

Economic Analysis & Policy Group

Working Paper Series

WP No. 8

A valuation of the eco-efficiency using the DEA models – a double stage method

Hodnotenie eko-efektívnosti pomocou DEA modelov - dvojkroková metóda

EAPG Working Paper Series

*Department of Economic Policy
Faculty of National Economy
University of Economics in Bratislava*

Published by:

*o. z. SOLIM
Bakošova 24
841 03 Bratislava*

*Phone: +421 905 157 601
Email: eapg@ozsolim.sk
Web: www.ozsolim.sk/eapg*

Author: Peter Silanič

Date: 20.12.2013

Language: Slovak

ISSN 1338-2632

EAPG Working Paper Series

WP No. 8

A valuation of the eco-efficiency using the DEA models – a double stage method

Hodnotenie eko-efektívnosti pomocou DEA modelov – dvojkroková metóda

December 2013

Mgr. Ing. Peter Silanič, PhD.

University of Economics in Bratislava
Faculty of National Economy, Department of Economic Policy
Dolnozemska cesta 1, 852 32 Bratislava

Email: peter.silanic@gmail.com

Peer-reviewed working paper

(recenzovaný working paper)

This working paper is published as a part of research project

VEGA 1/0421/11 “Formovanie hospodárskej politiky pre dlhodobý ekonomický rast”
and VEGA 1/0906/12 „Technologická zmena, dobiehanie a ekoefektívnosť: rast a
konvergencia v krajinách EÚ“.

This Working Paper should not be reported as representing the views of the
Department of Economic Policy or o.z. SOLIM.

The views expressed in this Working Paper are those of the author(s) and do not
necessarily represent those of the Department of Economic Policy or o.z. SOLIM.
Working Papers describe research in progress by the author(s) and are published to
elicit comments and to further debate.

A valuation of eco-efficiency using the DEA models – double stage method

Hodnotenie eko-efektívnosti pomocou DEA modelov – dvojkroková metóda

Peter Silanič

Abstract

We show with using of illustrative example the functioning of the double-stage method for assessing eco-efficiency of firms, which produce not only a desired output, but also an undesirable output. This method is based on the traditional DEA model, namely the additive DEA models, which use the measure of efficiency based on slack variables. We explain why the traditional approach with the inclusion of an additional boundary (limiting polluting emissions) may not work properly and explain how to solve the problem mentioned double-stage method.

Keywords:

eco-efficiency, DEA models, undesirable output

JEL classification: L51, Q57

Abstrakt

Na ilustratívnom príklade ukážeme fungovanie dvojkrokovej metódy na hodnotenie eko-efektívnosti firiem, ktoré okrem žiaduceho výstupu produkujú aj emisie, teda výstup nežiaduci. Táto metóda je založená na tradičnom DEA modeli, konkrétne na aditívnom DEA modeli, ktorý využíva mieru efektívnosti založenú na doplnkových premenných. Vysvetlíme, prečo tradičný prístup so zahrnutím dodatočného ohraničenia (limitujúceho tvorbu emisií) nemusí fungovať správne a vysvetlíme, ako daný problém rieši spomínaná dvojkroková metóda.

Kľúčové slová:

eko-efektívnosť, DEA modely, nežiaduci výstup

JEL klasifikácia: L51, Q57

Obsah

ÚVOD.....	4
1 TVORBA CO₂ EMISÍ PRI PRODUKCII CEMENTU.....	7
2 MERANIE EFEKTÍVNOSTI	8
2.1 DATA ENVELOPMENT ANALYSIS – CCR MODEL	8
2.2 MIERA EFEKTÍVNOSTI ZALOŽENÁ NA DOPLNKOVÝCH PREMENNÝCH	12
3 MODEL PRE HODNOTENIE EKO-EFEKTÍVNOSTI – DVOJKROKOVÁ METÓDA.....	15
3.1 DÁTA.....	15
3.2 ŠPECIFIKÁCIA MODELU A JEHO VÝSLEDKY	16
3.2.1 <i>Model A</i>	17
3.2.2 <i>Model B</i>	21
3.2.3 <i>Model C</i>	23
ZÁVERY	26
POUŽITÁ LITERATÚRA	28
PRÍLOHA	29

