

**Katarzyna Frodyma, Monika Papież, Sławomir Śmiech**

Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

e-mails: frodymak@uek.krakow.pl; papiezm@uek.krakow.pl; smiechs@uek.krakow.pl

---

## **EFEKTYWNOŚĆ INWESTYCJI W ENERGIĘ WIATROWĄ W KRAJACH UE<sup>1</sup>**

## **THE EFFICIENCY OF INVESTING IN WIND ENERGY IN EU COUNTRIES**

---

DOI: 10.15611/pn.2018.507.06

JEL Classification: C67, Q5

**Streszczenie:** Celem pracy jest ocena efektywności inwestycji w energię wiatrową w krajach Unii Europejskiej. Wnioskowanie oparto na modelu BCC (dopuszczający zmienne korzyści skali) metody Data Envelopment Analysis (DEA), zorientowanym na nakłady. W podstawowym wariancie jako zmienną wejścia przyjęto zainstalowaną moc elektrowni wiatrowych, zmienną wyjściową jest zaś produkcja energii elektrycznej. Kolejne warianty analizy biorą pod uwagę oprócz produkcji energii elektrycznej także czynnik środowiskowy oraz ekonomiczny. Trzy kraje: Dania, Wielka Brytania oraz Słowacja, okazały się efektywne. W przypadku wzięcia pod uwagę efektu środowiskowego największy przyrost efektywności obserwowano w krajach mających duży udział węgla w produkcji energii elektrycznej. W przypadku efektu ekonomicznego najczęściej zyskiwały kraje z dużym udziałem gazu oraz ropy naftowej.

**Słowa kluczowe:** Data Envelopment Analysis (DEA), odnawialne źródła energii, energia wiatrowa.

**Summary:** The aim of the study is to assess the efficiency of investing in wind energy in the European Union countries. The assessment is based on the BCC method in Data Envelopment Analysis (DEA), which is an input-oriented approach. In the basic variant of the model, the installed wind capacity is assumed as the input variable. The output variable is generation of electricity. Other variants of the analysis account for environmental and economic factors in addition to electricity generation. Three countries, Denmark, the United Kingdom and Slovakia, prove to be efficient. When the environment is taken into account, the greatest increase in efficiency is observed in countries with high shares of coal in their electricity generation, while from the perspective of economy, the countries with the largest shares of gas and oil gain the most.

**Keywords:** DEA, renewable energy sources, wind energy.

---

<sup>1</sup> Praca została dofinansowana ze środków przyznanych Wydziałowi Zarządzania Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, w ramach dotacji na utrzymanie potencjału badawczego.

## 1. Wstęp

Na przestrzeni ostatnich 20 lat obserwuje się w krajach UE znaczny wzrost wykorzystania odnawialnych źródeł energii, szczególnie do produkcji energii elektrycznej. Udział odnawialnych źródeł energii w całkowitej produkcji energii elektrycznej wzrósł w tym okresie niemal dwukrotnie (z 19% w 2010 r. do 30% w 2015 r.<sup>2</sup>). Bardzo szybko w tym czasie rozwijała się energetyka wiatrowa. W ciągu ostatnich pięciu lat ponad połowę nakładów inwestycyjnych (64% ogółu nakładów) w dziedzinie energii odnawialnej stanowiły nakłady na energię wiatrową. W konsekwencji udział produkcji energii elektrycznej z wiatru w produkcji pochodzącej ze źródeł odnawialnych wzrosła z 20% do 31%, udział zaś produkcji energii elektrycznej z wiatru w całkowitej produkcji energii elektrycznej wzrósł z 0,15% do 9,33%.

Tak intensywny rozwój odnawialnych źródeł energii w krajach UE jest rezultatem wspólnej polityki energetycznej (Dyrektywa 2009/28/WE obejmująca cele na 2020 r.) nakierowanej na poprawę bezpieczeństwa energetycznego oraz redukcję emisji gazów cieplarnianych.

Poszczególne kraje UE, mając autonomię w zakresie wyboru źródeł energii odnawialnej, decydują się na takie, które mogą być wykorzystywane najbardziej efektywnie. Trzeba przy tym podkreślić, że efekty nakładów poniesionych na budowę infrastruktury umożliwiającej wykorzystanie źródeł energii odnawialnych (szczególnie elektrowni wiatrowych oraz słonecznych) w decydującej mierze zależą od podaży danego źródła energii. Rozkład ciśnienia atmosferycznego, które jest jednym z głównych czynników powodujących powstawanie wiatru, tj. nośnika energii elektrowni wiatrowych, jest bardzo zróżnicowany w krajach UE. W rezultacie kraje leżące na północy Europy oraz te leżące nad Oceanem Atlantyckim, Morzem Północnym i Morzem Bałtyckim mają dużo większy potencjał wiatru niż kraje leżące w głębi kontynentu czy na południu Europy. To powoduje, że nie wszystkie kraje w takim samym stopniu mogą wykorzystać efektywnie wiatr jako źródło energii elektrycznej. Pojawia się zatem pytanie, w jakim stopniu nakłady inwestycyjne poniesione na elektrownie wiatrowe przekładają się na wielkość produkcji energii elektrycznej w poszczególnych krajach UE.

