

Ranking of Low-carbon Energy Technologies in the Context of the Degree of Achievement of Sustainable Development Objectives – Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) Approach

Author

Magdalena Ligus

Keywords

low-carbon energy sources, renewable energy sources, nuclear power, Delphi method, multi-criteria decision analysis, sustainable development

Abstract

The author's focus is on assessing the extent to which five low-carbon energy technologies with the highest market potential can contribute to increased social well-being within the concept of sustainable development. Heuristic methods are used. Relevant criteria in the areas of economy, society, and the environment are identified by the Delphi method. An expert survey was then conducted to obtain a ranking of the energy technologies. Experts weighted the importance of individual areas and criteria, and then assessed the strength and direction of the impact of each technology on the identified criteria in three areas. The results have shown that renewable energy technologies clearly prevail over nuclear power in achieving the sustainable development goals. The best in this respect among renewable energy sources are photovoltaics, followed by biomass and biogas. Onshore and offshore wind farms were ranked third and fourth, respectively.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2017311

Received: 27.03.2017

Received in revised form: 19.06.2017

Accepted: 27.06.2017

Available online: 30.09.2017

1. Introduction

The development of low-carbon energy sources (especially renewable energy sources) addresses the challenges of the gradual depletion of fossil fuels, and intensification of the greenhouse effect. Energy policy at the EU and national levels should consider the development of low-carbon technologies, which contribute the most to achieving sustainable development goals in three dimensions: economy, society and the environment.

The purpose of this study was to determine the validity (ranking) of low-carbon energy generation technologies in the context of their impact on social well-being within the meaning of the sustainable development paradigm. Five technologies (decision-making variants) with the highest growth potential were considered: offshore wind, onshore wind, solar, biomass and biogas, and nuclear.

2. Methodology

Multi criteria decision analysis (MCDA) was employed in the study. Unlike single-criterion analysis, which focuses on a single

goal, MCDA is a tool for analysing a set of different goals that cannot be aggregated by one measure, which is usually money. The first step is to determine the set of criteria and their relative weights, which are to indicate the degree of achievement of the goals. Then each of the options is evaluated for each criterion and the options are arranged in an order. MCDA is particularly suitable for development programs pursuing different policy objectives, rather than when individual investment projects are evaluated [1].

Thus, the main advantage of MCDA is that it overcomes most of the measurement problems of the one-criterion method, which requires all cost categories and benefits to be expressed in monetary units. In place of monetary values, MCDA employs a system of relative weights, whereby both quantitative and qualitative effects can be evaluated [2].

The final solution in the multi criteria method is a compromise between the criteria. This method gives a more complete picture of the analysed options, but the final result of the analysis is not as unequivocal as in the single-criterion method [2].

A separate issue, also requiring a primary study, was the identification of the main criteria (low-carbon energy capex project impact areas) and the sub-criteria in the areas. The criterion for selecting the areas of economy, society, and environment was the sustainable development paradigm as predominant in shaping energy policy at the European Union and national levels. Hence, impacts were also identified based on literature review, in particular strategic documents as well as EU directives and national documents with reference to sustainable development, and documents of national and international organizations promoting sustainable development or focusing on development or RES or a specific energy technology. The analysed impacts in the economic, social and environmental spheres can be divided into [4]: macroeconomic, distribution, cross-sectoral, connected with the power system. In the following original study, all types of impacts were analysed; the only eligibility criterion was the relevance to social well-being defined in the context of the sustainable development paradigm.

The criteria were identified by the Delphi method. Heuristic methods, which include the Delphi method, differ fundamentally from quantitative methods. They are based on qualitative assessment of facts, intuition, and above all, on experts' own individual scheme of association. The method was first developed and applied by N. Dalkey and O. Helmer in 1963 [5]. The Delphi method is devoid of the disadvantages of traditional collective expert methods such as the dominance of one or more individuals, influence by opinions of other study participants, high pressure of the group on the participants, lack of participants' responsibility for formulated opinions, and overload with redundant or unrelated information. It is characterised by the independence of expert opinions, anonymity of judgement, multi-step procedure, and reconciliation and summation of opinions [6]. The method's multi-step procedure results from a well-planned program of successive expert surveys, interleaved – by way of feedback – with informing and sharing the experts' collective opinions. Experts are then focusing on the study subject matter rather than on achieving their own goals or promoting their own arguments. The Delphi procedure enforces the transition to the majority group, since an expert with a different opinion to that of the majority is required not only to explain but also to justify their position. In this way extremists are isolated, i.e. irreconcilable individuals who do not change their opinions. Repetition causes the degree of the discrepancy of opinions to narrow, leading to the reconciled opinion of most experts.

3. Expert identification of environmental, economic and social impacts of low carbon energy technologies using the Delphi method

A preliminary set of criteria (impacts) developed based on literature review was verified in a focus study of three experts. In the first round, eight experts – faculty members of business and/or technology colleges/universities dealing with environmental economics and power engineering (experts with no preference for a specific technology were selected) – were tasked to describe each impact, as they are usually complex and it was important to

analyse how each of them was understood by the experts before weighting and scoring them (later in the MCDA study), which would then lead to the impact's reconciled definition. Experts could also submit their own impact proposals in each area. Some of them used this opportunity.

After the first round, expert opinions on the individual impacts were compared, and additional impacts were proposed as well as differences in the assessments identified. The outcome was a concise written statement of the extent of concordances and discrepancies, and a summary of the arguments supporting the alternative positions. In the second round, experts were provided with a supplemented list of impacts together with a discussion of the discrepancies, with a suggestion for the respondents to follow the majority opinion. The second round ended the study. Listed in Tab. 1 are the impacts finally identified in the above-mentioned areas. A single list was compiled for all technologies, including also each technology-specific impact.

4. Assessment of the economic, social and environmental effects of the development of low-carbon energy technologies

The purpose of this study was to determine the validity (ranking) of low-carbon energy generation technologies in the context of their impact on social well-being within the meaning of the sustainable development paradigm.

AREA Impact in the area	#
ECONOMY	
Impact on GDP	1
Impact on trade balance	2
Impact on innovation and competitiveness of the economy	3
Impact on unemployment rate (in case of significant imbalance in the labour market)	4
Impact on the enterprise and public sectors' energy security (e.g. by the development of local power systems and power self-generation in RES for business purposes, diversification of energy sources, impact on independence from fossil fuel price volatility, lack of power generation stability in some RES technologies)	5
Impact on even development of regions	6
Land occupancy (e.g. due to their low efficiency, the power output per unit of occupied land is low for most RES technologies)	7
SOCIETY	
Levelling social inequalities (e.g. development of distributed RES energy generation drives, rural areas' activation).	8
Shaping a new energy culture related to, inter alia, energy conservation through the development of RES prosumer sector	9
Impact on households' energy security (as in the case of enterprises and e.g. by the development of RES prosumer sector)	10
ENVIRONMENT	
Impact on greenhouse gas emissions causing climate change	11
Impact on air pollution (particulate matter, SO _x , NO _x and others) emissions with adverse effects on the human, plant and animal health and life, deterioration of building materials	12
Impact on the volume of waste produced	13
Impact on resource efficiency of the economy	14
Interference in the landscape	15
Risk of failures and accidents (e.g. of nuclear reactor, environmental pollution during long-term storage of radioactive waste)	16

Tab. 1. Economic, social and environmental impacts of low-carbon power generation, own compilation

A survey of 15 experts, faculty members of business and/or technology colleges/universities, specialists in environmental and energy economics (like in the Delphi study, experts with no preference for a specific technology were selected) was conducted, and they were asked to fill in a prepared sheet. Weights were used to determine each criterion's relevance. The experts were asked to assign their own weights to each criterion so that the weights would add up to one, and to assign weights to each sub-criterion within the separated areas, with the sub-criterion weights also adding up to one within the respective area. These weights were averaged and are presented in Tab. 2.

