

# Elżbieta Szaruga

---

## Zastosowanie programowania liniowego w ocenie efektywności zrównoważonego transportu

---

Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania 30, 283-298

---

2012

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej [bazhum.muzhp.pl](http://bazhum.muzhp.pl), gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

**Elżbieta Szaruga**

Uniwersytet Szczeciński

## **ZASTOSOWANIE PROGRAMOWANIA LINIOWEGO W OCENIE EFEKTYWNOŚCI ZRÓWNOWAŻONEGO TRANSPORTU**

### **Streszczenie**

W artykule zaprezentowano możliwości analityczne modelu CCR-DEA w kontekście zrównoważonego transportu. Skonstruowano przy tym wskaźniki efektywności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej transportu. Wskazano również metodologię obliczeń, wykorzystując programowanie liniowe, i stworzono przykładową macierz danych. Rozwiązania problemów optymalizacyjnych otrzymano dzięki sprowadzeniu warunków ograniczających i funkcji celu z postaci ułamkowej do postaci liniowej.

**Słowa kluczowe:** zrównoważony transport, efektywność, CCR-DEA.

### **Wprowadzenie**

O koncepcji zrównoważonego rozwoju dyskutuje się już około 50 lat, odnosząc ją do różnych dziedzin życia gospodarczego i wielu problemów. Jedną z takich dziedzin jest transport, z którym wiążą się problemy natury ekonomicznej, społecznej i ekologicznej. Wielu naukowców i polityków boryka się z problemem zrównoważenia transportu i jego efektywności, co ma związek z interdyscyplinarnym charakterem tego pojęcia.

Istnieją różne metody pomiaru zrównoważenia transportu. Jedną z nich jest programowanie liniowe, a dokładnie metoda DEA, modelu CCR zoriento-

wanego na nakłady. Celem artykułu jest eksperymentalne scharakteryzowanie możliwości, jakie daje CCR-DEA w odniesieniu do zrównoważonego transportu i jego trzech aspektów: ekonomicznego, społecznego i ekologicznego.

Artykuł składa się z dwóch części. W pierwszej przedstawiono pojęcia zrównoważonego rozwoju, zrównoważonego transportu, zrównoważenia i efektywności. W drugim opiszano procedurę obliczeń, sformułowano model na bazie programowania liniowego oraz przedstawiono matrycę danych, która posłużyła do konstrukcji wskaźników efektywności. Wskaźniki te zinterpretowano w odniesieniu do celów zrównoważonego transportu.

## 1. Efektywność w odniesieniu do zrównoważonego transportu

Na przestrzeni ostatnich pięciu dekad obserwowany jest ogromny wzrost zarówno liczby użytkowników transportu drogowego, jak i samych pojazdów drogowych, nie tylko w krajach rozwiniętych, lecz również w krajach rozwijających się<sup>1</sup>. Postęp w dziedzinie motoryzacji, ukształtowanie się infrastruktury transportowej i szybka urbanizacja przyczyniły się do większej dostępności do środków transportu zbiorowego oraz indywidualnego<sup>2</sup>. Ta niczym nieskrępowana dostępność do środków transportu umożliwia zaspokojenie potrzeb transportowych, które wciąż ewoluują. Z kolei rosnące zapotrzebowanie na transport staje się coraz większym zagrożeniem dla środowiska, przestrzeni geograficznej, społeczności i gospodarki chociażby dlatego, że transport wywołuje negatywne skutki swojej działalności. Stąd też uzasadniony jest wzrost zainteresowania pojęciami zrównoważony rozwój, zrównoważony transport czy zrównoważenie<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> B. Hernas, *Szyć na miarę*, „Komunikacja Publiczna” 2009, nr 3 (36), s. 39.

<sup>2</sup> UITP (*International Association of Public Transport*), *Przerwać błędne koło*, „Komunikacja Publiczna” 2009, nr 2 (35), s. 39.

<sup>3</sup> T. Litman, D. Burwell, *Issues in sustainable transportation*, „International Journal of Global Environmental Issues” 2006, Vol. 6, No. 4, s. 332, [http://www.vtpi.org/sus\\_iss.pdf](http://www.vtpi.org/sus_iss.pdf) [15.04.2012].

### Za zrównoważony rozwój uznaje się

[...] taki model rozwoju, w którym wszelkie procesy zachodzące wewnątrz systemu społecznego i gospodarczego są zharmonizowane z procesami zachodzącymi w systemie przyrodniczym. Dzięki temu utrzymuje się stan równowagi, który zapewnia trwałość istnienia tych systemów. Wszystkie trzy elementy triady: społeczeństwo – gospodarka – środowisko, powinny rozwijać się w miarę równomiernie<sup>4</sup>.