W literaturze przedmiotu bardzo popularnym narzędziem do oceny efektywności inwestycji lub wydajności operacji produkcyjnych i usługowych jest metoda Data Envelopment Analysis (DEA). Została ona zaproponowana przez Charnesa, Coopera i Rhodesa [Charnes i in. 1978] i jest wykorzystywana do analizy efektywności w różnych dziedzinach życia czy gospodarki: edukacji, bankowości, transporcie, zdrowiu lub ochronie środowiska naturalnego. W pracy [Emrouznejad, Yang 2017] autorzy przedstawiają publikacje wykorzystujące metodę DEA w latach 1978–2016. Dotyczą one ponad 10 000 badań, z których około 290 poświęcono badaniu efektywności w sektorze wytwarzania energii elektrycznej. W pracy [Mardani

<sup>2</sup> Dane pochodzą ze strony Komisji Europejskiej.

i in. 2017] autorzy dokonali przeglądu 144 artykułów naukowych opublikowanych w latach 2006-2015, które obejmują zastosowanie DEA w zakresie efektywności energetycznej. Z kolei autorzy [Sueyoshi i in. 2017] podsumowali wyniki badań dotyczące zastosowania metody DEA w odniesieniu do efektywności wytwarzania energii i ochrony środowiska w ciągu ostatnich czterech dekad.

Rozważane są dwa główne nurty badań pozwalające ocenić względną efektywność poszczególnych obiektów, zwanych jednostkami decyzyjnymi. Pierwszy z nich koncentruje się na analizie efektywności przedsiębiorstw energetycznych zajmujących się dystrybucją energii elektrycznej. Drugi obszar koncentruje się na analizie i porównaniu efektywności elektrowni wykorzystujących różne odnawialne źródła energii. Jedynie kilka prac odnosi się w jakimś stopniu do efektywności energii wiatrowej. Cristóbal [2011] oraz Kim i inni [2015] porównują różne źródła energii odnawianej (między innymi: energię ze słońca, wiatru i wody), biorąc pod uwagę efektywność nakładów inwestycyjnych odpowiednio: w Hiszpanii i Korei Południowej. Z kolei Ederer [2015], Wu i inni [2016], Sağlam [2017a] badają efektywność poszczególnych farm wiatrowych lub producentów energii wiatrowej odpowiednio: w różnych krajach europejskich, w Chinach oraz w Stanach Zjednoczonych. Interesującą analizę efektywności energetyki wiatrowej dla 39 stanach USA proponuje Sağlam [2017b]. W tej pracy zmienne wejściowe w modelu określają zainstalowaną moc elektrowni, liczbę turbin wiatrowych, roczną opłatę za dzierżawę gruntu, natomiast zmienne wyjściowe w modelu odnoszą się przede wszystkim do wielkości wyprodukowanej energii oraz aspektów środowiskowych (ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>, ograniczenia zużycia wody) czy też ekonomicznych (zatrudnienie w przemyśle energetyki wiatrowej).

Niniejsza praca wpisuje się w drugi nurt badawczy, przy czym odnosi się do porównań międzynarodowych. Podstawowym celem pracy jest ocena efektywności nakładów inwestycyjnych związanych z energią wiatrową w krajach Unii Europejskiej (poza Maltą, która w badanym okresie nie produkowała energii elektrycznej z wiatru). Formalnie analiza jest prowadzona w formie przekrojowej, dla danych pochodzących z 2015 r. Ponieważ jednak zmienna wejściowa modelu jest mierzona za pomocą zainstalowanej mocy elektrowni wiatrowych, która jest zasobem, wymiar czasowy analizy obejmuje okres od powstania energetyki wiatrowej w poszczególnych krajach.

Dwie cechy niniejszego opracowania stanowią o jego oryginalności. Pierwsza to dobór badanych obiektów, tj. krajów UE, które dotychczas nie były porównywane w takim kontekście. Druga cecha to specyficzny dobór zmiennych w modelu DEA, nakierowany na uwzględnienie aspektów środowiskowych i ekonomicznych, które są mierzone odmiennie niż w dotychczasowych badaniach (por. [Sağlam 2017b]).