Úvod

V súčasnosti sa čoraz viac dostávajú do popredia otázky týkajúce sa životného prostredia a jeho znečisťovania. S rozvojom hospodárstva sa totiž čoraz viac životné prostredie dehonestuje. Základným cieľom hospodárskych politík celého sveta je hospodársky rast, ktorý je meraný rastom reálneho HDP. Ako dobre vieme, jednou z veľkých nevýhod HDP ako ukazovateľa prosperity je práve to, že neberie do úvahy negatívne vplyvy na životné prostredie. Ako uvádza Lisý (2005), *skúsenosti ukazujú, že dynamika vývoja HDP neodráža komplexne zmeny vo vývoji blahobytu občanov, pretože niektoré zložky HDP nevedú k rastu individuálneho blahobytu a na druhej strane niektoré ekonomické aktivity sa nerealizujú prostredníctvom trhu, a preto nie sú začlenené do HDP napriek tomu, že boli vyprodukované*. A neskôr v tej istej práci píše, že *negatívne na ekonomický blahobyť uplývajú choroby z povolania, zlé životné prostredie, zločinnosť*.

Vzniklo už viacero prác, ktoré sa týmto problémom zaoberali a pokúšajú sa zaviesť rôzne alternatívne ukazovatele blahobytu. Ekologické otázky sa snaží zohľadniť tzv. zelený HDP. Tento ukazovateľ predstavuje úpravu klasického HDP o náklady, ktoré by bolo potrebné vynaložiť na odstránenie škôd na životnom prostredí, spôsobených práve rastom HDP. Môžeme však povedať, že žiaden z alternatívnych ukazovateľov hospodárskeho rastu sa z rôznych príčin v praxi neuchytil. Požiadavky na skvalitňovanie životného prostredia, alebo aspoň na zamedzenie zhoršovania jeho stavu, sú stále aktuálne. Navyše, na základe rôznych strategických dokumentov medzinárodných organizácií môžeme tvrdiť, že v budúcnosti bude problematika životného prostredia zohrávať stále dôležitejšiu úlohu.

Strategickým dokumentom, ktorý bude v najbližšom období formovať aj prístup Slovenska k problematike životného prostredia, je dokument Stratégia Európa 2020. Tento dokument má nahradiť Lisabonskú stratégiu a je postavený na troch vzájomne prepojených prioritných oblastiach (Európska komisia, 2012):

- inteligentnom raste, rozvoji hospodárstva založeného na znalostiach a inováciách,
- udržateľnom raste podporujúcom nízkoemisné konkurencieschopné hospodárstvo s efektívnou spotrebou zdrojov a
- inkluzívnom raste podporujúcom vysokú zamestnanosť, sociálnu a územnú súdržnosť.

Nová európska stratégia si na úrovni EÚ stanovila dosiahnuť do roku 2020 nasledujúce hlavné ciele (Stratégia 2020, 2012):

- zamerať sa na zvýšenie miery zamestnanosti žien a mužov vo veku od 20 do 64 rokov na 75 %, okrem iného zvýšením účasti mladých ľudí, starších pracovníkov a

pracovníkov s nízkou kvalifikáciou, ako aj zlepšením začlenenia legálnych migrantov,

- zlepšovať podmienky pre výskum a vývoj najmä s cieľom zvýšiť celkovú úroveň verejných a súkromných investícií v tomto sektore na 3 % HDP,
- znížiť emisie skleníkových plynov o 20 % v porovnaní s úrovňami v roku 1990, zvýšiť podiel energie z obnoviteľných zdrojov na konečnej spotrebe energie na 20 % a pokročiť na ceste k zvýšeniu energetickej efektívnosti o 20 % (EÚ je odhodlaná prijať rozhodnutie o tom, že obmedzenie emisií do roku 2020 v porovnaní s úrovňami z roku 1990 zvýši na 30 %, ak sa ostatné rozvinuté krajiny zaviazu k porovnateľnému zníženiu emisií a ak rozvojové krajiny prispejú primerane svojej zodpovednosti a možnostiam),
- zvýšiť úroveň vzdelania, a to najmä úsilím o zníženie miery predčasného ukončenia štúdia na menej ako 10 % a zvýšením podielu ľudí vo veku 30 – 34 rokov, ktorí ukončili vysokoškolské vzdelanie, aspoň na 40 %,
- podporovať sociálne začlenenie, najmä prostredníctvom znižovania chudoby, snahou o vymanenie aspoň 20 miliónov ľudí z ohrozenia chudobou alebo sociálneho vylúčenia.