Z punktu widzenia autorki jest to jedyna kompletna definicja zrównoważonego rozwoju, która wkomponowuje się w rozwój krajów wschodzących, rozwijających się i rozwiniętych. Zakłada bowiem, że wszystkie składniki triady nie muszą kształtować się jednakowo, lecz zaleca się, aby „rozwijały się w miarę równomiernie”. Oznacza to, że jeżeli dany kraj ma większe osiągnięcia w jednej ze sfer triady niż w pozostałych, nie jest wykluczony z koncepcji zrównoważonego rozwoju. Jednak podstawowym warunkiem tego niewykluczenia jest harmonia pomiędzy procesami wewnątrz sfer – społecznej, gospodarczej i przyrodniczej. Innymi słowy rozwój w dziedzinie społecznej czy przyrodniczej nie może prowadzić do recesji albo też odwrotnie, wzrost gospodarczy nie może pociągać za sobą silnego zacofania ekologicznego czy obskurantyzmu i tym podobne, gdyż zostanie przerwana trwałość istnienia jednego z systemów, a wówczas zrównoważony rozwój straciłby sens.

Według autorki termin „zrównoważony transport” po pierwsze powinien się opierać na wyżej przytoczonej definicji zrównoważonego rozwoju. Po drugie pojęcie to nie powinno ograniczać się tylko do aspektów ekologicznych, ale wręcz uwzględniać wszystkie aspekty triady: ekonomiczne, ekologiczne i społeczne. A po trzecie za transport zrównoważony powinno uznawać się system, którego celami szczególnymi są<sup>5</sup>:

- minimalizacja ujemnych skutków działalności transportowej,
- spełnienie zasadniczej funkcji transportu, która wynika z cech mobilności i dostępności,
- opłacalność dla użytkownika i gospodarki.

<sup>4</sup> B. Kryk, *Ekorozwój jako przyjęta koncepcja rozwoju społeczno-ekonomicznego a inwestycje ekologiczne*, Problemy mikroekonomii menedżerskiej, red. D. Kopycińska, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Prace Katedry Mikroekonomii nr 8, WNUS, Szczecin 2003, nr 367, s. 7, wersja pdf [25.03.2012].

<sup>5</sup> *Analiza istniejących danych statystycznych pod kątem ich użyteczności dla określenia poziomu zrównoważonego rozwoju transportu wraz z propozycją ich rozszerzenia*. Raport z realizacji ekspertyzy, Jelenia Góra–Warszawa 2008, s. 47.

Pierwszy i ostatni cel zrównoważonego transportu nie wymaga wyjaśnienia, w przeciwieństwie do drugiego. Z celem drugim wiążą się właściwości zrównoważonego transportu: mobilność i dostępność. Przez pojęcie dostępność należy rozumieć zapewnienie możliwości korzystania z pożądaných dóbr (takich jak środki transportu). Za mobilność zrównoważonego transportu uważa się maksymalizację zadowolenia przypadającego na jednostkę mobilności – tzw. punkt docelowy zrównoważonego transportu (czyli zrównoważenie). Zrównoważenie w tym przypadku dyktuje przymus ograniczenia konsumpcji dóbr stosownie do limitów środowiskowych, co w konsekwencji prowadzi do zmaksymalizowania efektywności. Innymi punktami docelowymi mogą być: efektywność wykorzystania paliw, minimalizacja emisji, optymalizacja natężenia ruchu, minimalizacja wypadków drogowych i tym podobne.

Należy wyraźnie zaznaczyć, że wyznaczanie warunków koniecznych do osiągnięcia zrównoważonego transportu, czyli tych punktów docelowych, nie jest zadaniem prostym i wiąże się ze zdefiniowaniem mierników zrównoważenia. Za najbardziej adekwatne kryterium uznaje się efektywność, która sprawdza się do „relacji między uzyskanymi (i pożądanymi) wynikami i nakładami a celem działania, a środkami i warunkami niezbędnymi do jego osiągnięcia”<sup>6</sup>. W kontekście zrównoważonego rozwoju tak pojmowaną efektywność należy uzupełnić o cztery wymiary: ekonomiczny, społeczny, ekologiczny, prócz tego – technologiczny. Zostaną one kolejno opisane.

Wymiar ekonomiczny efektywności to nic innego jak wyrażenie efektów i nakładów w jednostkach pieniężnych. Jednakże często zdarza się, że pieniężne ujęcie efektów czy nakładów jest niemożliwe (szczególnie gdy dotyczy to celów zrównoważonego rozwoju), wówczas przy ocenie efektywności poszerza się zakres uwzględnianych efektów i nakładów o niefinansowe mierniki<sup>7</sup>.

Aspekt technologiczny efektywności dotyczy optymalizacji procesów transportowych poprzez zapewnienie funkcjonalnej infrastruktury transportowej oraz infrastruktury technologicznej. Jego funkcją jest poszerzenie pozostałych wymiarów efektywności, zwłaszcza ekonomicznego<sup>8</sup>.

---

<sup>6</sup> B. Kryk, *Efektywność ekonomiczno-ekologiczna a cele gospodarowania*, w: *Państwo i rynek w gospodarce*, red. D. Kopycińska, PTE, Szczecin 2003, s. 95.

<sup>7</sup> J. Adamczyk, T. Nitkiewicz, *Programowanie zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw*, PWE, Warszawa 2007, s. 119.

<sup>8</sup> *Ibidem*.