Dwie przesłanki powodują, że kraje UE są ciekawym obiektem badania w tym kontekście. Po pierwsze, wszystkie kraje UE zostały zobowiązane do wypełnienia wymogów zawartych w pakiecie klimatyczno-energetycznym. W związku z tym część krajów zaproponowała zachęty (między innymi: taryfy gwarantowane, zielo-

ne certyfikaty, preferencyjne kredyty, granty na inwestycje, zwolnienia z podatków), które miały zwiększyć poziom inwestycji w rozwój energii wiatrowej. Po drugie, kraje UE są bardzo silnie zróżnicowane ze względu na potencjał wiatru. W konsekwencji inwestycje zmierzające do zwiększenia mocy elektrowni wiatrowych mogą mieć w poszczególnych krajach różną efektywność.

W podstawowym wariancie modelu DEA jako zmienną wejścia przyjęto łączną moc zainstalowaną w elektrowniach wiatrowych w danym kraju, co ma przybliżyć nakłady inwestycyjne poniesione na budowę tych elektrowni (por. [Wu i in. 2016]). Zmienną wyjściową jest zaś produkcja energii elektrycznej z wiatru. Biorąc pod uwagę korzyści wynikające z zastępowania konwencjonalnych źródeł energią wiatru, w kolejnych wariantach analizy dodawano do modelu dodatkowe aspekty: środowiskowy i ekonomiczny. Uwzględniono redukcję emisji gazów cieplarnianych wynikającą z zastąpienia nieodnawialnych źródeł energii energią pochodzącą z wiatru. Zbadano też oszczędności związane z nakładami na surowce energetyczne, które nie zostały poniesione w związku z zastąpieniem energii ze źródeł tradycyjnych energią wiatrową. Zróżnicowanie krajów pod tym względem wynikało z różnic w tzw. miksie energetycznym, czyli strukturze wykorzystywanych źródeł energii elektrycznej.

## 2. Metodyka badań

Metoda DEA wywodzi się pierwotnie z mikroekonomicznej funkcji produktywności, w której pojedynczy efekt odnoszony był do pojedynczego nakładu; została przez jej autorów odniesiona do sytuacji wielowymiarowej. Jest to metoda graniczna, gdyż pozwala na wyznaczenie tzw. granicy możliwości produkcyjnych, na której i poniżej której znajdują się wszelkie dopuszczalne kombinacje wyników i nakładów. Przy czym w tej metodzie granica konstruowana jest w oparciu o obiekty najlepsze w grupie, które stają się wzorcami dla pozostałych obiektów, ponadto granica konstruowana jest w sposób nieparametryczny, co oznacza, że nie trzeba z góry ustalać ogólnej postaci analitycznej tej zależności.

Przedstawiony w 1978 r. model CCR<sup>3</sup> zakłada stałe korzyści skali, zaś zaproponowana w 1984 przez Bankera, Charnesa, Coopera [Banker i in. 1984] (BCC) modyfikacja modelu dopuszcza istnienie zmiennych korzyści skali. Wykorzystanie modelu BCC pozwala na ocenę krajów z punktu widzenia nie tylko czystej efektywności technicznej (najlepsze wykorzystanie nakładów), ale również efektywności skali (działanie w obszarze optymalnych korzyści). Dzięki temu możliwe jest określenie, czy nieefektywność danego kraju w zakresie energii wiatrowej wynika z marnotrawienia nakładów, czy też jest efektem działania w nieoptymalnym obszarze skali.

Efektywność rozumiana jest tutaj jako iloraz ważonej sumy efektów do ważonej sumy nakładów:

---

<sup>3</sup> Skrót od nazwisk autorów: Charnes, Cooper, Rhodes.

$$\theta = \frac{\sum_{r=1}^s \mu_r \cdot Y_r}{\sum_{i=1}^m v_i \cdot X_i},$$

gdzie:  $\theta$  – efektywność,  $Y_r$  –  $r$ -ty efekt, przy czym  $r = 1, 2, \dots, s$ ,  $s$  – liczba efektów,  $X_i$  –  $i$ -ty nakład, przy czym  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  – liczba nakładów,  $\mu_r$  – wagi określające ważność poszczególnych efektów,  $v_r$  – wagi określające ważność poszczególnych nakładów.

Istotą metody DEA jest porównanie między sobą grupy jednostek decyzyjnych (*decision making unit* — DMU), gdzie każda z jednostek ma pewien określony stopień swobody decyzyjnej. Innymi słowy, celem badania jest znalezienie jednostek efektywnych, które następnie wyznaczają pożądany i możliwy do osiągnięcia poziom efektywności dla pozostałych. W prowadzonym badaniu jednostką decyzyjną jest kraj Unii Europejskiej. Zgodnie z założeniami metody DEA wielkości nakładów i efektów są większe lub równe zero oraz dla każdej jednostki decyzyjnej istnieje przynajmniej jeden nakład i jeden efekt większy od zera<sup>4</sup>.