The experts assigned the highest weights to the area (criterion) of environment (0.39), followed by economy (0.36) and society (0.25). Local weights within the areas are generally similar. The largest differences in the weights of individual sub-criteria occurred in the area of environment. The highest weight was attributed to emissions other than greenhouse gases (0.26), followed by greenhouse gas emissions (0.24), and the lowest weights to power plant failure risk (0.11). In the area of economy, the biggest difference was between the sub-criteria energy security of enterprises (0.21) and innovation along with competitiveness of the economy (0.19) and the impact on the unemployment rate (0.10). Only three sub-criteria were distinguished in the area of society, and each was assigned a weight close to 0.3. A separate scale was applied to technologies, to determine their impacts on a particular criterion (without reference to the other technologies). This effect could be either positive or negative, and was defined on a scale from -4 to 4 (where -4 denoted the maximum negative impact, 0 – no impact, and 4 the maximum positive impact). The scale for impact assessment is presented in Tab. 3.

At the last stage of the analysis, an attempt was made to develop a ranking of energy technologies. The experts evaluated the impact of each technology on each intermediate criterion. These expert evaluations were averaged and are presented in Tab. 4.

It can be concluded from the analysis of the average scoring assigned by the experts in each area that the technologies that contribute the most to social well-being through the achievement of sustainable development objectives in the area of economy are biomass and biogas technologies, which were assigned 11.3 points; followed by solar (photovoltaics) with 9.9 points, onshore wind (7.4 points), offshore wind (5.9 points) and, in the last place, nuclear technology (4.4 points). The highest scores were attributed to such sub-criteria as energy security of enterprises and innovation and competitiveness of the economy. It turns out that according to the experts, developing in principle any low-carbon energy technology will have a significant positive impact on these sub-criteria. This seems to be in line with the intuitive understanding of these phenomena, i.e. the development of any energy technology, other than the dominant coal-fired power generation, leads to increased energy security due to the diversification of energy sources, and to increased innovation and competitiveness of the economy. All low-carbon technologies also have a positive impact on GDP, trade balance, and unemployment rate, although the power of influence depends to a large extent on technology. The highest positive impact

Criteria / sub-criteria	local weights	global weights
Economy	0.3573	0.3573
GDP	0.1467	0.0524
Trade balance	0.1067	0.0381
Innovation and competitiveness of the economy	0.1933	0.0691
Unemployment rate	0.1000	0.0357
Energy security of enterprises	0.2133	0.0762
Even development of regions	0.1033	0.0369
Land occupancy	0.1367	0.0488
Society	0.2507	0.2507
Levelling social inequalities	0.2933	0.0735
Shaping a new energy culture	0.3600	0.0902
Energy security of households	0.3467	0.0869
Environment	0.3907	0.3907
Emission of greenhouse gases	0.2367	0.0925
Emission of other air pollutants	0.2633	0.1029
Volume of waste produced	0.1233	0.0482
Resource efficiency of the economy	0.1400	0.0547
Interference in the landscape	0.1300	0.0508
Risk of failure/ accident	0.1067	0.0417

Tab. 2. Average weights assigned by experts, own compilation

Impact assessment: linguistic	Impact evaluation: scoring
very high positive impact	4
high positive impact	3
average positive impact	2
minor positive impact	1
no impact	0
minor negative impact	-1
average negative impact	-2
high negative impact	-3
very high negative impact	-4

Tab. 3. Scale for impact scoring evaluation, own compilation

on GDP is the development of biomass, biogas and photovoltaic technologies (2 points each), followed by onshore wind (1.27 points) and offshore wind (1.2 points) and clearly distanced nuclear technology in last place with 0.73 points. Photovoltaic technologies (0.87 points) and biomass and biogas (0.8 points) have the highest impact on trade balance. Wind technologies are ranked second, and again in last place, with a score close to zero (0.07 points), is nuclear power. The ranking looks the same for the next sub-criterion, which is the impact on the unemployment rate. Biomass and biogas technologies clearly predominate as those with the highest job creation potential. Also, photovoltaic and wind technologies land have shown significant positive impacts. Nuclear power was ranked last, scoring close to zero. As far as the impact on even regional development is concerned, biomass and biogas technologies are again in first place, which is intuitively understandable. Ranked second were photovoltaics, followed by onshore wind. Offshore wind and nuclear

Criterion	Energy technology				
	Onshore wind	Offshore wind	Biomass and biogas	Solar	Nuclear
Economy	7.4	5.867	11.333	9.867	4.4
GDP	1.267	1.200	2.000	2.000	0.733
Trade balance	0.400	0.533	0.800	0.867	0.067
Innovation and competitiveness of the economy	1.733	1.800	1.667	2.333	1.867
Unemployment rate	1.000	0.467	1.933	1.267	0.333
Energy security of enterprises	2.200	1.667	2.800	2.133	2.600
Even development of regions	1.133	0.267	2.133	1.467	-0.200
Land occupancy	-0.333	-0.067	0.000	-0.200	-0.067
Society	4.866	2.4	7.2	7.801	1.067
Levelling social inequalities	1.533	0.467	2.467	2.267	-0.200
Shaping a new energy culture	1.933	1.400	2.533	2.867	0.000
Energy security of households	1.400	0.533	2.200	2.667	1.267
Environment	6.067	7.734	3.4	7.4	-3.133
Emission of greenhouse gases	2.467	2.400	1.533	2.000	2.533
Emission of other air pollutants	2.333	2.267	1.400	2.133	1.667
Volume of waste produced	1.333	1.400	0.067	0.600	-2.800
Resource efficiency of the economy	2.267	2.400	2.133	2.667	1.400
Interference in the landscape	-2.733	-1.200	-1,000	-0.533	-2.133
Risk of failure/ accident	0.400	0.467	-0.733	0.533	-3.800
TOTAL	18.333	16.001	21.933	25.068	2.334

Tab. 4. Averaged scoring evaluation of energy technology, own compilation

technologies scored near zero. As regards the land occupancy, every technology, except for biomass and biogas with a score of 0 indicating no effect, was attributed a negative impact. In this case, the scoring may be surprising, since the experts attributed the highest negative impact to nuclear power, despite the clear description of the sub-criterion indicating RES generation technologies as characterized by low energy yield per unit of occupied land (see Tab. 1), quite the opposite to nuclear power. All RES technologies were generally assigned very small negative impacts, whereas for nuclear power this is a significantly higher negative impact.

In the society area, first are photovoltaics with 7.8 points, second biomass and biogas with 7.2 points, and third – onshore wind with 4.9 points. Offshore wind technology, with 2.4 points, is significantly less important. Ranked the lowest was, again, nuclear power with 1.07 points. Almost the same ranking applies to each sub-criterion within this area, i.e. photovoltaics, biomass and biogas, and onshore wind have a significant positive effect on levelling social inequalities (it seems understandable, since these projects can be located in rural areas country-wide), developing a new energy culture, and energy security of households. Regarding the last two sub-criteria, it seems that this may be due to the development of prosumer generation based on these technologies. Therefore, the significantly lower impact of offshore wind and the lowest impact of nuclear power are not surprising (with no impact on the shaping of a new energy culture and even slightly increasing social inequalities).

In the area of environment, the expert survey results indicate significant, sometimes even diametric, differences between the technologies in question. All RES technologies have a positive impact,

offshore wind with 7.73 points in first place closely followed by photovoltaics with 7.74 points, and onshore wind with 6.1 points. Much lower, though still positive, is the impact of biomass and biogas technologies scoring 3.4 points. Nuclear power has a strong negative impact with -3.1 points. The experts attributed the greatest positive impact in the area of environment to such sub-criteria as resource efficiency of the economy, reduction of greenhouse gas emissions and emission of other air pollutants such as particulate matter, SO_x , NO_x and others. With this, the development of, in principle each, low-carbon technology will have a significant positive impact on these sub-criteria, which is obvious, and is the main reason why these technologies are implemented. The development of any low-carbon technology replaces the dominant coal-fired power generation, leading to higher air quality. As regards greenhouse gas emissions, first place was taken by nuclear power with 2.5 points. Just behind were onshore and offshore wind technologies (2.47 and 2.4 points, respectively), followed by photovoltaics with 2 points, and last, biomass and biogas with 1.53 points. Regarding the emission of remaining air pollutants, the ranking is slightly different, i.e. onshore wind, offshore wind, and photovoltaics fared the best with similar results (2.33, 2.3, and 2.1 points, respectively). Next in the ranking is nuclear power (1.67 points) and just behind it biomass and biogas with 1.4 points. Last place in the ranking is rightly unchanged due to the pollutant emissions in the operational phase of biomass power plants, but it is not possible to interpret the shifts in the rest of the ranking. The highest level of resource efficiency of the economy is achieved when developing photovoltaics, then offshore and onshore wind energy, followed by biomass and biogas technologies. All RES technologies were