Z kolei za środowiskowy wymiar efektywności uważana jest optymalizacja zużycia zasobów naturalnych, minimalizacja negatywnego wpływu transportu na środowisko (pośredniego) oraz minimalizacja ujemnych efektów niepożądanych (bezpośrednich)<sup>9</sup>.

Przez efektywność społeczną rozumie się z jednej strony stopień wykorzystania zasobów ludzkich w określonej działalności (na przykład osób zatrudnionych w działalności transportowej), a z drugiej stopień oddziaływania transportu na społeczeństwo<sup>10</sup>.

Mimo że znane są aspekty efektywności i kategorie nakładów oraz efektów każdej z nich, problem tkwi raczej nie w samym ustaleniu relacji licznika do mianownika, czyli tej wielkości relatywnej, ale w interpretacji otrzymanego wyniku w porównaniu z bazami odniesienia. W przypadku zrównoważonego transportu trudno jest powoływać się na jakiegokolwiek bazy odniesienia, stąd ocena efektywności metodą wskaźnikową jest niewyczerpująca<sup>11</sup>. Podobnie ma się sytuacja w przypadku oceny efektywności metodą parametryczną – jest to również metoda niewystarczająca – do której wprowadza się funkcję produkcji i rozkład błędu losowego. Tutaj kłopotliwa jest kwestia rzetelnych testów, które mogą potwierdzić poprawność tych funkcji, a ustalanie nieefektywnych odchyleń od granicy efektywności może wprowadzać w błąd. Inaczej ma się sytuacja w przypadku oceny metodami nieparametrycznymi, gdzie nie narzuca się postaci funkcji określonym procesom, a dane przyjmuje się za wyznacznik<sup>12</sup>.

Jedną z tych metod jest *Data Envelopment Analysis* (DEA), która posługuje się procedurą programowania liniowego. Wykorzystuje miarę efektywności M. Farella, bazującą na koncepcji produktywności według Gerarda Debreu. W podejściu tym można ponadto rozpatrywać jednostki, których działalność charakteryzuje się wieloma nakładami i efektami, a punktem odniesienia jest najwyższa zaobserwowana efektywność wśród badanych jednostek (podejście to obecnie określa się mianem modelu CCR)<sup>13</sup>. Model CCR potrafi poradzić

<sup>9</sup> *Ibidem.*

<sup>10</sup> *Ibidem.*

<sup>11</sup> B. Guzik, *Podstawowe możliwości analityczne modelu CCR-DEA*, „Badania Operacyjne i Decyzje” 2009, nr 1, s. 57.

<sup>12</sup> L. Cherchye, *Topics in Non-parametric Production and Efficiency Analysis*, FETEW K.U. Leuven, Leuven 2001, s. 8.

<sup>13</sup> Pierwotnie miary efektywności Debreu-Farella uwzględniały jeden nakład i jeden efekt. Metoda DEA została przedstawiona w 1978 r. przez A. Charnesa, W. Coopera i E. Rhodesa jako model CCR (od inicjałów autorów).

sobie z dużą liczbą zmiennych, wykorzystując programowanie liniowe, co w przypadku innych metod jest bardzo trudne (choćby z powodu określania wag dla każdego nakładu i efektu). Dzięki temu można włączyć dodatkowe aspekty do analizy i oceny zjawisk, jak na przykład zrównoważony transport<sup>14</sup>.

## 2. DEA jako metoda oceny efektywności zrównoważonego transportu

W metodzie DEA badane jednostki określane są mianem DMU (*decision making unit*)<sup>15</sup>. Każda jednostka w stosunku do innych powinna mieć jednaki cel działania, wytwarzać podobne efekty i dysponować jednakowym rodzajem nakładów, czyli badana populacja powinna być jednorodna pod względem wyżej wymienionych cech. Meritum DEA jest konfrontowanie ze sobą wszystkich jednostek, każda ma jakiś zdefiniowany poziom autonomii decyzyjnej. To znaczy metodą DEA wyznacza się jednostki efektywne, a te z kolei określają pożądany poziom efektywności pozostałych DMU, dlatego zrozumiałą jest wymóg jednostek jednorodnych<sup>16</sup>. Ponadto muszą zostać spełnione następujące warunki<sup>17</sup>:

- każda DMU dysponuje co najmniej jednym nakładem i wytwarza co najmniej jeden efekt każdego rodzaju,
- wybór efektów i nakładów koresponduje z celem badania,
- zmierza się do minimalizacji nakładów lub maksymalizacji efektów, co jest uwzględnione w budowie miar efektywności,
- miary poszczególnych nakładów i efektów nie muszą być ze sobą zgodne,
- traktuje się niepożądane efekty jako nakłady<sup>18</sup>.

---

<sup>14</sup> J. Adamczyk, T. Nitkiewicz, *op.cit.*, s. 124.

<sup>15</sup> M. Kisielewska, *Pojęcie efektywności w metodach analizy granicznej, Przedsiębiorstwa w procesie przemian otoczenia*, red. B. Kryk, Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania Uniwersytetu Szczecińskiego, WNUS, Szczecin 2008, nr 1, s. 192, wersja pdf [27.03.2012].