Z hľadiska využitia regulácie sa ako veľmi zaujímavý javí cieľ znížiť emisie skleníkových plynov o 20 % v porovnaní s úrovňami v roku 1990. Samozrejme, že Európska únia tým nechce znížiť možnosti hospodárskeho rastu a objem celkovej produkcie. Bude preto potrebné nájsť taký spôsob regulácie, ktorým sa dosiahne požadované zníženie tvorby emisií a zároveň bude motivovať k zvyšovaniu efektivity regulovaných firiem. Zvyšovanie efektivity je totiž jediným možným spôsobom, ako zachovať a prípadne zvýšiť objem produkcie a zároveň znížiť množstvo produkovaných emisií. Preto je dôležité pri každom uvažovanom spôsobe regulácie skúmať jeho dopad na efektívnosť firiem, ktoré majú tejto regulácii podliehať.

Mnohé krajiny budú musieť vynaložiť ešte veľa úsilia, aby splnili cieľ, ktorý si EÚ v oblasti znižovania tvorby skleníkových plynov vo svojom strategickom dokumente Stratégia 2020 stanovila. V tabuľke 1 uvádzame prehľad produkcie skleníkových plynov pre štáty EÚ v tisícoch ton.

Tabuľka 1**Emisie skleníkových plynov v tisícoch ton (CO₂ ekvivalent)**

	1990	2001	2010
EÚ 27	5 583 135	5 131 258	4 720 878
EÚ 15	4 249 345	4 182 628	3 797 613
Belgium	143 281	145 455	132 459
Bulgaria	114 298	65 695	61 427
Czech Republic	195 822	145 573	139 158
Denmark	68 604	69 721	61 065
Germany	1 246 138	1 053 763	936 544
Estonia	40 857	17 617	20 517
Ireland	55 163	70 065	61 314
Greece	105 005	128 033	118 287
Spain	282 821	381 623	355 898
France	558 990	564 726	522 373
Italy	519 246	557 503	501 318
Cyprus	6 468	9 958	10 838
Latvia	26 556	10 810	12 077
Lithuania	49 433	20 425	20 810
Luxembourg	12 834	10 077	12 075
Hungary	97 310	79 168	67 679
Malta	2 036	2 724	3 035
Netherlands	212 020	215 053	210 053
Austria	78 162	84 344	84 594
Poland	457 437	381 506	400 865
Portugal	60 077	83 212	70 599
Romania	253 333	143 112	121 355
Slovenia	18 466	19 691	19 522
Slovakia	71 775	52 351	45 982
Finland	70 365	74 461	74 556
Sweden	72 755	69 724	66 232
UK	763 884	674 872	590 247
Iceland	3 501	3 814	4 542
Liechtenstein	231	255	233
Norway	49 803	54 654	53 896
Switzerland	53 057	52 831	54 247

Zdroj: Eurostat, EEA

Následne v tabuľke 2 uvádzame prehľad najväčších producentov CO₂ podľa odvetví hospodárstva. Týchto šesť odvetví produkuje v EÚ spolu až 45 % celkových emisií CO₂.

Tabuľka 2

Tvorba emisií CO₂ v Európskej únii podľa odvetví

Odvetvie	Percentuálny podiel emisií CO ₂
Výroba a rozvod elektriny, plynu a vody	29,90 %
Výroba kovov a kovových výrobkov	5,40 %
Výroba koksu, rafinovaných ropných produktov a jadrového paliva	3,60 %
Výroba chemikálií, chemických výrobkov a chemických vlákien	2,50 %
Výroba skla, keramiky a stavebných materiálov (vrátane cementu)	2,70 %
Výroba celulózy, papiera a výrobkov z papiera, tlačiarenské služby	1,00 %

Zdroj: Európska komisia, EEA

Problematika produkcie skleníkových plynov a jej regulácia je príliš široká. Pre potreby analyzovania vplyvu tejto regulácie na efektívnosť regulovaných subjektov si zvolíme len jednu konkrétnu oblasť hospodárstva. Na základe dostupnosti údajov a taktiež významu pri tvorbe skleníkových plynov sme do praktickej časti tejto práce vybrali produkciu cementu. Tejto oblasti a vplyvu regulácie na jej efektívnosť budú venované nasledujúce časti tejto práce.