scored more than 2 points for this factor. Nuclear power was last, with 1.4 points. This ranking seems reasonable because the three RES technologies with the highest scores do not require the use of resources in the operational phase. Biomass and biogas technology consumes renewable resources, and only nuclear power consumes a non-renewable natural resource, i.e. uranium. All technologies have a positive impact on resource efficiency of the economy compared to the currently dominant coal-based generation. Regarding the waste volume sub-criterion, the highest positive impact are offshore wind and onshore wind (1.4 and 1.3 points, respectively). A significantly lower positive impact was that of photovoltaics. The biomass and biogas impact was very small (near zero). The nuclear power impact was highly negative, and scored –2.8 points. It seems that rightly the highest three places in the ranking belong to the RES technologies, perhaps because they do not generate waste in the operational phase. The biomass and biogas position in the ranking may be doubtful, as this technology allows the use of waste from agricultural and animal production (not to mention industrial waste) and the digestate pulp from agricultural biogas plants can be used for soil fertilisation. It appears that the high negative impact attributed to nuclear power was due to the generation of long-lived radioactive waste and the not sufficiently proven safety of their long-term storage technology. The experts attributed the negative impact on landscape interventions to all low-carbon energy technologies under study. The strongest negative impact was attributed to onshore wind (–2.7 points), followed by nuclear power (–2.1 points). A lower but still negative impact was that of offshore wind (–1.2 points), followed by biomass and biogas (–1 points). Ranked the lowest, with –0.53 points, were photovoltaics. It seems that this ranking is consistent with the general perception of this impact (although there may be doubts about the position of nuclear power due to the lack of experience in this field in Poland). The last sub-criterion analysed was the risk of failure/accident. First place in terms of this risk belonged to nuclear power with –3.8 points, which denoted almost the maximum negative impact on the scale. The second in terms of the risk was biomass and biogas with –0.73 points. According to the experts, other technologies have a positive impact, and thus they reduce the risk of failure in the energy cycle compared to the currently dominant coal power generation. The impact is not high, however, ca. 0.5 on average of photovoltaics, and of offshore and onshore wind power.

5. Low-carbon energy technologies ranking by the multi-criteria method

The sum of the scores in the areas of economy, society and environment shows the following ranking of low-emission technologies: photovoltaics are first (25 points), followed by biomass (22 points), onshore wind (18 points), offshore wind (16 points) and nuclear power coming last with a surprisingly low result (2 points).

Subsequently, expert evaluations were aggregated with consideration of their weights and the synthetic value of each low-emission technology was calculated. The results are presented in Tab. 5.

Energy technology	Onshore wind	Offshore wind	Biomass and biogas	Solar	Nuclear
Synthetic value	1.373	1.177	1.537	1.783	0.500
Ranking	3	4	2	1	5

Tab. 5. Ranking of energy technologies with consideration of weights, own compilation

The scores' weighing produced the same ranking. It turned out that nuclear power had scored low compared to RES technologies. All RES technologies scored between 1.177 and 1.783, while nuclear power only 0.5.

6. Conclusions for the future

It is also important to consider capital expenses (private) in the ranking and selection of future low-carbon technologies. These expenses were indirectly included in the impact of low-carbon technologies on GDP, but a direct comparison of CAPEX trends reinforces the rating correctness. Consistency of the economic assessment (from society's point of view) with the financial assessment (from the investor's viewpoint) of low-carbon energy technologies points to minimizing the necessary public aid for the development of preferred low-carbon energy technologies (i.e. all these technologies require a state support, but the objective is to optimize its scope to achieve their goals). In the case of nuclear power, which came last in the ranking, it is important to be aware of the rising trend of private costs. This is a very unusual situation given the reduction in the cost of generation in RES sources (all RES technologies). The technology's cost reduction as it is implemented and applied on an ever-increasing scale is a well-known and studied phenomenon. The theory of economics presents two reasons that explain this phenomenon: the effect of scale and the effect of learning. It turns out, however, that none of these effects is at work in the case of nuclear technology [7]. The lack of economies of scale means that the cost per MW of installed capacity does not decrease as the plant power increases. This is because larger reactors are not simple replicas of smaller ones. They are more complex, made up of more components, often requiring a different design. In the case of nuclear power there is no learning effect either, which can be due to several reasons. Nuclear reactors are not mass-produced, and specific conditions, such as each power plant location, must be taken into account, which makes them unique. In addition, due to the slowdown or postponement of nuclear energy development programs by individual countries, the learning effect in the form of a skilled workforce has been lost.

However, the most important reason for the consistently upward trend in nuclear energy costs are ever more stringent safety regulations (such as additional equipment and safety systems) and the frequency of their amendments, which results in the need to continually adjust plans and delay the construction of already started reactors. This increase in overnight costs is estimated at 9.2% a year in the US, and at 1.7% a year in France [7].

The fact is that each generation of nuclear reactors is more expensive than the previous one. This raises the question of the nuclear power development potential and its competitive edge over alternative energy technologies. If nuclear power plants of this type (e.g. the most popular 3rd generation EPR reactor) were built more often, a cost reduction should be expected, but it is difficult to predict how big this would be. Factors that can lead to cost reductions include the transition to a modular reactor design (such solutions are underway already, e.g. in AP1000 reactor), and standardization. This second factor is more difficult to implement because usually the contracting party has specific requirements for the reactor and other country-specific safety requirements [9]. These considerations relate to the nuclear reactor technologies employed today. However, assuming technological progress, the question of whether next-generation reactors can be safer and cheaper should be answered. It seems not. This is due to the increasingly stringent safety standards and the increasing political risks associated with, for example, terrorism. Besides, the public is increasingly reluctant towards risky energy technologies (which may result from the Fukushima disaster). As has been already mentioned, the possibilities of modularization and standardization of nuclear reactors are very limited and their production series are short. This is a unique situation among energy technologies. For example, wind, solar, and coal plants are ordered by hundreds or by thousands each year, while at most several dozen nuclear power plants. These projects can be compared to other large engineering projects like bridges, airports and dams that are built on site. Experts therefore forecast a further increase in the cost of building nuclear power plants and consequently a higher cost of the energy generation [7]. This will worsen the competitive position of nuclear power with regard to alternative low-carbon technologies.

REFERENCES

1. "Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014–2020", European Commission, Brussels 2014.
2. S.G. Goldbach, S. Leleur, "Cost-Benefit Analysis (CBA) and alternative approaches from the Centre for Logistics and Goods (CLG) study of evaluation techniques", 2004.
3. T. Stypka, A. Flaga-Maryańczyk, "Możliwości stosowania zmodyfikowanej metody AHP w problemach inżynierii środowiska" [Possible applications of the modified AHP method in environmental engineering problems], *Ekonomia i Środowisko*, No. 2(57), 2016, pp. 37–53.
4. "The socio-economic benefits of solar and wind energy", IRENA and CEM, Abu Dhabi, 2014 [online], http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Socioeconomic_benefits_solar_wind.pdf [access: 31.03.2017].
5. N. Dalkey, O. Helmer, "An experimental application of the Delphi method to the use of experts", *Management Science*, No. 9 (3), 1963, pp. 458–467.
6. J. Krupowicz, "Metody heurystyczne" [Heuristic methods] [in:] "Prognozowanie gospodarcze: metody i zastosowania" [Economic forecasting: methods and applications], edited by M. Cieślak, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warsaw 2008.
7. F. Lévêque, "The Economics and Uncertainties of Nuclear Power", Cambridge University Press, Cambridge 2015.
8. M. Popkiewicz, "Rewolucja energetyczna. Ale po co?" [Energy revolution. But what for?], Wydawnictwo Sonia Draga, Katowice 2016.
9. "Reduction of Capital Costs of nuclear power plants", OECD, Paris, 2000 [online], <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2000/2088-reduction-capital-costs.pdf> [access: 31.03.2017].

Acknowledgement

This paper has been prepared as part of research projects "Valuing environmental effects in the cost-benefit analysis of low-carbon energy investments" UMO-2011/01/B/HS4/02322 and "Managing capital costs of renewable energy projects" UMO-2011/01/D/HS4/05925, implemented by Wrocław University of Economics, financed by the National Science Center.