<sup>16</sup> J. Adamczyk, T. Nitkiewicz, *op.cit.*, s. 126.

<sup>17</sup> *Ibidem*, s. 127.

<sup>18</sup> *Ibidem*, s. 134. Jest to nieznaczna modyfikacja metody DEA na potrzeby zrównoważonego rozwoju.

Skoro znane są założenia metody DEA, pożądane byłoby przedstawienie procedury obliczeniowej na przykładzie modelu CCR zorientowanego na nakłady<sup>19</sup>, uwzględniającego zjawisko różnic we wskaźnikach efektywności. Zatem każda DMU produkuje  $s$  rodzajów efektów, wykorzystując  $m$  rodzajów nakładów, przy czym wielkości nakładów oznacza się przez  $x$ , natomiast wielkości efektów przez  $y$ . Czyli dla DMU <sub>$j$</sub>  otrzymuje się  $(x_{1j}, \dots, x_{mj})$  oraz  $(y_{1j}, \dots, y_{sj})$ . Dla wszystkich DMU zaś zapisuje się to w postaci macierzy nakładów  $X$  ( $m \times n$ ) i efektów  $Y$  ( $s \times n$ )<sup>20</sup>:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ y_{s1} & \dots & y_{sn} \end{bmatrix}.$$

Tak określone oznaczenia posłużą w dalszej procedurze obliczania efektywności każdej z jednostek DMU. Pierwszym krokiem metody jest wyznaczenie wirtualnych nakładów i wirtualnych efektów w następujący sposób<sup>21</sup>:

$$\text{wirtualny nakład} = v_1 x_{1o} + \dots + v_m x_{mo},$$

$$\text{wirtualny efekt} = u_1 y_{1o} + \dots + u_s y_{so},$$

gdzie  $v_i$  i  $u_r$  są wagami ( $\{i = 1, \dots, m\}$  i  $\{r = 1, \dots, s\}$ ).

Przy czym optymalizacji dokonuje się dla DMU <sub>$o$</sub>  (tak oznacza się każdą kolejną badaną jednostkę ze zbioru wszystkich DMU) w odniesieniu do wszystkich DMU <sub>$j$</sub>  i samej siebie DMU <sub>$o$</sub> . W celu wyznaczenia tych wag stosuje się procedurę ułamkowego programowania liniowego, dzięki której maksymalizuje się relację wirtualnych efektów do wirtualnych nakładów. Czyli<sup>22</sup>:

$$(FP_o) \max \Theta = \max \frac{u_1 y_{1o} + \dots + u_s y_{so}}{v_1 x_{1o} + \dots + v_m x_{mo}},$$

<sup>19</sup> Istnieje też model zorientowany na efekty.

<sup>20</sup> J. Adamczyk, T. Nitkiewicz, *op.cit.*, s. 128.

<sup>21</sup> *Ibidem*, s. 127.

<sup>22</sup> *Ibidem*, s. 128.



pod warunkami ograniczającymi:

$$\frac{u_1 y_{1j} + \dots + u_s y_{sj}}{v_1 x_{1j} + \dots + v_m x_{mj}} \leq 1 \quad (j = 1, \dots, n),$$

$$v_1, \dots, v_m \geq 0 \text{ oraz } u_1, \dots, u_s \geq 0.$$

Pierwsze ograniczenie sprowadza się do założenia, że iloraz wirtualnych efektów i wirtualnych nakładów nie może być większy niż 1 dla każdej DMU. Kolejne ograniczenia dotyczące wag  $v_i$  i  $u_r$ , których wartości są nieujemne, informują, że zarówno nakłady, jak i efekty są wartościami różnymi od zera<sup>23</sup>. W ten sposób zostaje osiągnięty cel, tzn. maksymalizacja ilorazu wirtualnych efektów do wirtualnych nakładów, co oznacza tyle, że wartość  $\Theta$  nie przekracza 1. Niestety, rozwiązanie powyższego problemu nie jest proste, gdyż pierwiastkami układu równań warunków ograniczających mogą być liczby nieskończone, czyli takie, których nie jest się w stanie dokładnie się wyznaczyć. Dlatego przekształcono powyższy ułamkowy problem FP<sub>o</sub> w następujący równoważny model liniowy<sup>24</sup>:

$$(LP_o) \max_{x, \mu} \Theta = \max \mu_1 y_{1o} + \dots + \mu_s y_{so},$$

pod warunkami ograniczającymi:

$$v_1 x_{1o} + \dots + v_m x_{mo} = 1,$$

$$\mu_1 y_{1j} + \dots + \mu_s y_{sj} \leq v_1 x_{1j} + \dots + v_m x_{mj} \quad (j = 1, \dots, n),$$

$$v_1, \dots, v_m \geq 0 \text{ oraz } \mu_1, \dots, \mu_s \geq 0.$$

Optymalny wynik można uzyskać w jeszcze prostszy sposób – rozwiązując postać dualną LP<sub>o</sub> powyższego problemu<sup>25</sup>. Dualny model LP<sub>o</sub> (często oznaczany jako DLP<sub>o</sub>) ma za zadanie znaleźć wielkość  $\Theta$  i wektor  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)^T$ , wykorzystując dwie fazy obliczeń. W pierwszej dąży się do minimalizacji nakładów przez minimalizację mnożnika poziomu nakładów o-tej jednostki, gdzie

<sup>23</sup> Chociaż może zdarzyć się sytuacja, w której wszystkie efekty mają wartości równą 0, natomiast w przypadku nakładów chociaż jedna wartość musi być różna od zera. Wynika to z matematycznego założenia, że dzielenie przez zero jest niewykonalne.