W metodzie DEA wyróżniamy dwa modele: zorientowany na nakłady i zorientowany na efekty. Wykorzystany w badaniach model zorientowany na nakłady pozwala na uzyskanie informacji o tym, o ile mniej nakładów powinna zużyć jednostka nieefektywna, by osiągnąć taki sam poziom wyników jak jednostka efektywna. Model CCR można zapisać następująco:

$$\sum_{i=1}^m v_i y_{i0} \rightarrow \max,$$

przy założeniach:  $\sum_{i=1}^s \mu_r \cdot x_{r0} = 1$ ,  $\sum_{i=1}^s v_i \cdot y_{ij} - \sum_{r=1}^s \mu_r \cdot x_{rj} \leq 0$ ,  $\mu_r \geq 0$ ,  $v_i \geq 0$ ;

gdzie:  $y_{r0}$  –  $r$ -ty efekt obiektu  $o$ ,  $x_{i0}$  –  $i$ -ty nakład obiektu  $o$ ,  $j$  – numer obiektu  $o$ ,  $j = 1 \dots n$ .

Postać dualną modelu CCR można zaś zapisać następująco:

$$\theta^* \rightarrow \min,$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \leq \theta x_{i0} \text{ oraz } \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \leq y_{r0},$$

$$\lambda_j \geq 0,$$

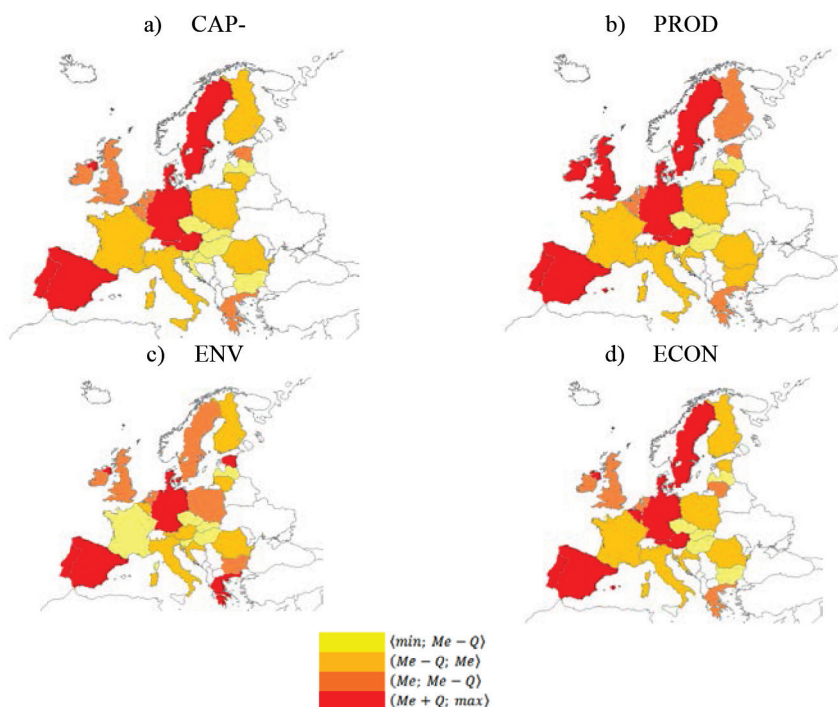
gdzie:  $\theta$  – współczynnik efektywności obiektu,  $\lambda_j$  – współczynniki kombinacji liniowej.

Rozwiązanie zadania polega na znalezieniu minimalnej wartości parametru  $\theta$ , która umożliwia takie zmniejszenie nakładów, by poziom efektów się nie zmienił. Jednostka decyzyjna jest efektywna, gdy  $\theta = 1$ , a gdy  $\theta < 1$ , oznacza to, że jednostka decyzyjna jest nieefektywna.

<sup>4</sup> Fakt, że przynajmniej jeden efekt musi być różny od zera, powodował, że z analizy usunięta została Malta.

### 3. Dane

Dane charakteryzujące zmienną wejścia (moc zainstalowaną) oraz zmienne wyjścia (produkcja energii elektrycznej, emisja gazów cieplarnianych, cena surowców), dotyczące 2015 r. dla 27 krajów Unii Europejskiej (z wyłączeniem Malty), pochodzą ze strony Komisji Europejskiej<sup>5</sup>. Rysunek 1 przedstawia wartości poszczególnych zmiennych wejścia i wyjścia w krajach Unii Europejskiej. Z uwagi na to, że zmienne charakteryzowały się silną asymetrią prawostronną<sup>6</sup>, w grupowaniu krajów wzięto pod uwagę miary pozycyjne, takie jak mediana ( $Me$ ) oraz odchylenie ćwiartkowe ( $Q$ ).



