaźnik unikniętej emisji CO₂ ($K_{4,1}$), emisja hałasu ($K_{4,2}$), wpływ na populację zwierząt ($K_{4,3}$), wpływ na krajobraz ($K_{4,4}$), wpływ na obszary chronione ($K_{4,5}$), wskaźnik powierzchni terenu ($K_{4,6}$), lokalizacja terenu do zagospodarowania odpadów pofermentacyjnych ($K_{4,7}$)
- kryteria prawne (K_5): dokumenty planistyczne – wyprowadzenie mocy ($K_{5,1}$), dokumenty planistyczne – obszar inwestycji ($K_{5,2}$), decyzja środowiskowa – wyprowadzenie mocy ($K_{5,3}$), decyzja środowiskowa – obszar inwestycji ($K_{5,4}$).

Identyfikacja lokalizacji

W ramach analizy wielokryterialnej wyszczególniono osiem lokalizacji odnawialnych źródeł wytwórczych o symbolach $l_1 - l_8$. Rozpatrywano kolejno: elektrownię fotowoltaiczną o mocy zainstalowanej 1 MW, elektrownię fotowoltaiczną o mocy 0,5 MW; biogazownię rolniczą o mocy 1,5 MW, której substratem jest wsad z kiszonki kukurydzy i gnojowicy; biogazownię utylizacyjną o mocy elektrycznej zainstalowanej 1,81 MW, wykorzystującą odpady z przemysłu rolnospożywczego i mięsnego; oraz cztery farmy wiatrowe o mocach 20, 30, 40 i 30 MW.

Lokalizacja o symbolu l_1 znajduje się na terenach, których nasłonecznienie wynosi powyżej 1250 kWh/m², zaś lokalizacja o symbolu l_2 – na terenach o nasłonecznieniu 1051–1150 kWh/m².

Analiza ekonomiczna wykazała, że wszystkie inwestycje są opłacalne. Rozpoznanie wśród

lokalnej społeczności i władz wskazuje na wysokie poparcie dla realizacji inwestycji. Spośród wszystkich analizowanych lokalizacji lokalizacja l_5 ma najwyższy wskaźnik unikniętej emisji CO₂.

Lokalizacje elektrowni fotowoltaicznych oraz wiatrowych nie wymagają bliskiej odległości do systemów ciepłowniczych (kryterium $K_{1,4}$, ponieważ nie produkują ciepła użytkowego. Dlatego kryterium związane z zagospodarowaniem resztek pofermentacyjnych (kryterium $K_{4,7}$) nie dotyczy tych elektrowni. Elektrownie fotowoltaiczne podczas eksploatacji nie emitują hałasu słyszalnego, dlatego też ich wartości dla kryterium $K_{4,2}$ są równe zeru, w przeciwieństwie do elektrowni wiatrowych oraz biogazowni. Ponieważ wszystkie te kryteria należy traktować jako destymulanty, można wnioskować, że elektrownie fotowoltaiczne pod względem tych kryteriów okażą się lepsze niż elektrownie na biomasę.

Wyniki analizy wielokryterialnej

Zgodnie z metodyką opisaną w poprzedniej sekcji porównano parami kryteria główne (tab. 1), w wyniku czego wyznaczono kryterium K_4 jako kryterium o największym wpływie na realizację celu głównego.

W wyniku porównania parami kryteriów szczegółowych wykazano, że kryterium $K_{1,2}$ otrzymało najwyższą wagę spośród analizowanych technicznych kryteriów szczegółowych, ponieważ ma bezpośredni wpływ na ilość energii, jaką źródło wyprodukuje, co w konsekwencji wpływa na pozostałe kryteria, np. ekonomiczne, środowiskowe. Dla kryteriów szczegółowych ekonomicznych najwyższą wagę otrzymało kryterium $K_{2,3}$. Jest to spowodowane tym, że obejmuje

ono całość przepływów finansowych planowanej inwestycji i na jego podstawie można zdecydować o opłacalności ekonomicznej budowy źródła wytwórczego.

Wśród kryteriów społecznych budowy nowych źródeł wytwórczych najwyższą wagę otrzymało kryterium $K_{3,2}$. Lokalne władze planują i realizują określone czynności procesu wdrażania polityki energetycznej, zarówno lokalnej, jak i państwowej. Kierują swoje działania tak, aby zaspokoić potrzeby energetyczne lokalnej społeczności. Brak ich poparcia skutkuje niemożliwością uzyskania wszystkich niezbędnych decyzji i pozwoleń na realizację inwestycji.