Magdalena Ligus

Wrocław University of Economics
 e-mail: magdalena.ligus@ue.wroc.pl

Graduated as MSc in finances and investment from the Faculty of Economics of the University of Economics in Katowice (2003). She obtained her doctorate degree at Wrocław University of Economics (2007). An assistant professor at the Department of Corporate and Public Finances at Wrocław University of Economics. Her research interests focus on economic appraisal of investment in low-carbon energy sources, and in particular on evaluation of environmental externalities in such projects. Since 2009 he has been the head of postgraduate studies "Investments in renewable energy sources" at Wrocław University of Economics.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 136–141. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Ranking technologii energetyki niskoemisyjnej w kontekście stopnia realizacji celów zrównoważonego rozwoju – badanie z zastosowaniem metody wielokryterialnej (MCDA)

Autor

Magdalena Ligus

Słowa kluczowe

niskoemisyjne źródła energii, odnawialne źródła energii, energetyka jądrowa, metoda delficka, metoda wielokryterialna, zrównoważony rozwój

Streszczenie

W centrum zainteresowania autora jest ocena stopnia, w jakim pięć technologii energetyki niskoemisyjnej, mających największy potencjał rynkowy, może przyczynić się do wzrostu dobrobytu społecznego w rozumieniu koncepcji zrównoważonego rozwoju. Stosowane są metody heurystyczne. Identyfikacja istotnych kryteriów w obszarach: gospodarka, społeczeństwo, środowisko, została przeprowadzona metodą delficką. Następnie przeprowadzono badanie ankietowe eksperckie w celu uzyskania rankingu technologii energetycznych. Eksperti nadawali wagi poszczególnym obszarom oraz kryteriom, a następnie oceniali siłę i kierunek wpływu poszczególnych technologii na zidentyfikowane kryteria w ramach trzech obszarów. Wyniki wskazują, że technologie energii odnawialnej wykazują zdecydowaną przewagę nad energetyką jądrową w realizacji celów polityki zrównoważonego rozwoju. Wśród odnawialnych źródeł energii pierwsze miejsce zajmuje fotowoltaika, następnie biomasa i biogaz. Energetyka wiatrowa lądowa i morska zajmują odpowiednio – trzecie i czwarte miejsce.

Data wpływu do redakcji: 27.03.2017

Data wpływu do redakcji po recenzjach: 19.06.2017

Data akceptacji artykułu: 27.06.2017

Data publikacji online: 30.09.2017

1. Wprowadzenie

Rozwój niskoemisyjnych źródeł energii (zwłaszcza energii odnawialnej) odpowiada na wyzwania stopniowego wyczerpywania się paliw kopalnych, a także intensyfikacji efektu cieplarnianego. Polityka energetyczna na szczeblu unijnym oraz krajowym powinna uwzględniać rozwój technologii niskoemisyjnych, które w najwyższym stopniu przyczyniają się do realizacji celów zrównoważonego rozwoju w trzech wymiarach: gospodarki, społeczeństwa i środowiska.

Celem przeprowadzonego badania jest ustalenie ważności (rankingu) technologii niskoemisyjnych wytwarzania energii w kontekście ich wpływu na dobrobyt społeczny w rozumieniu paradygmatu zrównoważonego rozwoju. Pod uwagę wzięto pięć technologii (wariantów decyzyjnych) mających najwyższy potencjał wzrostowy: wiatrową morską, wiatrową lądową, słoneczną, biomasową i biogazową oraz jądrową.

2. Metodyka badania

Badanie przeprowadzono z zastosowaniem analizy wielokryterialnej (*multi criteria decision analysis*, MCDA). W przeciwieństwie do analizy jednokryterialnej, skupiającej się na pojedynczym celu, MCDA jest narzędziem służącym do analizy zbioru różnych celów, które nie mogą być zagregowane za pomocą jednej miary, którą zwykle stanowi pieniądź. Pierwszym etapem jest ustalenie zbioru kryteriów i ich względnych wag, które mają wskazywać na stopień osiągnięcia założonych celów. Następnie dokonuje się oceny każdej z możliwości ze względu

na poszczególne kryteria i dokonuje się ich szeregowania. MCDA jest odpowiednia szczególnie w przypadku programów rozwoju realizujących jednocześnie różne cele polityki, a nie gdy ocenie podlegają jednostkowe projekty inwestycyjne [1].

A zatem główną zaletą MCDA jest pokonanie większości problemów pomiarowych będących udziałem metody jednokryterialnej, która wymaga, aby wszystkie kategorie kosztów i korzyści były wyrażone w jednostkach pieniężnych. MCDA stosuje w miejsce wartości pieniężnych system względnych wag, według których mogą być ocenione zarówno efekty ilościowe, jak i jakościowe [2].

Ostateczne rozwiązanie w metodzie wielokryterialnej ma charakter kompromisu pomiędzy przyjętymi kryteriami. Metoda ta daje pełniejszy obraz analizowanych wariantów, ale ostateczny wynik analizy nie jest tak jednoznaczny jak w metodzie jednokryterialnej [2].

Odrębnym zagadnieniem, wymagającym również przeprowadzenia badania pierwotnego, była identyfikacja kryteriów głównych (obszarów oddziaływań inwestycji w niskoemisyjne źródła energii) oraz kryteriów niższego rzędu (subkryteriów) w ramach obszaru. Kryterium wyboru obszarów: gospodarka, społeczeństwo, środowisko był paradygmat zrównoważonego rozwoju jako dominujący w kształtowaniu polityki energetycznej na poziomie Unii Europejskiej i krajowym. Stąd również oddziaływania zostały zidentyfikowane na podstawie przeglądu literatury, w szczególności dokumentów strategicznych, jak i dyrektyw

unijnych oraz dokumentów na szczeblu krajowym zawierających odniesienia do zrównoważonego rozwoju oraz dokumentów organizacji krajowych i międzynarodowych wspierających zrównoważony rozwój lub koncentrujących się na rozwoju OZE, czy też konkretnej technologii energetycznej. Analizowane oddziaływania w sferze gospodarczej, społecznej i środowiskowej można podzielić na [4]: makroekonomiczne, dystrybucyjne, międzysektorowe, związane z systemem energetycznym. W poniższym badaniu autorskim wszystkie rodzaje oddziaływań były przedmiotem badania, jedynym kryterium kwalifikującym była istotność wpływu danego oddziaływania na dobrobyt społeczny definiowany w kontekście paradygmatu zrównoważonego rozwoju.

Do identyfikacji kryteriów zastosowano metodę delficką. Metody heurystyczne, do których zalicza się również metodę delficką, różnią się w sposób zasadniczy od metod ilościowych. Bazują bowiem na jakościowej ocenie faktów, na intuicji, a przede wszystkim na własnym indywidualnym schemacie skojarzeniowym ekspertów. Metoda została po raz pierwszy opracowana i zastosowana przez N. Dalkeya i O. Helmera w 1963 roku [5]. Metoda delficka pozbawiona jest wad tradycyjnych zbiorowych metod eksperckich, takich jak: dominacja jednej lub kilku indywidualności, sugerowanie się opiniami innych uczestników badania, duża presja grupy na uczestników badania, brak odpowiedzialności uczestników za formułowane opinie, niechęć do publicznej zmiany raz

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 136–141. When referring to the article please refer to the original text.

PL

zajętego stanowiska, przeciążenie zbędnymi lub niezwiązanymi z tematem informacjami. Cechuje ją natomiast niezależność opinii ekspertów, anonimowość wypowiedzianych sądów, wieloetapowość postępowania, uzgadnianie i sumowanie opinii [6].

Wieloetapowość postępowania metody jest efektem opracowania starannie zaplanowanego programu występujących po sobie ankiet kierowanych do ekspertów, przeplatanych – na zasadzie sprzężenia zwrotnego – informowaniem i podawaniem zbiorczych opinii ekspertów. Eksperti koncentrują się wówczas na przedmiocie badania, a nie na osiąganiu własnych celów czy na forsowaniu własnych argumentów.

Procedura delficka wymusza przejście do grupy większościowej, ponieważ od eksperta zajmującego pozycję odmienną od większości żąda się nie tylko wyłumaczenia, ale i uzasadnienia stanowiska. Wyodrębnia się w ten sposób ekstremistów, tzn. osoby nieprzejednane, niezmienną swych opinii. Powtórzenie powoduje, że zakres rozbieżności opinii zawęża się, doprowadzając do uzgodnionej opinii większości ekspertów.