**Rys. 1.** Wartości zmiennych wykorzystanych w modelu DEA w krajach UE

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych pochodzących ze strony Komisji Europejskiej.

Jako zmienną wejścia przyjęto zainstalowaną moc w elektrowniach wiatrowych (MW) w przeliczeniu na 1 mieszkańca w 2015 r. (**CAP**), co ma przybliżać inwestycje związane z rozwojem elektrowni wiatrowych. Dane dotyczące inwestycji w odnawialne źródła energii są dostępne wyłącznie dla ostatnich kilku lat, tj. od

<sup>5</sup> <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/country>.

<sup>6</sup> Szczegółowe charakterystyki opisowe zmiennych są dostępne u autorów.

2010 r. (zob. *EurObserv'ER*), przez co nie obejmują nakładów poniesionych wcześniej. Porównanie sytuacji krajów (rys. 1a) pokazuje, że największą zainstalowaną moc pochodzącą z elektrowni wiatrowych w przeliczeniu na 1 mieszkańca ma Dania. Dużymi wartościami charakteryzują się: Szwecja, Niemcy, Irlandia, Hiszpania i Portugalia oraz Austria.

Jako zmienną wyjścia we wszystkich rozważanych modelach przyjęto wielkość produkcji energii elektrowni wiatrowych (TWh *per capita*) (**PROD**). Najwięcej energii elektrycznej z wiatru w przeliczeniu na mieszkańca (por. rys. 1b) produkuje się w Danii, wysoką produkcją charakteryzują się także: Szwecja, Irlandia, Portugalia, Hiszpania, Niemcy, Wielka Brytania i Austria.

Aspekt środowiskowy (**ENV**), będący rezultatem produkcji energii z wiatru, został określony poprzez obliczenie unikniętej emisji gazów cieplarnianych. Mówiąc precyzyjnie, obliczono teoretyczną wielkość unikniętej emisji CO<sub>2</sub>, która zostałaby uwolniona w danym kraju, gdyby źródłem emisji była wytworzona energia elektryczna z tradycyjnych/nieodnawialnych źródeł energii zamiast z wiatru. Posłużono się następującym wzorem:

$$ENV = \frac{GHE}{TPES} \cdot REW,$$

gdzie: *GHE* – emisja gazów cieplarnianych emitowanych przez przemysł energetyczny, *TPES* – całkowite zużycie energii brutto ze źródeł nieodnawialnych, *REW* – produkcja energii elektrycznej z wiatru.

Najwyższe wartości tego miernika w przeliczeniu na mieszkańca zanotowano w Danii, a także Irlandii, Estonii, Niemczech i Portugalii, Hiszpanii i Grecji.

Aspekt ekonomiczny (**ECON**) został określony tak, aby opisać, o ile mniejsze byłyby koszty wytworzenia energii elektrycznej związane z pozyskaniem surowców (węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny), gdyby korzystać z energii elektrycznej wyprodukowanej z wiatru. Wyznaczony został w następujący sposób:

$$ECON = CFF \cdot REW,$$

gdzie:  $CFF = \sum_{i=1}^3 TPES_i \cdot cena_i$ ; *i* = węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny, *TPES<sub>i</sub>* – całkowite zużycie energii brutto pozyskanej z surowca *i*, *REW* – produkcja energii elektrycznej z wiatru.

Największą redukcją kosztów surowców energetycznych zastąpionych przez energię wyprodukowaną z wiatru w przeliczeniu na mieszkańca charakteryzują się: Szwecja i Dania oraz Irlandia i Hiszpania, Portugalia, Austria, Belgia, Niemcy.

Podsumowując, rozkłady poszczególnych zmiennych charakteryzują się wyraźną asymetrią prawostronną, co oznacza, że większość krajów UE ma wartości dla wszystkich zmiennych poniżej średniej dla całej Unii. W przypadku rozważanych zmiennych najniższe wartości zaobserwowano dla Słowacji i Słowenii.