Kryterium środowiskowym o najwyższej wadze jest kryterium $K_{4,1}$. Jest to związane z korzyściami, zarówno zdrowotnymi, jak i ekonomicznymi, jakie niesie ze sobą redukcja emisji gazów cieplarnianych. Kryterium o najniższej wadze okazało się $K_{4,4}$. Zarówno instalacje fotowoltaiczne, farmy wiatrowe, jak i biogazownie cechują się nowoczesnym wyglądem i odpowiednio zaprojektowane zwiększają walory krajobrazowe otoczenia.

Spośród wszystkich kryteriów szczegółowych kryterium $K_{4,1}$ – wskaźnik unikniętej emisji cechuje się najwyższą wagą, zaś kryterium $K_{1,4}$ – odległość od sieci ciepłowniczej – wagą najniższą.

Ranking lokalizacji

W tab. 2 przedstawiono wartości miary odległości od wzorca przemnożone przez globalne wagi kryteriów szczegółowych oraz przedstawiono ich sumę (r_i), a także wartości znormalizowane rankingu (R_i).

Jak wynika z rankingu wykonanego proponowaną metodą, pierwsze miejsce zajęła

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	w_i
K_1	0,12	0,06	0,22	0,13	0,12	0,13
K_2	0,24	0,13	0,22	0,13	0,08	0,16
K_3	0,06	0,06	0,11	0,19	0,12	0,11
K_4	0,35	0,38	0,22	0,38	0,46	0,36
K_5	0,24	0,38	0,22	0,19	0,23	0,25
Σ	8,50	8,00	9,00	2,67	4,33	1,00
	$\lambda_{\max} = 5,35$	$CI = 0,09$		$RI = 1,12$	$CR = 0,08$	

Tab. 1. Porównanie parami kryteriów głównych

	Miary odległości poszczególnych lokalizacji od wzorca								r_i	R_i
	$K_{1,1}$	$K_{1,3}$	...	$K_{4,1}$	$K_{4,2}$	...	$K_{5,3}$	$K_{5,4}$		
l_1	0,020	0,003	...	0,012	0,081	...	0,006	0,058	0,509	0,125
l_2	0,010	0,009	...	0,000	0,081	...	0,005	0,049	0,457	0,112
l_3	0,010	0,004	...	0,043	0,009	...	0,008	0,049	0,438	0,107
l_4	0,015	0,007	...	0,055	0,000	...	0,008	0,044	0,404	0,099
l_5	0,010	0,005	...	0,133	0,020	...	0,006	0,058	0,611	0,150
l_6	0,005	0,009	...	0,128	0,013	...	0,003	0,015	0,515	0,126
l_7	0,015	0,004	...	0,130	0,018	...	0,008	0,068	0,610	0,147
l_8	0,010	0,021	...	0,130	0,009	...	0,008	0,044	0,548	0,134

Tab. 2. Wyznaczone wartości miary odległości oraz wartości współczynnika rankingu

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 22–27. When referring to the article please refer to the original text.

PL

lokalizacja elektrowni wiatrowej o symbolu I_5 . Należy zauważyć niewielkie różnice w wysokości współczynnika rankingu R_i dla poszczególnych źródeł. Spowodowane jest to uszeregowaniem lokalizacji, nie wskazuje jednak różnic w prawdopodobieństwie realizacji inwestycji.

Podsumowanie

Połączenie metod AHP i taksonomii numerycznej pozwoliło na wyznaczenie rankingu ośmiu lokalizacji odnawialnych źródeł wytwórczych: dwóch elektrowni słonecznych, biogazowni rolniczej i utylizacyjnej oraz czterech farm wiatrowych. Dzięki zastosowaniu metody AHP uzyskano dokładny opis poszczególnych lokalizacji oraz wyznaczono wagi kryteriów optymalizacji. Metoda taksonomii numerycznej pozwoliła na zmniejszenie czasochłonności analizy, uproszczenie matematyczne wykonywanych działań oraz wykonanie rankingu lokalizacji w zależności od ich odległości od wartości wzorcowych i antywzorcowych. W wyniku przedstawionego zastosowania połączonych metod wskazano ranking lokalizacji oraz wskazano lokalizację o największych szansach na realizację inwestycji.