<sup>24</sup> W. Cooper, L. Seiford, K. Tone, *Data Envelopment Analysis: a Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-solver Software*, Kluwer, Dordrecht 2000, s. 43.

<sup>25</sup> Autorka omięła konwersję zmiennych. Związek między pierwotnym a dualnym modelem programowania liniowego (dla ograniczeń i zmiennych) por. W. Cooper, L. Seiford, K. Tone, *op.cit.*, s. 44.

nakłady wszystkich DMU nie przewyższają nakładów poniesionych przez jednostkę  $o$ -tą oraz efekty osiągnięte przez obiekt  $o$ -ty nie są większe od efektów wszystkich DMU. W drugiej fazie dąży się do maksymalizacji luzów, co można zapisać następująco:

pierwsza faza:

druga faza:

(DLP<sub>o</sub>)  $\min_{\Theta, \lambda} \Theta$ , pod warunkami:

$\max s^{-n} + s^{+n}$ , pod warunkami:

$\Theta x_o - X\lambda \geq 0$  i  $Y\lambda \geq y_o$  oraz  $\lambda \geq 0$

$\Theta x_o = X\lambda + s^{-n}$  i  $y_o = Y\lambda - s^{+n}$

gdzie  $\Theta \geq 0$ ,  $\lambda \geq 0$ ,  $s^{-n} \geq 0$ ,  $s^{+n} \geq 0$ .

Idealnym rozwiązaniem powyższego modelu jest  $\Theta = 1$ ,  $\lambda_{o,o} = 1$ ,  $\lambda_{o,j} = 0$  ( $j \neq o$ ). Indeks dolny  $o$  oznacza się przy badanej jednostce, indeks dolny  $j$  zaś dotyczy wszystkich pozostałych DMU. Jednak nie zawsze występuje taka sytuacja. Łącząc wszystkie warunki ograniczające z funkcjami celu, dostaje się następującą zależność  $0 \leq \Theta^* \leq 1$ , gdzie  $\Theta^*$  oznacza optymalne  $\Theta$ , czyli efektywność w sensie Farella. W przypadku gdy  $(X\lambda, Y\lambda)$  charakteryzuje się wyższą efektywnością niż  $(\Theta x_o, y_o)$  i gdy  $\Theta^* \leq 1$ , występują tzw. luzy (przerost nakładów lub niedostatek efektów)<sup>26</sup>.

Tak w skrócie opisana metodologia modelu CCR zorientowanego na nakłady zostanie zastosowana do oceny zrównoważonego transportu siedmiu krajów Unii Europejskiej. W tej grupie krajów znajdują się: Czechy, Dania, Finlandia, Litwa, Niemcy, Polska i Słowacja, czyli jest zdefiniowanych 7 DMU, a więc tyle samo będzie trzeba dokonać optymalizacji. Wybór krajów jest uzależniony od dostępności danych statystycznych niezbędnych do wykorzystania w modelu CCR-DEA. Innym kryterium doboru krajów były połączenia systemów transportowych, które mogły być porównywane między sobą. Dlatego oprócz Polski w grupie znaleźli się jej sąsiedzi oraz kraje nadbałtyckie należące do UE. Do konstrukcji DEA wykorzystano następujące zmienne (por. tab. 1)<sup>27</sup>:

- a) nakłady: wydatki na zakup środków transportu indywidualnego (w mln EUR)<sup>28</sup>, wydatki na zakup usług transportowych

<sup>26</sup> *Ibidem*, s. 43–44.

<sup>27</sup> J. Adamczyk, T. Nitkiewicz, *op.cit.*, s. 138–139.

<sup>28</sup> *EU transport in figures*. Statistical pocketbook, European Commission 2011, s. 26.

- (w mln EUR)<sup>29</sup>, wydatki gospodarstw domowych na transport (mln EUR)<sup>30</sup>, zużycie paliw (w TOE)<sup>31</sup>,
- b) efekty: przewóz osób (w mln pkm)<sup>32</sup>,
- c) niepożądane efekty: ofiary śmiertelne (w osobach)<sup>33</sup>, emisja CO<sub>2</sub> (w tys. ton)<sup>34</sup>.