3. Identyfikacja ekspercka środowiskowych, gospodarczych i społecznych oddziaływań technologii energetyki niskoemisyjnej z zastosowaniem metody delfickiej

Opracowany na podstawie przeglądu literatury wstępny zestaw kryteriów (oddziaływań) został poddany weryfikacji w badaniu fokusowym trzech ekspertów. W pierwszej rundzie badania ośmiu ekspertów – pracowników uczelni wyższych o profilu ekonomicznym i technicznym, zajmujących się ekonomią środowiska oraz energetyką (starano się o dobór ekspertów niewykazujących preferencji dla konkretnej technologii) – miało za zadanie opisać każde z oddziaływań, gdyż zwykle są to oddziaływania złożone i było ważne, aby przed nadaniem wagi i punktów (w kolejnym etapie badania przeprowadzonego metodą wielokryterialną, MCDA) zanalizować, jak każde z oddziaływań jest rozumiane przez ekspertów, co następnie miało doprowadzić do uzgodnionej definicji oddziaływania. Eksperti mieli również możliwość zgłoszenia własnych propozycji oddziaływań w każdym z obszarów. Niektórzy z nich korzystali z tej możliwości.

Po przeprowadzeniu pierwszej rundy zestawiono opinie ekspertów dotyczące poszczególnych oddziaływań oraz zaproponowano dodatkowe oddziaływania i zidentyfikowano zaistniałe rozbieżności w ocenie. Rezultatem były zwięzłe pisemne określenia zakresów zbieżności i rozbieżności oraz streszczenia argumentów podtrzymujących alternatywne punkty widzenia. W drugiej rundzie przesłano ekspertom uzupełnioną listę oddziaływań wraz z omówieniem zaistniałych rozbieżności, z sugestią, aby respondenci zgodzili się z opinią większości. Druga runda zakończyła badanie.

W tab. 1 przedstawiono finalną listę zidentyfikowanych oddziaływań w wymienionych powyżej obszarach. Zbudowano jedną listę dla wszystkich technologii, obejmującą jednak również specyficzne dla poszczególnych technologii oddziaływania.

OBSZAR Oddziaływanie w ramach obszaru	Nr
GOSPODARKA	
Wpływ na PKB	1
Wpływ na bilans handlowy	2
Wpływ na innowacyjność i konkurencyjność gospodarki	3
Wpływ na stopę bezrobocia (oddziaływanie istotne w przypadku znacznej nierównowagi na rynku pracy)	4
Wpływ na bezpieczeństwo energetyczne sektora przedsiębiorstw oraz sektora publicznego (np. przez rozwój lokalnych systemów energetycznych i autoprodukcji energii z OZE na cele biznesowe, dywersyfikację źródeł energii, wpływ na uniezależnienie się od fluktuacji cenowych paliw kopalnych, brak stabilności produkcji energii w niektórych technologiach OZE)	5
Wpływ na równomierny rozwój regionów	6
Zajęcie terenu (np. ze względu na niską sprawność wskaźnik energii uzyskiwanej na jednostkę zajętego gruntu jest niski w przypadku większości technologii OZE)	7
SPOŁECZEŃSTWO	
Niwelowanie nierówności społecznych (np. rozwój energetyki rozproszonej OZE powoduje aktywizację obszarów wiejskich)	8
Kształtowanie nowej kultury energetycznej związanej m.in. z poszanowaniem energii poprzez rozwój energetyki prosumenckiej OZE	9
Wpływ na bezpieczeństwo energetyczne gospodarstw domowych (jak w przypadku przedsiębiorstw oraz np. przez rozwój energetyki prosumenckiej OZE)	10
ŚRODOWISKO	
Wpływ na emisje gazów cieplarnianych powodujących zmiany klimatyczne	11
Wpływ na emisje zanieczyszczeń powietrza (pyły, SO _x , NO _x i inne) powodujących negatywne skutki dla zdrowia i życia ludzi, flory i fauny, niszczenie materiałów budowlanych	12
Wpływ na ilość wytwarzanych odpadów	13
Wpływ na zasobooszczędność gospodarki	14
Ingerencja w krajobraz	15
Ryzyko awarii i wypadków (np. reaktora jądrowego, skażenia środowiska podczas długotrwałego składowania odpadów radioaktywnych)	16

Tab. 1. Gospodarcze, społeczne i środowiskowe oddziaływania energetyki niskoemisyjnej, opracowanie własne

4. Ocena efektów gospodarczych, społecznych i środowiskowych rozwoju technologii energetyki niskoemisyjnej

Celem przeprowadzonego badania było ustalenie ważności (rankingu) technologii niskoemisyjnych wytwarzania energii w kontekście ich wpływu na dobrobyt społeczny w rozumieniu paradygmatu zrównoważonego rozwoju.

Przeprowadzono badanie ankietowe wśród 15 ekspertów, pracowników naukowych uczelni o profilu ekonomicznym oraz technicznym, specjalistów z dziedziny ekonomii środowiska oraz energetyki (tak jak w przypadku badania delfickiego starano się pozyskać ekspertów niewykazujących preferencji dla konkretnych technologii energetycznych) i poproszono ich o wypełnienie przygotowanego arkusza. Do określenia stopnia ważności poszczególnych kryteriów (celów) wykorzystano wagi. Eksperti zostali poproszeni o wskazanie własnych wag dla poszczególnych kryteriów, tak aby wagi sumowały się do jedności, oraz o nadanie wag poszczególnym subkryteriom w ramach wyodrębnionych obszarów, przy czym wagi subkryteriów również powinny sumować się do jedności w ramach danego obszaru. Wagi te zostały uśrednione i zaprezentowano je w tab. 2.

Najwyższą wagę eksperci przypisali obszarowi (kryterium): środowisko (0,39), następnie gospodarce (0,36) i społeczeństwu (0,25). W ramach obszarów wagi lokalne są generalnie zbliżone. Największe różnice wag poszczególnych subkryteriów występują w obszarze: środowisko. Najwyższą

wagę przypisano emisji innych poza gazami cieplarnianymi zanieczyszczeń powietrza (0,26), następnie emisji gazów cieplarnianych (0,24), a najniższą ryzyku awarii elektrowni (0,11). W obszarze: gospodarka największą różnicą występuje pomiędzy subkryterium: bezpieczeństwo energetyczne przedsiębiorstw (0,21) oraz innowacyjność i konkurencyjność gospodarki (0,19) a wpływem na stopę bezrobocia (0,10). W obszarze: społeczeństwo wyróżniono jedynie trzy subkryteria i każdemu przypisano wagę zbliżoną do 0,3.

Dla technologii zastosowano odrębną skalę, w której określano wpływ danej technologii energetycznej na określone kryterium (bez odniesienia do pozostałych technologii). Wpływ ten mógł być zarówno pozytywny, jak i negatywny, a określano go na skali od -4 do 4 (gdzie -4 oznaczało maksymalny wpływ negatywny, 0 – brak wpływu, a 4 maksymalny wpływ pozytywny). Skalę dla oceny oddziaływań przedstawiono w tab. 3. W ostatnim etapie analizy podjęto próbę stworzenia rankingu technologii energetycznych. Eksperti ocenili wpływ danej technologii na każdy z kryteriów pośrednich. Oceny ekspertów zostały uśrednione i zaprezentowano je w tab. 4.