## 4. Wyniki badań

Wyniki analizy efektywności inwestycji w energię wiatrową dla 27 krajów Unii Europejskiej w 2015 r. zawiera tab. 1. Przedstawia ona wartości parametru  $\theta$ , a także miejsce danego w kraju w rankingu efektywności. Dla krajów nieefektywnych podane zostały kraje referencyjne wraz z mnożnikami nakładów. Przykładowo, kraja-

**Tabela 1.** Wyniki metody DEA (wariant podstawowy)

Kraj	Ranga	$\theta$	Kraj referencyjny	CRS	VRS
AT – Austria	20	0,69	SK (0,09), UK (0,91)	0,69	0,69
BE – Belgia	6	0,91	SK (0,20), UK (0,80)	0,91	0,91
BG – Bułgaria	18	0,74	SK (0,68), UK (0,32)	0,74	0,74
CY – Cypr	26	0,50	SK (0,58), UK (0,42)	0,50	0,50
CZ – Czechy	19	0,73	SK (0,91), UK (0,09)	0,72	0,73
DE – Niemcy	23	0,63	DK (0,19), UK (0,81)	0,63	0,63
DK – Dania	<b>1</b>	<b>1,00</b>		0,99	1,00
EE – Estonia	7	0,85	SK (0,13), UK (0,87)	0,84	0,85
ES – Hiszpania	14	0,77	DK (0,23), UK (0,77)	0,76	0,77
FI – Finlandia	9	0,82	SK (0,32), UK (0,68)	0,82	0,82
FR – Francja	17	0,74	SK (0,49), UK (0,51)	0,74	0,74
GR – Grecja	13	0,78	SK (0,32), UK (0,68)	0,78	0,78
HR – Chorwacja	21	0,68	SK (0,70), UK (0,30)	0,68	0,68
HU – Węgry	16	0,75	SK (0,89), UK (0,11)	0,75	0,75
IE – Irlandia	5	0,96	DK (0,43), UK (0,57)	0,96	0,96
IT – Włochy	24	0,58	SK (0,61), UK (0,39)	0,58	0,58
LT – Litwa	22	0,66	SK (0,55), UK (0,45)	0,66	0,66
LU – Luksemburg	25	0,57	SK (0,71), UK (0,29)	0,57	0,57
LV – Łotwa	15	0,76	SK (0,88), UK (0,12)	0,76	0,76
NL – Holandia	11	0,79	SK (0,28), UK (0,72)	0,79	0,79
PL – Polska	12	0,79	SK (0,54), UK (0,46)	0,79	0,79
PT – Portugalia	8	0,84	DK (0,27), UK (0,74)	0,83	0,84
RO – Rumunia	10	0,80	SK (0,42), UK (0,57)	0,80	0,80
SE – Szwecja	4	1,00	DK (0,56), UK (0,44)	0,99	1,00
SI – Słowenia	27	0,49	SK (0,99), UK (0,01)	0,43	0,49
SK – Słowacja	<b>1</b>	<b>1,00</b>		0,71	1,00
UK – Wielka Brytania	<b>1</b>	<b>1,00</b>		1,00	1,00

Pogrubione są kraje efektywne.

Uwagi: CRS – stałe efekty skali (*constant return-to-scale*), VRS – zmienne efekty skali (*variable return-to-scale*). Wartość  $\theta = 1$  dla Szwecji wynika z zaokrąglenia.

Źródło: obliczenia własne.



mi referencyjnymi dla Austrii są Słowacja oraz Wielka Brytania. Aby Austrię móc uznać za efektywną pod względem inwestycji w energię wiatrową, powinna mieć zainstalowaną moc równą 9% mocy zainstalowanej na Słowacji i 91% mocy zainstalowanej w Wielkiej Brytanii.

Kraje efektywne pod względem inwestycji w energię wiatrową to: Dania, Słowacja i Wielka Brytania, najbardziej nieefektywne zaś to Słowenia i Cypr. W przypadku Wielkiej Brytanii jest to globalna efektywność techniczna, a w przypadku Danii i Słowacji mamy do czynienia z czystą efektywnością techniczną, gdyż kraje te nie działają w optymalnym obszarze skali. W przypadku Słowacji mamy do czynienia z obszarem rosnących korzyści skali, a efektywność tego kraju wynika głównie z minimalnych nakładów. W przypadku Danii, ponoszącej duże nakłady, ale osiągającej równocześnie największe efekty (udział produkcji energii elektrycznej z energii wiatrowej stanowił w Danii w 2015 r. aż 49%), mamy do czynienia z obszarem malejących korzyści skali. Dla krajów, w których relatywnie najwięcej produkuje się energii wiatrowej, takich jak: Szwecja (10% całkowitej produkcji energii elektrycznej pochodzi z energii wiatrowej w 2015 r.), Portugalia (22%), Irlandia (23%), Hiszpania (18%) oraz Niemcy (12%), punktem odniesienia jest oprócz Wielkiej Brytanii również Dania. Dla pozostałych krajów, w których produkcja energii elektrycznej z wiatru jest zdecydowanie mniejsza, punktem odniesienia jest Wielka Brytania oraz Słowacja.