Tabela 1. Wielkości nakładów, efektów oraz efektów niepożądanych w wybranych krajach Unii Europejskiej w 2009 r. – zmienne modelu DEA

Kraj	Wydatki na zakup środków transportu indywidualnego*	Wydatki na zakup usług transportowych*	Wydatki gospodarstw domowych na transport	Zużyte paliwo	Przewóz osób samochodami, autobusami i busami	Ofiary śmiertelne w wypadkach drogowych	Emisja CO <sub>2</sub>
	mln EUR			TOE	mld pkm	os.	tys. ton
Czechy	2259	1846	8013	315	88,4	901	132925
Dania	3706	1301	11787	13260	59,5	303	60985
Finlandia	2270	2019	9102	98	71,8	279	66336
Litwa	439	500	2884	117	38,9	370	21609
Niemcy	76900	34330	191230	4565	949,2	4152	919698
Polska	4770	3375	17250	706	309,4	4572	376659
Słowacja	577	782	2733	17	31,8	384	43404

\* Kolumny 1–2 dotyczą wydatków tylko dla gospodarstw domowych.

Źródło: opracowanie własne na podstawie <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>; baza danych Eurostatu [7.04.2012]; EU..., s. 26, 44–48, 97.

Jak wynika z danych zawartych w tabeli 1, największe wydatki na transport były w Niemczech i Polsce, najmniejsze zaś na Litwie. Innym nakładem jest ilość zużytego paliwa, najwyższą wartością tej zmiennej charakteryzowała się Dania, najniższą zaś Słowacja. Największy udział w przewozach stanowiły Niemcy i Polska, najniższy Litwa i Słowacja. Polska miała najwięcej wypad-

<sup>29</sup> *Ibidem*, s. 26.

<sup>30</sup> *Ibidem*, s. 26.

<sup>31</sup> TOE – *Thousand tonnes of oil equivalent* (tysiąc ton ekwiwalentu ropy naftowej), Eurostat, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu> [7.04.2012].

<sup>32</sup> *EU transport in figures, op.cit.*, s. 44–45. Wartość obliczona jako suma pkm dla samochodów, autobusów i busów, pkm – *passenger-kilometer* (pasażerokilometr).

<sup>33</sup> *Ibidem*, s. 97.

<sup>34</sup> Eurostat, *op.cit.*

ków drogowych w stosunku do analizowanych jednostek i drugie miejscem pod względem wielkości innych niepożądanych efektów, emisji CO<sub>2</sub>. Niemcy bardzo podobnie, tyle że w emisji dwutlenku węgla plasowały się na pierwszym miejscu i na drugim pod względem wypadków śmiertelnych.

Tabela 2. Wskaźniki efektywności ekonomicznej dla modelu CCR-DEA zorientowanego na nakłady

Wyszczególnienie	Czechy	Dania	Finlandia	Litwa	Niemcy	Polska	Słowacja
Efektywność	0,55	0,5	0,42	1	0,3	1	0,62
$\lambda_{CZK}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{DK}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{FI}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{LT}$	0,72	0	0,92	1	0	0	0,82
$\lambda_{DE}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{PL}$	0,19	0,19	0,12	0	3,07	1	0
$\lambda_{SK}$	0	0	0	0	0	0	0
$s^{-1}$	0	931,53	0	0	8559,6	0	0
$s^{-2}$	0	0	0	0	0	0	77,64
$s^{+1}$	0	0	0	0	0	0	0
Efekty skali	0,91	0,19	1,04	1	3,07	1	0,82

Źródło: opracowanie własne na podstawie tabeli 1.

Zmienne posłużyły do konstrukcji trzech typów wskaźników: efektywności ekonomicznej transportu, efektywności ekologicznej transportu oraz efektywności społecznej transportu, które oceniły transport drogowy wyżej wymienionych krajów w odniesieniu do zrównoważonego rozwoju. W przypadku wskaźnika efektywności ekonomicznej za nakłady uznaje się wydatki na zakup środków transportu indywidualnego oraz wydatki na zakup usług transportowych, za efekty zaś przewóz osób. Z kolei na wskaźnik efektywności ekologicznej wpływ ma zużycie paliw – traktowane jako nakłady, efektem jest przewóz osób, efektem niepożądanym zaś emisja CO<sub>2</sub>, która podlegać powinna minimalizacji (dlatego traktuje się tę kategorię podobnie jak nakłady). Do konstrukcji wskaźnika społecznego potrzebne będą zmienne, takie jak wydatki gospodarstw domowych na transport, które uważa się za nakłady, przewóz osób – jako efekty, natomiast efektami niepożądanymi są ofiary śmiertelne. W tabelach 2–4 przedstawiono te wskaźniki w odniesieniu do pozostałych państw, które zostały wyliczone na podstawie modelu CCR-DEA zorientowanego na nakłady.

Tabela 3. Wskaźniki efektywności ekologicznej dla modelu CCR-DEA zorientowanego na nakłady

Wyszczególnienie	Czechy	Dania	Finlandia	Litwa	Niemcy	Polska	Słowacja
Efektywność	0,53	0,54	1	1	0,6	0,71	1
$\lambda_{CZK}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{DK}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{FI}$	0,83	0	1	0	0,95	3,63	0
$\lambda_{LT}$	0,74	1,53	0	1	22,64	1,25	0
$\lambda_{DE}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{PL}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{SK}$	0	0	0	0	0	0	1
$s^{-1}$	0	7007,6	0	0	0	0	0
$s^{-2}$	0	0	0	0	0	0	0
$s^{+1}$	0	0	0	0	0	0	0
Efekty skali	1,57	1,53	1	1	23,59	4,88	1

Źródło: opracowanie własne na podstawie tab. 1.