Analizując średnie oceny punktowe przypisane przez ekspertów w poszczególnych obszarach, można stwierdzić, że technologie, które w najwyższym stopniu przyczyniają się do wzrostu dobrobytu społecznego poprzez realizację celów zrównoważonego rozwoju w obszarze: gospodarka, to technologie biomasowe i biogazowe, którym przypisano

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 136–141. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Kryteria/subkryteria	wagi lokalne	wagi globalne
Gospodarka	0,3573	0,3573
PKB	0,1467	0,0524
Bilans handlowy	0,1067	0,0381
Innowacyjność i konkurencyjność gospodarki	0,1933	0,0691
Stopa bezrobocia	0,1000	0,0357
Bezpieczeństwo energetyczne przedsiębiorstw	0,2133	0,0762
Równomierny rozwój regionów	0,1033	0,0369
Zajęcie terenu	0,1367	0,0488
Społeczeństwo	0,2507	0,2507
Niwelowanie nierówności społecznych	0,2933	0,0735
Kształtowanie nowej kultury energetycznej	0,3600	0,0902
Bezpieczeństwo energetyczne gosp. domowych	0,3467	0,0869
Środowisko	0,3907	0,3907
Emisja gazów cieplarnianych	0,2367	0,0925
Emisja innych zanieczyszczeń powietrza	0,2633	0,1029
Ilość wytwarzanych odpadów	0,1233	0,0482
Zasobooszczędność gospodarki	0,1400	0,0547
Ingerencja w krajobraz	0,1300	0,0508
Ryzyko awarii/wypadku	0,1067	0,0417

Tab. 2. Średnia wag podanych przez ekspertów, opracowanie własne

11,3 pkt; słoneczna (fotowoltaika) zajmuje drugie miejsce z wynikiem 9,9 pkt, trzecie miejsce zajmuje technologia wiatrowa lądowa (7,4 pkt), następnie wiatrowa morska (5,9 pkt) i na ostatnim miejscu technologia jądrowa (4,4 pkt). Największy udział punktowy przypisano takim subkryteriom jak: bezpieczeństwo energetyczne przedsiębiorstw oraz innowacyjność i konkurencyjność gospodarki. Okazuje się, że według ekspertów rozwijanie w zasadzie każdej z technologii energetyki niskoemisyjnej będzie miało znaczący pozytywny wpływ na wymienione subkryteria. Wydaje się

to zgodne z intuicyjnym rozumieniem tych zjawisk, tj. rozwijanie każdej technologii energetycznej, poza dominującą energetyką węglową, prowadzi do wzrostu bezpieczeństwa energetycznego w związku z dywersyfikacją źródeł energii oraz do wzrostu innowacyjności i konkurencyjności gospodarki. Wszystkie technologie niskoemisyjne mają również pozytywny wpływ na PKB, bilans handlowy oraz stopę bezrobocia, choć siła wpływu jest już wybitnie uzależniona od technologii. Najwyższy pozytywny wpływ na PKB wywiera rozwój technologii biomasowych i biogazowych oraz

Ocena wpływu: lingwistyczna	Ocena wpływu: punktowa
wpływ bardzo duży pozytywny	4
wpływ duży pozytywny	3
wpływ średni pozytywny	2
wpływ nieznaczny pozytywny	1
brak wpływu	0
wpływ nieznaczny negatywny	-1
wpływ średni negatywny	-2
wpływ duży negatywny	-3
wpływ bardzo duży negatywny	-4

Tab. 3. Skala dla oceny punktowej oddziaływań, opracowanie własne

fotowoltaiki (po 2 punkty), drugie miejsce zajmują energetyka wiatrowa lądowa (1,27 pkt) oraz morska (1,2 pkt) i wyraźnie zdystansowana technologia jądrowa na ostatnim miejscu z wynikiem 0,73 pkt. Najwyższy wpływ na poprawę bilansu handlowego mają technologie fotowoltaiczna (0,87 pkt) oraz biomasowe i biogazowe (0,8 pkt). Technologie wiatrowe zajmują drugie miejsce i znowu na ostatnim miejscu, z wynikiem bliskim zera (0,07 pkt), energetyka jądrowa. Ranking wygląda tak samo, jeśli chodzi o kolejne subkryterium, jakim jest wpływ na stopę bezrobocia. Wyraźnie dominują technologie biomasowe i biogazowe jako mające najwyższy potencjał tworzenia miejsc pracy. Istotny pozytywny wpływ w tym zakresie wykazują również technologie fotowoltaiczna i wiatrowa lądowa. Energetyka jądrowa zajmuje ostatnie miejsce z wynikiem bliskim zera. Jeśli chodzi o wpływ na równomierny rozwój regionów, technologie biomasowe i biogazowe znowu zdecydowanie zajmują pierwsze miejsce,

Kryterium	Technologia energetyczna				
	Wiatrowa lądowa	Wiatrowa morska	Biomasa i biogazowa	Słoneczna	Jądrowa
Gospodarka	7,4	5,867	11,333	9,867	4,4
PKB	1,267	1,200	2,000	2,000	0,733
Bilans handlowy	0,400	0,533	0,800	0,867	0,067
Innowacyjność i konkurencyjność gospodarki	1,733	1,800	1,667	2,333	1,867
Stopa bezrobocia	1,000	0,467	1,933	1,267	0,333
Bezpieczeństwo energetyczne przedsiębiorstw	2,200	1,667	2,800	2,133	2,600
Równomierny rozwój regionów	1,133	0,267	2,133	1,467	-0,200
Zajęcie terenu	-0,333	-0,067	0,000	-0,200	-1,000
Społeczeństwo	4,866	2,4	7,2	7,801	1,067
Niwelowanie nierówności społecznych	1,533	0,467	2,467	2,267	-0,200
Kształtowanie nowej kultury energetycznej	1,933	1,400	2,533	2,867	0,000
Bezpieczeństwo energetyczne gospodarstw domowych	1,400	0,533	2,200	2,667	1,267
Środowisko	6,067	7,734	3,4	7,4	-3,133
Emisja gazów cieplarnianych	2,467	2,400	1,533	2,000	2,533
Emisja innych zanieczyszczeń powietrza	2,333	2,267	1,400	2,133	1,667
Ilość wytwarzanych odpadów	1,333	1,400	0,067	0,600	-2,800
Zasobooszczędność gospodarki	2,267	2,400	2,133	2,667	1,400
Ingerencja w krajobraz	-2,733	-1,200	-1,000	-0,533	-2,133
Ryzyko awarii/wypadku	0,400	0,467	-0,733	0,533	-3,800
SUMA	18,333	16,001	21,933	25,068	2,334

Tab. 4. Uśrednione wartości punktowe ocen technologii energetycznych, opracowanie własne

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 136–141. When referring to the article please refer to the original text.

PL

co jest intuicyjnie zrozumiałe. Na drugim miejscu plasuje się fotowoltaika, następnie wiatrowa lądowa. Technologie wiatrowa morska oraz jądrowa osiągnęły wynik bliski zera. Jeśli chodzi o zajęcie terenu każdej z technologii, poza biomasą i biogazem z wynikiem 0 pkt, oznaczającym brak wpływu, przypisano wpływ negatywny. W tym wypadku rozkład punktów może być zaskakujący, gdyż najwyższy ujemny wpływ eksperci przypisali energetyce jądrowej, pomimo wyraźnego opisu subkryterium wskazującego na technologie energetyki opartej na odnawialnych źródłach energii jako charakteryzujących się niskim wskaźnikiem uzysku energii na jednostkę zajętego terenu (patrz tab. 1), odwrotnie niż energetyka jądrowa. Wszystkim technologiom OZE przypisano generalnie bardzo niewielki ujemny wpływ, podczas gdy dla energetyki jądrowej jest to wpływ zdecydowanie wyższy negatywny.

W obszarze: społeczeństwo pierwsze miejsce z wynikiem 7,8 pkt zajmuje fotowoltaika, drugie technologie biomasowe i biogazowe z wynikiem 7,2 pkt, trzecie – wiatrowa lądowa z wynikiem 4,9 pkt. Wyraźnie mniejsze znaczenie ma technologia wiatrowa morska, z wynikiem 2,4 pkt. Na ostatnim miejscu znalazła się znowu energetyka jądrowa z wynikiem 1,07 pkt. Niemal taki sam ranking obowiązuje dla każdego subkryterium w ramach tego obszaru, tj. technologie fotowoltaiczna, biomasowe i biogazowe oraz energetyka wiatrowa lądowa wywierają istotny pozytywny wpływ na niwelowanie nierówności społecznych (wydaje się to zrozumiałe ze względu na możliwość lokowania inwestycji na obszarach wiejskich na terytorium całego kraju), kształtowanie nowej kultury energetycznej oraz bezpieczeństwo energetyczne gospodarstw domowych. W odniesieniu do dwóch ostatnich subkryteriów wydaje się, że może za to odpowiadać rozwój energetyki prosumenckiej opartej na tych technologiach energetycznych. W związku z powyższym nie dziwi znacząco niższy wpływ na wymienione czynniki energetyki wiatrowej morskiej oraz najniższy energetyki jądrowej (wykazującej brak wpływu na kształtowanie nowej kultury energetycznej oraz nawet w niewielkim stopniu pogłębiającej nierówności społeczne).