Uwzględnienie w analizie aspektu środowiskowego (tab. 2) spowodowało, że efektywnym krajem pod względem inwestycji w energię wiatrową oprócz Danii, Słowacji i Wielkiej Brytanii była Estonia. Kraje, w których głównym źródłem produkcji energii elektrycznej jest węgiel, takie jak: Estonia (77% całkowitej produkcji energii elektrycznej pochodzi z elektrowni węglowych w 2015 r.), Polska (79%), Czechy (49%), Bułgaria (46%), Grecja (43%), Niemcy (44%) oraz Cypr (91% energii elektrycznej jest wytwarzane w elektrowni opalowej na olej opałowy), zyskały najwięcej. Wzrosła ich pozycja w rankingu efektywności, a także wzrosła wartość współczynnika  $\theta$ .

Natomiast uwzględnienie aspektu ekonomicznego spowodowało, że krajami efektywnymi pod względem inwestycji w energię wiatrową oprócz Danii, Słowacji i Wielkiej Brytanii okazały się Belgia i Szwecja. Z uwagi na koszty wytworzenia energii elektrycznej z surowców nieodnawialnych zwiększenie wartości współczynnika efektywności oraz poprawa miejsca w rankingu efektywności dotyczyły krajów, w których głównym źródłem produkcji energii elektrycznej jest ropa naftowa: Cypr (aż 91% całkowitej produkcji energii elektrycznej pochodzi z elektrowni opalanych olejem opałowym w 2015 r.), lub gaz ziemny: Łotwa (50% energii pochodzi z elektrowni opalanych gazem ziemnym), Litwa (40%), Belgia (35%), Luksemburg (30%).

Uwzględnienie obu aspektów: środowiskowego i ekonomicznego, spowodowało, że efektywne pod względem inwestycji w energię wiatrową były również kraje takie jak: Belgia, Estonia, Irlandia i Szwecja. Najwięcej „zyskały” zaś Cypr oraz Grecja.

Tabela 2. Wyniki metody DEA

Kraj	Wyjście:	PROD	Wyjście:	PROD ENV	Wyjście:	PROD ECON	Wyjście:	PROD ENV ECON
	ranga	$\theta$	ranga	$\theta$	ranga	$\theta$	ranga	$\theta$
AT – Austria	20	0,69	20	0,69	22	0,72	22	0,72
BE – Belgia	6	0,91	7	0,91	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>
BG – Bułgaria	18	0,74	11	0,84	20	0,74	13	0,84
CY – Cypr	26	0,50	26	0,54	14	0,79	9	0,91
CZ – Czechy	19	0,73	15	0,79	21	0,73	18	0,79
DE – Niemcy	23	0,63	22	0,66	25	0,63	24	0,66
DK – Dania	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>
EE – Estonia	7	0,85	<b>1</b>	<b>1,00</b>	8	0,85	<b>1</b>	<b>1,00</b>
ES – Hiszpania	14	0,77	16	0,77	17	0,77	19	0,79
FI – Finlandia	9	0,82	13	0,82	10	0,82	16	0,82
FR – Francja	17	0,74	19	0,74	19	0,75	21	0,75
GR – Grecja	13	0,78	9	0,90	16	0,78	<b>1</b>	<b>1,00</b>
HR – Chorwacja	21	0,68	21	0,68	23	0,68	23	0,68
HU – Węgry	16	0,75	18	0,75	18	0,75	20	0,75
IE – Irlandia	5	0,96	6	0,98	6	0,97	<b>1</b>	<b>1,00</b>
IT – Włochy	24	0,58	24	0,58	26	0,59	26	0,63
LT – Litwa	22	0,66	23	0,66	11	0,80	17	0,81
LU – Luksemburg	25	0,57	25	0,57	24	0,66	25	0,66
LV – Łotwa	15	0,76	17	0,76	7	0,88	11	0,88
NL – Holandia	11	0,79	14	0,81	13	0,79	15	0,82
PL – Polska	12	0,79	8	0,91	15	0,79	10	0,91
PT – Portugalia	8	0,84	10	0,85	9	0,84	12	0,85
RO – Rumunia	10	0,80	12	0,83	12	0,80	14	0,83
SE – Szwecja	4	1,00	5	1,00	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>
SI – Słowenia	27	0,49	27	0,50	27	0,49	27	0,50
SK – Słowacja	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>
UK – Wielka Brytania	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>	<b>1</b>	<b>1,00</b>

Pogrubione są kraje efektywne.

Źródło: obliczenia własne.