Tabela 4. Wskaźniki efektywności społecznej dla modelu CCR-DEA zorientowanego na nakłady

Wyszczególnienie	Czechy	Dania	Finlandia	Litwa	Niemcy	Polska	Słowacja
Efektywność	0,88	0,76	1	1	0,89	1	0,84
$\lambda_{CZK}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{DK}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{FI}$	0,13	0,83	1	0	13,22	0	0
$\lambda_{LT}$	2,04	0	0	1	0	0	0,72
$\lambda_{DE}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{PL}$	0	0	0	0	0	1	0,01
$\lambda_{SK}$	0	0	0	0	0	0	0
$s^{-1}$	0	14,51,4	0	0	49549	0	0
$s^{-2}$	0	0	0	0	0	0	0
$s^{+1}$	0	0	0	0	0	0	0
Efekty skali	2,17	0,83	1	1	13,22	1	0,74

Źródło: opracowanie własne na podstawie tab. 1.

Jak wynika z danych zawartych w tabelach 2–4, wszystkie państwa, których efektywność w danej kategorii wynosiła 1, charakteryzowały się stałymi efektami skali<sup>35</sup> oraz nie wzorowały się na zachowaniach pozostałych uczestników rynku, były skupione na swoim podejściu do konwersji nakładów w efekty.

<sup>35</sup> Efekty skali (suma lambda) większe od 1 świadczą o niekorzyściach skali, równe 1 o stałych korzyściach skali, mniejsze od 1 – o rosnących korzyściach skali.

Można zauważyć, że krajem, którego transport był efektywny w trzech aspektach: ekonomicznym, ekologicznym i społecznym, była Litwa. Na tle pozostałych krajów wypadła bardzo korzystnie w odniesieniu do zjawiska, jakim jest zrównoważony transport, pod względem osiągnięcia jego celów. Stanowiła również wzorzec w trzech rozpatrywanych płaszczyznach dla krajów nieefektywnych. Polska zaś na tle tych siedmiu krajów zadowolila się tylko efektywnością ekonomiczną oraz społeczną i w tych obszarach mogła poszczycić się mianem wzoru – szczególnie widać to w strukturze benchmarkingu dla Czech, Danii, Finlandii, Niemiec w obszarze ekonomicznym i dla Słowacji w obszarze społecznym (analiza pozioma współczynnika  $\lambda_{PL}$ ). Jeśli chodzi o aspekty ekologiczne zrównoważonego transportu, to są one kwestią, która wymaga zastanowienia. Polski sektor transportu dzielił spory dystans w sferze ekologicznej w stosunku do Finlandii, Litwy i Słowacji, co oznacza, że Polska gospodarowała zasobami naturalnymi (paliwami) nieracjonalnie, a przy tym nie ograniczała negatywnych skutków transportu do poziomu zadowalającego. Wzorowała się głównie na zachowaniach Finlandii i Litwy, struktura benchmarkingu to 74% wzorca Finlandii i 26% Litwy. Być może efekt, jakim jest przewóz osób (który świadczy też o dostępności i częściowo o mobilności), był zoptymalizowany, co wynika ze wskaźników efektywności ekonomicznej i społecznej, ale w działalności transportowej brak było jakiegokolwiek spójności ekologicznej. Ponadto wskaźnik niekorzyści skali był na tyle duży, że obszar ekologiczny Polski (w odniesieniu do transportu) wymagał dodatkowych działań usprawniających. Tak niekorzystna efektywność ekologiczna transportu w dłuższej perspektywie mogła przenieść swoje odbicie na efektywność społeczną. Brak jakichkolwiek działań zmierzających do poprawy przyczynił się do spadku dobrobytu i zadowolenia, ostatecznie mógł pociągnąć za sobą kwestie finansowe i wpłynąć niekorzystnie na obszar ekonomiczny (dla przejrzystości należy przypomnieć warunek harmonii systemów triady). Działań wymagających zreformowania tylko w jednym obszarze można doszukać się również dla innego kraju – Finlandii. W przypadku tego państwa zauważana była nieefektywność tylko w obszarze ekonomicznym, z którym mogło ono poradzić sobie bardzo szybko, ponieważ tą sferą jest najłatwiej manipulować w przeciwieństwie do obszarów ekologicznego i społecznego. Dlatego Finlandia w porównaniu z Polską miała większe szanse na zrealizowanie celów zrównoważonego transportu. Najbardziej zaskakujące są zestawienia dla Niemiec, które na tle badanych krajów wypadają najbardziej niekorzystnie. Oprócz nieefektywności charakteryzowały się najsilniej-

szymi niekorzyściami skali oraz nadmiarami nakładów, z którymi nie potrafiły sobie poradzić, co oznacza, że sektor transportu nie realizował celów zrównoważonego transportu.