W obszarze: środowisko wyniki badania eksperckiego wskazują na znaczące, czasem wręcz diametralne różnice pomiędzy rozpatrywanymi technologiami. Wszystkie technologie oparte na odnawialnych źródłach energii wykazują wpływ pozytywny, przy czym na pierwszym miejscu plasuje się energetyka wiatrowa morska, z sumą 7,73 pkt, tuż za nią fotowoltaika z wynikiem 7,4 pkt, trzecie miejsce zajmuje energetyka wiatrowa lądowa z wynikiem 6,1 pkt. Dużo niższy, choć nadal pozytywny wpływ wykazuje energetyka biomasowa i biogazowa z wynikiem 3,4 pkt. Energetyka jądrowa wykazuje silny wpływ negatywny z wynikiem –3,1 pkt. Największe oddziaływanie pozytywne w obszarze: środowisko eksperci przypisali takim subkryteriom jak zasobooszczędność gospodarki, zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych oraz emisji innych zanieczyszczeń powietrza, takich jak pyły, SO_x, NO_x i inne. Przy tym rozwijanie

w zasadzie każdej z technologii energetyki niskoemisyjnej będzie miało znaczący pozytywny wpływ na wymienione subkryteria, co jest oczywiste, i jest podstawowym powodem, dla którego te technologie są wdrażane. Rozwijanie każdej technologii energetyki niskoemisyjnej zastępuje dominującą energetykę węglową, co prowadzi do osiągnięcia wyższej jakości powietrza atmosferycznego. W odniesieniu do emisji gazów cieplarnianych pierwsze miejsce zajmuje energetyka jądrowa, z wynikiem 2,5 pkt. Tuż za nią plasują się: energetyka wiatrowa lądowa i morska (odpowiednio 2,47 pkt oraz 2,4 pkt), kolejne miejsce zajmuje fotowoltaika z wynikiem 2 pkt i na ostatnim miejscu technologie biomasowe i biogazowe z wynikiem 1,53 pkt. W odniesieniu do emisji pozostałych zanieczyszczeń powietrza ranking jest nieco inny, tj. technologie wiatrowa lądowa, morska oraz fotowoltaika osiągnęły najwyższy, zbliżony wynik (odpowiednio 2,33 pkt; 2,3 pkt oraz 2,1 pkt). Następna w rankingu jest energetyka jądrowa (1,67 pkt) i tuż za nią biomasowa i biogazowa z wynikiem 1,4 pkt. Ostatnie miejsce w rankingu słusznie pozostaje niezmiennione, ze względu na występowanie emisji zanieczyszczeń w fazie operacyjnej elektrowni biomasowych, natomiast nie do końca możliwa jest interpretacja przesunięć na pozostałych miejscach rankingu. Największy stopień zasobooszczędności gospodarki osiągnął przy rozwijaniu fotowoltaiki, następnie energetyki wiatrowej morskiej i lądowej, kolejne miejsce zajmują technologie biomasowe i biogazowe. Wszystkie technologie OZE uzyskały ponad 2 pkt w odniesieniu do tego czynnika. Ostatnie miejsce, z wynikiem 1,4 pkt, zajmuje energetyka jądrowa. Ranking ten wydaje się zasadny ze względu na to, że trzy technologie OZE z najwyższą punktacją nie wymagają użycia zasobów w fazie operacyjnej. Energetyka biomasowa i biogazowa wymaga użycia zasobów odnawialnych, a jedynie energetyka jądrowa wymaga użycia nieodnawialnego zasobu przyrody, jakim jest uran. Wszystkie technologie wykazują pozytywny wpływ na zasobooszczędność gospodarki w porównaniu z dominującą obecnie energetyką opartą na węglu. W odniesieniu do subkryterium ilość wytwarzanych odpadów najwyższy pozytywny wpływ notują energetyka wiatrowa morska i lądowa (odpowiednio 1,4 pkt oraz 1,3 pkt). Znacznie niższy pozytywny wpływ wykazuje fotowoltaika. Bardzo niewielki (bliski zera) wpływ wykazuje energetyka biomasowa i biogazowa. Energetyka jądrowa wykazuje wysoki negatywny wpływ, z wynikiem –2,8 pkt. Wydaje się, że słusznie najwyższe trzy miejsca w rankingu zajmują wskazane technologie OZE, być może dlatego, iż nie generują odpadów w fazie operacyjnej. Można mieć wątpliwości odnośnie usytuowania

w rankingu energetyki biomasowej i biogazowej, gdyż pozwala na zagospodarowanie odpadów z produkcji rolnej i zwierzęcej (nie wspominając o odpadach przemysłowych), a pulpa pofermentacyjna biogazowni rolniczych może być wykorzystana na cele nawozowe. Wydaje się, że wysoki negatywny wpływ przypisano energetyce jądrowej ze względu na wytwarzanie odpadów radioaktywnych o długim okresie życia oraz na nie do końca sprawdzoną w odniesieniu do bezpieczeństwa technologię ich długoterminowego składowania. Eksperci przypisali negatywny wpływ w odniesieniu do ingerencji w krajobraz wszystkim analizowanym technologiom energetyki niskoemisyjnej. Najsilniejszy negatywny wpływ przypisano energetyce wiatrowej lądowej (–2,7 pkt), zaraz za nią plasuje się energetyka jądrowa (–2,1 pkt). Niższy, lecz nadal negatywny wpływ wykazuje energetyka wiatrowa morska (–1,2 pkt), następnie biomasowa i biogazowa (–1 pkt). Na ostatnim miejscu, z wynikiem –0,53 pkt, plasuje się fotowoltaika. Wydaje się, że ranking ten jest zgodny z powszechnym postrzeganiem tego oddziaływania (choć można mieć wątpliwości odnośnie usytuowania energetyki jądrowej ze względu na brak doświadczeń w tym zakresie w Polsce). Ostatnim analizowanym subkryterium było ryzyko awarii/wypadku. Pierwsze miejsce pod względem zagrożenia zajmuje energetyka jądrowa z wynikiem –3,8 pkt, co oznacza niemal maksymalny negatywny wpływ na zastosowanej skali. Drugie miejsce pod względem stopnia zagrożenia zajmuje energetyka biomasowa i biogazowa z wynikiem –0,73 pkt. Pozostałe technologie według ekspertów wykazują pozytywny wpływ, a zatem zmniejszenie ryzyka awarii w cyklu energetycznym w porównaniu z dominującą obecnie energetyką węglową. Wpływ tej jednak nie jest wysoki, ze średnią w okolicy 0,5 pkt dla fotowoltaiki oraz energetyki wiatrowej morskiej i lądowej.

5. Ranking technologii energetyki niskoemisyjnej z zastosowaniem metody wielokryterialnej

Suma punktów uzyskana w obszarach: gospodarka, społeczeństwo, środowisko wskazuje na następujący ranking technologii energetyki niskoemisyjnej: fotowoltaika zajmuje pierwsze miejsce (25 pkt), biomasowa miejsce drugie (22 pkt), trzecie miejsce energetyka wiatrowa lądowa (18 pkt), czwarte wiatrowa morska (16 pkt) i ostatnie miejsce energetyka jądrowa z zaskakująco niskim wynikiem (2 pkt).

Następnie oceny ekspertów zostały zsumowane z uwzględnieniem wag i obliczono syntetyczną wartość oceny każdej z technologii energetyki niskoemisyjnej. Wyniki zaprezentowano w tab. 5.

Po zważeniu punktów uzyskano ten sam ranking. Okazuje się, że energetyka jądrowa

Technologia energetyczna	Wiatrowa lądowa	Wiatrowa morska	Biomasowa i biogazowa	Słoneczna	Jądrowa
Wartość syntetyczna	1,373	1,177	1,537	1,783	0,500
Ranking	3	4	2	1	5

Tab. 5. Ranking technologii energetycznych z uwzględnieniem wag, opracowanie własne

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 136–141. When referring to the article please refer to the original text.

PL

uzyskała również niski wynik w porównaniu z technologiami opartymi na odnawialnych źródłach energii. Wszystkie technologie OZE uzyskały wynik w zakresie 1,177–1,783, podczas gdy energetyka jądrowa jedynie 0,5.