Bibliografia

1. Sprawozdanie z działalności Prezesa URE w 2018 r., Urząd Regulacji Energetyki, Warszawa 2019.
2. Fraile D., Mbistrova A., Wind in power 2017, WindEurope, 2018, s. 25.
3. Moc zainstalowana OZE 2016, Urząd Regulacji Energetyki, 2016.
4. Ecke J. i in., Polski sektor energetyczny 2050, 4 scenariusze, Forum Energii [online], <https://forum-energii.eu/pl/analizy/polska-energetyka-2050-4-scenariusze>, 2007 [dostęp: 27.11.2019].
5. Stoltmann A., Przegląd metod wielokryterialnych stosowanych w analizie rozwoju sektora wytwórczego energii elektrycznej, *Automatyka, Elektryka, Zakłócenia* 2015, t. 6, s. 128–136.
6. Haralambopoulos D.A., Polatidis H., Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework, *Renew. Energy* 2003, Vol. 28, s. 961–973.
7. Aras H., Erdoğmuş Ş., Koç E., Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process, *Renew. Energy* 2004, Vol. 29, No. 8, s. 1383–1392.
8. Nixon J.D., Dey P.K., Davies P.A., Design of a novel solar thermal collector using a multi-criteria decision-making methodology, *J. Clean. Prod.* 2013, Vol. 59, s. 150–159.
9. Pilavachi P.A. i in., Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies, *Appl. Therm. Eng.* 2009, Vol. 29, No. 11–12, s. 2228–2234.
10. Kamrat W., Zastosowanie hierarchicznej analizy problemowej w badaniach efektywności inwestowania, *Energetyka* 2013, nr 10, s. 721–725.
11. Bućko P., Jaskólski M., Stoltmann A., Kryteria stosowane w wielokryterialnym planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego [w:] *Rynek Energii Elektrycznej: Energetyka rozproszona*, red. Z. Połacki, Politechnika Lubelska 2016, s. 17–27.
12. Choudhary D., Shankar R., An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India, *Energy* 2012, Vol. 42, No. 1, s. 510–521.
13. Mohsen M.S., Akash B.A., Evaluation of domestic solar water heating system in Jordan using analytic hierarchy process, *Energy Convers. Manag.* 1997, Vol. 38, No. 18, s. 1815–1822.
14. 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, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, Vol. 39, s. 1173–1184.
15. Tsoutsos T. i in., Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete, *Energy Policy* 2009, Vol. 37, No. 5, s. 1587–1600.
16. Wang J.-J. i in., Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, Vol. 13, No. 9, s. 2263–2278.
17. Beccali M., Cellura M., Mistretta M., Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology, *Renew. Energy* 2003, Vol. 28, No. 13, s. 2063–2087.
18. Buygi M.O. i in., Network planning in unbundled power systems, *IEEE Trans. Power Syst.* 2006, Vol. 21, No. 3, s. 1379–1387.
19. Chakravorty S., Ghosh S., Power Distribution Planning Using Multi-Criteria Decision Making Method, *Int. J. Comput. Electr. Eng.* 2009, Vol. 1, No. 5, s. 622–627.
20. Bućko P. i in., Metoda analizy wielokryterialnej do planowania rozwoju sieci elektroenergetycznej średniego i niskiego napięcia, *Zesz. Nauk. Wydz. Elektrotechniki i Autom. Politech. Gdańskiej* 2015, nr 42, s. 143–146.
21. Løken E., Botterud A., Holen A.T., Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems, *Eur. J. Oper. Res.* 2009, Vol. 197, No. 3, s. 1075–1083.
22. Wang J., Lin Y., A fuzzy multicriteria group decision making approach to select configuration items for software development, *Fuzzy Sets Syst.* 2003, Vol. 134, s. 343–363.
23. Brand B., Missaoui R., Multi-criteria analysis of electricity generation mix scenarios in Tunisia, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, Vol. 39, s. 251–261.
24. Diakoulaki D., Karangelis F., Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2007, Vol. 11, No. 4, s. 716–727.
25. Ribeiro F., Ferreira P., Araújo M., Evaluating future scenarios for the power generation sector using a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) tool: The Portuguese case, *Energy* 2013, Vol. 52, s. 126–136.
26. Kaya T., Kahraman C., Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul, *Energy* 2010, Vol. 35, No. 6, s. 2517–2527.
27. Wang J.-J. i in., A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system, *Energy Policy* 2008, Vol. 36, No. 10, s. 3823–3832.
28. Voropai N.I., Ivanova E.Y., Multi-criteria decision analysis techniques in electric power system expansion planning, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2002, Vol. 24, No. 1, s. 71–78.
29. Tegou L.-I., Polatidis H., Haralambopoulos D.A., Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study, *J. Environ. Manage.* 2010, Vol. 91, No. 11, s. 2134–2147.
30. Chung T.S. i in., Multi-objective transmission network planning by a hybrid GA approach with fuzzy decision analysis, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2003, Vol. 25, No. 3, s. 187–192.
31. Ganguly S., Sahoo N.C., Das D., Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2013, Vol. 46, s. 65–78.
32. Zhang T. i in., A Novel Evaluation Approach for Power Distribution System Planning based on Linear Programming Model and ELECTRE III, *2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)* 2014, s. 1921–1928.
33. Ramirez-Rosado I.J., Dominguez-Navarro J.A., Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electrical power distribution networks, *IEEE Trans. Power Syst.* 2004, Vol. 19, No. 4, s. 1801–1810.
34. Mourmouris J.C., Potolias C., A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece, *Energy Policy* 2013, Vol. 52, s. 522–530.
35. Magnuszewski A., GIS w geografii fizycznej, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999.
36. Uyan M., GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region Konya/Turkey, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, Vol. 28, s. 11–17.
37. Suska-Szczerbicka M., Weiss E., Ocena opłacalności przedsięwzięcia inwestycyjnego produkcji energii elektrycznej farmy wiatrowej, *Rynek Energii* 2013, t. 1, s. 1–9.
38. Stoltmann A. i in., Wspomaganie decyzji lokalizacyjnych źródeł wytwórczych metodami analizy wielokryterialnej, *Rynek Energii* 2016, t. 122, nr 1, s. 26–33.
39. Stoltmann A., Application of AHP method for comparing the criteria used in locating wind farms, *Acta Energetica* 2016, No. 3/28, s. 144–154.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 22–27. When referring to the article please refer to the original text.