## 5. Zakończenie

Przeprowadzone badanie wykazało, że wyłącznie trzy kraje: Słowacja, Wielka Brytania oraz Dania, są efektywne, biorąc pod uwagę relację inwestycji w energię wiatrową oraz wielkość wytworzonej energii elektrycznej z wiatru. Dwa pierwsze wymienione kraje (Słowacja i Wielka Brytania) stały się punktami odniesienia dla tych krajów europejskich, które miały niski lub średni poziom inwestycji w energię wiatrową. Dwa ostatnie kraje (Wielka Brytania i Dania) stanowiły odniesienie dla krajów o wysokim poziomie inwestycji w energię wiatrową. Kraje, które charakteryzowały się wysokimi nakładami, czyli: Niemcy, Hiszpania, Irlandia, Portugalia i Szwecja, to te, w których występują bardzo korzystne dla rozwoju energii wiatrowej warunki. Mimo to Niemcy oraz Hiszpania okazały się być dość daleko w wyznaczonym rankingu, pokazującym efektywność krajów (odpowiednio 23. oraz 14. miejsce). Kraje te dość wcześnie zaczęły rozwijać energetykę wiatrową i mają wobec tego sporą część elektrowni wiatrowych, które są przestarzałe z dzisiejszego punktu widzenia. Obecnie produkowane turbiny wiatrowe są w stanie znacznie efektywniej wykorzystywać energię wiatru niż te produkowane ponad dekadę temu. Niska pozycja obu krajów w tworzonych w tym opracowaniu rankingach może być rozumiana jako koszt bycia pionierem w energetyce wiatrowej.

Uwzględnienie dodatkowych aspektów związanych z inwestycjami w energię wiatrową, tj. wyszczególnionych w dyrektywie aspektach środowiskowym oraz ekonomicznym, pozwoliło szerzej spojrzeć na korzyści inwestycji w ten rodzaj energii odnawialnej. Aspekt środowiskowy okazał się bardzo znaczący w przypadku krajów, w których głównym surowcem wykorzystywanym do wytworzenia energii elektrycznej jest węgiel kamienny lub brunatny. Taki rezultat jest wynikiem wysokiego poziomu emisji CO<sub>2</sub> związanego ze spalaniem węgla. Włączenie do analizy aspektu ekonomicznego pokazało największą poprawę badanej efektywności tych krajów, które produkują energię elektryczną z gazu ziemnego lub oleju opałowego. Ten efekt to konsekwencja wysokich kosztów wymienionych paliw. Włączenie do modelu obu dodatkowych aspektów pokazuje, że największy wzrost badanej efektywności uzyskują kraje z największym udziałem surowców kopalnych wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej.

## Literatura

- Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W., 1984, *Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis*, Management Science, vol. 30, no. 9.
- Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E., 1978, *Measuring the efficiency of Decision Making Units*, European Journal of Operational Research, no. 2, s. 429–444.
- Cristóbal J.R., 2011, *A multi criteria data envelopment analysis model to evaluate the efficiency of the renewable energy technologies*, Renewable Energy, no. 36(10), s. 2742–2746.

- Ederer N., 2015, *Evaluating capital and operating cost efficiency of offshore wind farms: A DEA approach*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, no. 42, s. 1034–1046.
- Emrouznejad A., Yang G.L., 2017, *A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978-2016*, Socio-Economic Planning Sciences, <http://dx.doi.org/10.1016/j.seps.2017.01.008>.
- EU Commission, *Energy datasheets: EU-28 countries*, <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/country> (10.09.2017).
- Kim K.T., Lee D.J., Park S.J., Zhang Y., Sultanov A., 2015, *Measuring the efficiency of the investment for renewable energy in Korea using data envelopment analysis*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, no. 47, s. 694–702.
- Mardani A., Zavadskas E.K., Streimikiene D., Jusoh A., Khoshnoudi M., 2017, *A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, no. 70, s. 1298–1322.
- Sağlam Ü., 2017a, *Assessment of the productive efficiency of large wind farms in the United States: An application of two-stage data envelopment analysis*, Energy Conversion and Management, no. 153, s. 188–214.
- Sağlam Ü., 2017b, *A two-stage data envelopment analysis model for efficiency assessments of 39 state's wind power in the United States*, Energy Conversion and Management, no. 146, s. 52–67.
- Sueyoshi T., Yuan Y., Goto M., 2017, *A literature study for DEA applied to energy and environment*, Energy Economics, no. 62, s. 104–124.
- Wu Y., Hu Y., Xiao X., Mao C., 2016, *Efficiency assessment of wind farms in China using two-stage data envelopment analysis*, Energy Conversion and Management, no. 123, s. 46–55.