1 Tvorba CO₂ emisií pri produkcii cementu

Cement predstavuje jednu zo základných surovín používaných v stavebníctve. Na trh sa dodáva široká paleta rôznych typov s rôznymi vlastnosťami a s obsahom rôznych zložiek. Výroba cementu zároveň predstavuje energeticky náročný proces a v súčasnosti sa ešte stále vo výraznej miere opiera o využívanie fosílnych palív.

Výrobu cementu tvoria tri hlavné procesy (Harrison a Radov, 2002):

1. príprava surovín,
2. výroba cementárskeho slinku v rotačných peciach a
3. mletie slinku spolu s ďalšími aditívami na cement,

príčom energeticky najnáročnejší je druhý bod, pri ktorom sa páli slinok v peciach pri teplote až 1480 °C. Počas pálenia sa CaCO₃ (vápenec) rozkladá na CaO (pálené vápno) a CO₂ (oxid uhličitý). Energia, ktorá je potrebná na výrobu polotovaru, dosahuje hodnoty približne 1700 J/g. Výsledná spotreba energie však môže vzrásť vďaka tepelným stratám. Vysoká spotreba energie a tiež veľké množstvo produkovaného

skleníkového plynu CO₂ robí z výroby cementu veľkého prispievateľa ku globálnemu otepľovaniu Zeme.

Pri výrobe cementu teda existujú tri podstatné zdroje CO₂ emisií: (1) spaľovanie palív v peciach, (2) výroba slinku z vápenca a (3) spotreba elektrickej energie vyrobenej mimo cementárni (nepriame emisie). Približne 34 % emisií CO₂ vzniká pri spaľovaní palív, 54 % je výsledkom výroby slinku a zvyšných 12 % je spojených s produkciou elektrickej energie.

Aj na základe toho vidieť, že najväčší priestor na zvyšovanie efektivity je v tomto prípade pri druhom kroku, a to pri výrobe slinku. Podstatné zvýšenie efektivity bolo doposiaľ dosiahnuté najmä využívaním stále efektívnejších pecí a efektívnejších druhov palív (Harrison a Radov, 2002).

2 Meranie efektívnosti

Základným problémom každej ekonomiky je obmedzenosť, resp. vzácnosť zdrojov. Ich vzácnosť spočíva v tom, že sú žiaduce a nie je ich dostatok pre každého v neobmedzenom množstve. Žiadna ekonomika nemá dostatok zdrojov na to, aby vyrobila všetko, čo by každý jednotlivec chcel. Ekonómia ako veda sa zaoberá rozdeľovaním týchto vzácných zdrojov medzi rôzne alternatívne formy ich využitia. Z toho vyplýva, že pri ich využívaní sa musíme usilovať o maximálnu efektivitu. Veľmi zjednodušene to znamená, že určité množstvo výstupu sa usilujeme vyrobiť s minimom potrebných vstupov, alebo, že s daným množstvom vstupov chceme vyprodukovať maximálny výstup.

Ako uvádza Luptáčik v (Luptáčik, 2010), problém optimálnej alokácie obmedzených zdrojov je predmetom nielen mikroekonómie (neoklasická teória spotrebiteľa a neoklasická teória firmy), ale taktiež predmetom makroekonómie (teória ekonomického rastu). Nás bude zaujímať hlavne alokácia obmedzených zdrojov v regulovanom prostredí. Budeme sa teda zaoberať tým, ako sa pri alokácii obmedzených zdrojov správa firma, ktorá podlieha rôznym regulačným opatreniam zo strany štátu. Môže ísť napríklad o reguláciu z dôvodu výnimočného postavenia na trhu (prirodzené monopoly), reguláciu z dôvodu dodržiavania ekologických štandardov a pod. Zaujímavé je potom sledovať, ako sa mení správanie regulovanej firmy pod vplyvom samotnej regulácie. Špeciálne nás bude zaujímať vplyv na efektívnosť regulovanej firmy. Z tohto dôvodu sa potrebujeme najprv venovať samotnému pojmu efektívnosť a spôsobom merania efektívnosti.