Oczywiście taka interpretacja może dziwić, jednak jest ściśle powiązana z jakością danych statystycznych oraz doborem próby badawczej (jej wielkością). Problem pojawia się, gdy mowa o danych dotyczących paliw – każdy kraj dysponuje inną strukturą paliw, pozyskiwanych z różnych źródeł (inna jest struktura konsumpcji energii, inna przyczynia się do emisji GHG i pozostałych zanieczyszczeń). Przykładem mogą być właśnie Niemcy, których zużycie biopaliw w działalności transportowej stanowiło największy udział spośród badanych krajów, natomiast ze względu na kompletność danych za zmienną przyjęto niealternatywne paliwa. Stąd też otrzymane zestawienia służą jedynie za eksperyment zastosowanej metodyki badawczej. Gdyby porównywać działalność transportową do określonego regionu, gdzie jakość danych jest bardziej rzetelna, badana próba jest jednolita (działa na tym samym rynku, ma podobną kulturę, podobnie zaspokaja swoje potrzeby) i odpowiednio duża, wówczas model CCR-DEA byłby stosownym narzędziem, które może zbadać jednostki pod kątem realizacji celów zrównoważonego transportu i przedstawianego przez nią stopnia sprawności działania.

## Podsumowanie

Rezultatem dokonanych analiz jest otrzymanie wskaźników efektywności transportu, które obejmują trzy wymiary: ekonomiczny, ekologiczny i społeczny. Wskaźniki te służą jako baza oceny innych jednostek na tle określonej grupy pod względem realizacji celów zrównoważonego transportu. Taki rodzaj analiz pozwala na identyfikację jednostek efektywnych i nieefektywnych w każdym z aspektów zrównoważonego rozwoju. Jednostki efektywne mogą posłużyć jako wzorce benchmarkingowe dla nie w pełni efektywnych podmiotów i identyfikację obszarów, które wymagają usprawnienia działań, tym samym wskazują drogę do optymalizacji efektywności i osiągnięcia pożądanego poziomu zrównoważenia. Metoda jest na tyle istotna i interesująca, że porównuje jednostkę w odniesieniu do innych podmiotów i staje się przydatna pod kątem tworzenia wytycznych dla spójności ekonomicznej, ekologicznej i społecznej badanych uczestników rynku.

## Literatura

- Adamczyk J., Nitkiewicz T., *Programowanie zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw*, PWE, Warszawa 2007.
- Analiza istniejących danych statystycznych pod kątem ich użyteczności dla określenia poziomu zrównoważonego rozwoju transportu wraz z propozycją ich rozszerzenia. Raport z realizacji ekspertyzy*, Jelenia Góra–Warszawa 2008.
- Cherchye L., *Topics in Non-parametric Production and Efficiency Analysis*, FETEW K.U. Leuven, Leuven 2001.
- Cooper W., Seiford L., Tone K., *Data Envelopment Analysis: a Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-solver Software*, Kluwer, Dordrecht 2000.
- EU transport in figures*. Statistical pocketbook. European Commission 2011.
- Eurostat, baza danych <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>.
- Guzik B., *Podstawowe możliwości analityczne modelu CCR-DEA*, „Badania operacyjne i decyzje” 2009, nr 1.
- Hernas B., *Szyć na miarę*, „Komunikacja Publiczna” 2009, nr 3/36.
- Kisielewska M., *Pojęcie efektywności w metodach analizy granicznej, Przedsiębiorstwa w procesie przemian otoczenia*, red. B. Kryk, Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania Uniwersytetu Szczecińskiego, WNUS, Szczecin 2008, nr 1.
- Kryk B., *Efektywność ekonomiczno-ekologiczna a cele gospodarowania*, w: *Państwo i rynek w gospodarce*, red. D. Kopycińska, PTE, Szczecin 2003.
- Kryk B., *Ekorozwój jako przyjęta koncepcja rozwoju społeczno-ekonomicznego a inwestycje ekologiczne*, *Problemy mikroekonomii menedżerskiej*, red. D. Kopycińska, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Prace Katedry Mikroekonomii nr 8, WNUS, Szczecin 2003, nr 367.
- Litman T., Burwell D., *Issues in sustainable transportation*, „International Journal of Global Environmental Issues” 2006, Vol. 6, No. 4.
- UITP (International Association of Public Transport), *Przerwać błędne koło*, „Komunikacja Publiczna” 2009, nr 2/35.



## APPLICATION OF LINEAR PROGRAMMING TO ESTIMATE EFFICIENCY OF SUSTAINABLE TRANSPORT

### Summary

The article presents the analytical capabilities of the CCR-DEA model in the context of sustainable transport. Constructed at the same rates of economic efficiency, environmental and social transport. It also identifies the methodology of calculation, using linear programming and created a sample data matrix. The solutions were obtained through the optimization problems bringing constraints and objective function of the fractional linear form.

**Keywords:** sustainable transport, efficiency, CCR-DEA.

**JEL Code:** G32

*Translated by Elżbieta Szaruga*