6. Wnioski na przyszłość

W ramach rankingu i wyboru przyszłych technologii energetyki niskoemisyjnej należy również zwrócić uwagę na koszty inwestycyjne (prywatne). Koszty te zostały pośrednio ujęte w ramach wpływu technologii energetyki niskoemisyjnej na PKB, jednak bezpośrednie porównanie trendów kosztów inwestycyjnych ugruntowuje prawdziwość przedstawionego rankingu. Zgodność oceny ekonomicznej (z punktu widzenia społecznego) z oceną finansową (z punktu widzenia inwestora) technologii energetyki niskoemisyjnej wskazuje na minimalizowanie koniecznej pomocy publicznej dla rozwoju preferowanych technologii energetyki niskoemisyjnej (tj. wszystkie analizowane technologie wymagają wsparcia ze strony państwa, jednak chodzi o optymalizowanie zakresu tegoż wsparcia dla uzyskania zakładanych celów). W przypadku energetyki jądrowej, która w rankingu zajęła ostatnie miejsce, należy mieć świadomość wzrastającego trendu kosztów prywatnych. Jest to sytuacja wybitnie nietypowa, biorąc pod uwagę obniżanie się kosztów produkcji energii ze źródeł odnawialnych (wszystkich technologii OZE). Jest dobrze znanym i zbadanym zjawiskiem obniżania się kosztów technologii w miarę jej wdrażania i stosowania na coraz większą skalę. Teoria ekonomii przedstawia dwa powody, które tłumaczą to zjawisko: efekt skali i efekt uczenia się. Okazuje się jednak, że żaden z tych efektów nie działa w przypadku technologii jądrowej [7]. Brak ekonomii skali oznacza, że koszt na MW mocy zainstalowanej nie zmniejsza się w miarę jej zwiększania mocy elektrowni. Dzieje się tak dlatego, że większe reaktory nie są prostymi replikami mniejszych. Są bardziej skomplikowane, złożone z większej liczby komponentów, wymagają często innego projektu. W przypadku energetyki jądrowej nie obserwuje się również efektu uczenia się, co może wynikać z kilku przyczyn. Reaktory jądrowe nie są produkowane masowo, należy również brać pod uwagę specyficzne uwarunkowania, np. lokalizacyjne każdej elektrowni, co powoduje, że są to produkty unikatowe. Ponadto ze względu na spowolnienie lub odkładanie programów rozwoju energetyki jądrowej przez poszczególne kraje nastąpiła utrata efektu uczenia się w postaci wykwalifikowanych pracowników.

Jednak najważniejszym powodem dla wciąż wzrostowego trendu kosztów energetyki jądrowej są regulacje dotyczące bezpieczeństwa (jak dodatkowe urządzenia i systemy zabezpieczające), które wciąż są zastrzane, oraz częstotliwość ich zmian, która powoduje potrzebę ciągłego dostosowywania planów oraz opóźnia budowę już rozpoczętych reaktorów. Wspomniany wzrost kosztów *overnight* szacowany jest na 9,2% rocznie w USA oraz 1,7% rocznie we Francji [7].

Faktem jest, że każda generacja reaktorów jądrowych jest droższa od poprzedniej. W związku z tym nasuwa się pytanie o możliwości rozwoju energetyki jądrowej i jej konkurencyjność wobec alternatywnych technologii energetycznych. Gdyby elektrownie jądrowe tego typu (np. najbardziej popularny reaktor EPR III generacji) obecnie były budowane częściej, należałoby się spodziewać spadku kosztów, jednak trudno powiedzieć, jak duży byłby to spadek. Czynniki, które mogą spowodować obniżenie kosztów, to przejście na budowę modułową reaktorów (już podejmuje się tego typu rozwiązania, np. dla reaktora AP1000) oraz standaryzacja. Ten drugi czynnik jest trudniejszy do realizacji, gdyż zwykle zamawiający ma określone wymagania dotyczące reaktora oraz w zależności od kraju inne wymogi bezpieczeństwa [9]. Te rozważania dotyczą technologii budowy reaktorów jądrowych stosowanej obecnie. Jednak zakładając postęp technologiczny, należy odpowiedzieć na pytanie, czy reaktory kolejnej generacji mogą być bardziej bezpieczne i budowane taniej? Wydaje się, że nie. Wynika to z coraz bardziej wyśrubowanych norm bezpieczeństwa oraz nasilającego się ryzyka politycznego, związanego na przykład z terroryzmem. Poza tym opinia publiczna jest coraz bardziej nieprzychylnie nastawiona do ryzykownych technologii energetycznych (co może wynikać z katastrofy w Fukushima). Jak już zostało powiedziane, bardzo ograniczone są możliwości modularyzacji i standaryzacji reaktorów jądrowych oraz występują krótkie serie produkcyjne. Jest to sytuacja wyjątkowa wśród technologii energetycznych. Przykładowo elektrowni wiatrowych, słonecznych, jak również węglowych zamawia się setki lub tysiące rocznie, natomiast elektrowni jądrowych najwyżej kilkadziesiąt. Budowy te można przyrównać do innych dużych projektów inżynierskich jak mosty, lotniska oraz tamy, które są budowane na miejscu. Eksperti prognozują więc dalszy wzrost kosztów budowy elektrowni jądrowych, a co za tym idzie, wyższy koszt produkcji energii [7]. Będzie to pogarszać

pozycję konkurencyjną energetyki jądrowej wobec alternatywnych technologii energetyki niskoemisyjnej.

Bibliografia

1. Przewodnik po analizie kosztów i korzyści projektów inwestycyjnych. Narzędzie analizy ekonomicznej polityki spójności 2014–2020, Komisja Europejska, Bruksela 2014.
2. Goldbach S.G., Leleur S., Cost-Benefit Analysis (CBA) and alternative approaches from the Centre for Logistics and Goods (CLG) study of evaluation techniques, 2004.
3. Słupka T., Flaga-Maryńczyk A., Możliwości stosowania zmodyfikowanej metody AHP w problemach inżynierii środowiska, *Ekonomia i Środowisko* 2016, nr 2(57), s. 37–53.
4. The socio-economic benefits of solar and wind energy, IRENA and CEM, Abu Dhabi, 2014 [online], http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Socioeconomic_benefits_solar_wind.pdf [dostęp: 31.03.2017].
5. Dalkey N., Helmer O., An experimental application of the Delphi method to the use of experts, *Management Science* 1963, No. 9(3), s. 458–467.
6. Krupowicz J., Metody heurystyczne [w:] Prognozowanie gospodarcze: metody i zastosowania, red. M. Cieślak, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
7. Lévêque F., The Economics and Uncertainties of Nuclear Power, Cambridge University Press, Cambridge 2015.
8. Popkiewicz M., Rewolucja energetyczna. Ale po co?, Wydawnictwo Sonia Draga, Katowice 2016.
9. Reduction of Capital Costs of nuclear power plants, OECD, Paris, 2000 [online], <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2000/2088-reduction-capital-costs.pdf> [dostęp: 31.03.2017].

Podziękowanie

Artykuł przygotowano w ramach projektów badawczych „Wartościowanie efektów środowiskowych w analizie kosztów i korzyści inwestycji w niskoemisyjne źródła energii” UMO-2011/01/B/HS4/02322 oraz „Zarządzanie wartością inwestycji w odnawialne źródła energii” UMO-2011/01/D/HS4/05925, realizowanych przez Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki.

Magdalena Ligus

dr

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

e-mail: magdalena.ligus@ue.wroc.pl

Tytuł zawodowy magistra uzyskała w Akademii Ekonomicznej im. K. Adamieckiego w Katowicach na Wydziale Ekonomii, kierunku: finanse i bankowość, specjalność: finanse i inwestycje (2003). Stopień naukowy doktora uzyskała w Akademii Ekonomicznej im. O. Langego we Wrocławiu (2007). Pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Finansów Przedsiębiorstwa i Finansów Publicznych Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu.

Jej zainteresowania badawcze koncentrują się na ocenie ekonomicznej opłacalności inwestycji w niskoemisyjne źródła energii, a w szczególności na wycenie środowiskowych efektów zewnętrznych tego typu inwestycji. Od 2009 roku jest kierownikiem studiów podyplomowych „Inwestycje w odnawialne źródła energii”, prowadzonych na Uniwersytecie Ekonomicznym we Wrocławiu.