V nasledujúcej časti sa budeme bližšie venovať jednej z moderných metód merania efektívnosti. Ide o neparametrický prístup, ktorý je v literatúre známy pod označením DEA - Data Envelopment Analysis.

2.1 Data Envelopment Analysis – CCR model

DEA predstavuje neparametrický prístup k analýze efektivity a produktivity homogénnych jednotiek. Na základe napozorovaných údajov konštruujeme hranicu

efektívnosti, resp. hranicu produkčných možností. Každé odchýlenie sa od tejto hranice produkčných možností je v tejto metodike považované za neefektívnosť. Uvádzaná neparametrickosť spočíva v tom, že pri konštrukcii hranice efektívnosti nevyužívame žiaden predpoklad o funkčnom tvare tejto hranice a následne neodhadujeme parametre tejto funkcie. Ako príklad parametrického prístupu môže slúžiť odhadovanie parametrov Cobb-Douglasovej produkčnej funkcie, kde predpokladáme, že celkový výstup y je funkciou vstupov x_1, \dots, x_n , pričom výstup je so vstupmi prepojený funkčným tvarom:

$$y = \alpha_0 x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n}$$

Úlohou je potom odhadnúť len koeficienty $\alpha_0, \dots, \alpha_n$. Nikdy si však nebudeme môcť byť istí, že práve tento zvolený funkčný tvar pre produkčnú funkciu je ten správny.

Hranicu efektívnosti pri DEA metodike teda nekonštruujeme za pomoci určitej produkčnej funkcie, ktorej funkčný tvar prijmeme za daný a ktorej parametre odhadujeme pomocou nástrojov ekonometrie. V tomto prípade hranicu efektívnosti vytvárame pomocou najefektívnejších jednotiek spomedzi tých, ktoré hodnotíme. V DEA sa tieto jednotky označujú ako DMU (z anglického *decision making unit*).

O význame a dôležitosti merania efektivity sa vyjadril Farrel (Farrel, 1957) v roku 1957. Táto práca sa zároveň považuje za počiatok myšlienok vedúcich neskôr k vzniku súčasnej podoby DEA. Farrel v nej tvrdí, že problém merania produkčnej efektivity je zaujímavý z pohľadu teórie, ako aj z pohľadu praxe. Ak existujú nejaké teoretické argumenty ohľadom relatívnej efektívnosti rôznych ekonomických subjektov, je dôležité vedieť ich efektívnosť zmerať a tieto argumenty podporiť alebo vyvrátiť. Na druhej strane, ak sa hospodárska prax zaoberá konkrétnym odvetvím, je dôležité vedieť, aký nárast produkcie sa dá očakávať zvýšením samotnej efektívnosti bez použitia dodatočných zdrojov.

Najjednoduchší prípad nastáva, ak každá jednotka má len jeden výstup a jeden vstup. Efektívnosť potom môžeme definovať ako

$$\text{efektívnosť} = \frac{\text{výstup}}{\text{vstup}}.$$

V praxi sa však táto zjednodušená situácia rôznymi spôsobmi komplikuje. V prvom rade na produkciu určitého produktu zvyčajne potrebujeme viacero vstupov, ktoré navzájom kombinujeme. Taktiež zvyčajne každá jednotka (firma, pobočka firmy atď.) produkuje viacero rôznych výstupov, pričom vôbec nemusia existovať trhové ceny, ktorými by bolo možné oceniť tieto výstupy ako aj vstupy a následne dať do podielu ich celkové hodnoty. Ako uvádza Luptáčik (Luptáčik, 2010), tento problém nastáva hlavne pri hodnotení efektivity neziskových organizácií, napríklad miestnych samospráv, škôl, univerzít a nemocníc, prípadne ich organizačných zložiek. Otázkou

teda je, ako definovať a následne merať efektívnosť takýchto relatívne homogénnych jednotiek.¹

Odpoveď na túto otázku nám dáva práve DEA. Na tomto mieste predstavíme len základnú myšlienku tejto metódy. Podrobné odvodenia a mnohé rozšírenia môže nájsť čitateľ napr. v Cooper a kol. (2007). Metodologicky je DEA založená na nasledujúcej definícii relatívnej efektívnosti.