PL

40. Mendecka B., Stoltmann A., Application of multi-criteria methods to compare different solutions of supplying buildings in electricity from photovoltaic systems, *E3S Web Conf.* 2016, Vol. 10, s. 1–8.
41. Trela G., Analiza opłacalności projektów fotowoltaicznych, *Czysta Energ.* 2013, nr 3.
42. 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.

Alicja Stoltmann

dr inż.

Politechnika Gdańska

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

Pracuje jako adiunkt w Katedrze Elektroenergetyki na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Obecnie jej badania obejmują zagadnienia związane z procesami inwestycyjnymi w energetyce. Interesuje się także modelowaniem instalacji energetycznych elektrowni parowych i gazowych w środowisku GateCycle.

Marcin Jaskólski

dr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: marcin.jaskolski@pg.edu.pl

Ukończył studia na Politechnice Gdańskiej (2002). Jest adiunktem w Katedrze Elektroenergetyki Politechniki Gdańskiej. Ukończył szkolenia na temat wykorzystania biomasy na Uniwersytecie w Lund w Szwecji (2002–2003) i odbył stypendia naukowe w Międzynarodowym Instytucie Analiz Systemów Stosowanych (IIASA) w Laxenburgu, Austria (2003) oraz Instytucie Ekonomii Energetyki i Racjonalnego Wykorzystania Energii (IER) na Uniwersytecie w Stuttgarcie (2004). Uczestniczył w kursach z dziedziny energii jądrowej w Komisji Energii Atomowej i Energii Alternatywnej (CEA) w Saclay we Francji (2010). W 2011 roku odbył praktyki w zakresie analizy bezpieczeństwa reaktorów jądrowych w centrum badawczym EDF SEPTEN w Lyonie. Obszar jego zainteresowań, oprócz zintegrowanego modelowania rozwoju systemów energetycznych, obejmuje wykorzystanie odnawialnych zasobów energii i energetykę jądrową.

Paweł Bućko

dr hab. inż.

Politechnika Gdańska

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

Pracuje w Katedrze Elektroenergetyki Politechniki Gdańskiej. Jego działalność naukowa jest związana z ekonomiką energetyki, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki programowania rozwoju systemów energetycznych w uwarunkowaniach rynkowych. Swą 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.