Definícia (Relatívna efektívnosť): Hovoríme, že daná DMU je plne (100 %) efektívna na základe dostupných údajov za ostatné jednotky vtedy a len vtedy, ak z ich výkonnosti nevyplýva, že niektoré zo vstupov alebo výstupov danej DMU by mohli byť zlepšené bez zhoršenia úrovne iných vstupov alebo výstupov.

Ako uvádzajú autori v Cooper a kol. (2007), je dobré si všimnúť, že táto definícia efektivity obchádza potrebu použitia cien, ktoré by mali odrážať relatívnu dôležitosť jednotlivých vstupov a výstupov. Taktiež nevyžaduje explicitne poznať vzťah, ktorým sa vstupy transformujú na výstupy (teda produkčnú funkciu). Tento základný druh efektivity sa zvykne v literatúre označovať ako technická efektivita. V prípade, že máme k dispozícii ďalšie údaje ako ceny vstupov a výstupov, jednotkové náklady a pod., môžeme rozšíriť naše úvahy o ďalšie formy efektivity (napr. alokačná efektivita a rôzne ukazovatele ziskovosti).

DEA teda poskytuje jednoduchý spôsob merania efektivity, a to aj v prípade, že rozhodovacie jednotky produkujú viacero rôznych výstupov pomocou viacerých vstupov. Váhy pre jednotlivé vstupy a výstupy nie sú vopred špecifikované. Každá DMU si zvolí vlastné váhy, pričom táto voľba je ohraničená len jednou podmienkou, že ak by tieto váhy použila hociktorá iná DMU, nesmie sa nachádzať nad hranicou produkčných možností.² Každá DMU, ktorá neleží na hranici produkčných možností, je dominovaná konvexnou kombináciou najbližšie sa nachádzajúcich efektívnych DMU (ležiacich na hranici produkčných možností).

Predpokladajme teda, že máme n rozhodovacích jednotiek ($j=1, 2, \dots, n$), ktorých efektivitu je potrebné určiť. Každá z nich na svoju produkciu využíva m rôznych vstupov ($i=1, 2, \dots, m$) a produkuje s rôznych výstupov ($r=1, 2, \dots, s$). Ich množstvá budeme označovať tak, že DMU_j spotrebováva x_{ij} i -teho vstupu a vyprodukuje y_{rj} výstupu r . Ďalej sa v modeli predpokladá, že všetky $x_{ij} \geq 0$ a $y_{rj} \geq 0$, pričom pre každú DMU je aspoň jeden vstup a aspoň jeden výstup nenulový. Vektory vstupov a výstupov pre každú DMU považujeme za dané a hľadáme príslušné váhy vstupov a výstupov každej DMU. Úlohou je pritom maximalizovať podiel váženého súčtu výstupov a váženého súčtu vstupov pri ohraničení, že tento podiel nesmie byť pre žiadnu DMU väčší ako 1. Toto ohraničenie zabezpečí, že optimálne váhy pre

¹ Homogénnosť posudzovaných jednotiek je predpokladom tohto modelu. Tento predpoklad pravdepodobne spĺňajú rôzne pobočky jednej banky, rôzne katedry danej fakulty resp. univerzity, obce štátu, ale napríklad aj železničné spoločnosti rôznych štátov a pod.

² Prirodzenou požiadavkou na váhy je aj ich nezápornosť.

konkrétnu DMU nebudú viesť k efektívite väčšej ako 1 pre žiadnu DMU.

Ako uvádza Luptáčik (Luptáčik, 2010), existujú dva základné typy DEA modelov. Prvý typ pracuje s predpokladom o konštantných výnosoch z rozsahu, druhý typ modelov tento predpoklad opúšťa. Keďže samotná DEA analýza nie je ťažiskovou témou tejto práce, budeme sa pre jednoduchosť zaoberať len prvým typom modelov. Modely s meniacimi sa výnosmi z rozsahu môže nájsť čitateľ v už spomínanej práci Luptáčika (Luptáčik, 2010), prípadne v iných prácach z tejto oblasti (napr. Cooper a kol. (2007)).

Pre konkrétnu rozhodovaciu jednotku (označme ju DMU_o) máme potom nasledujúcu úlohu:³

$$\begin{aligned} \max_{u,v} h_0(u,v) &= \frac{\sum_{r=1}^s y_{r0} u_r}{\sum_{i=1}^m x_{i0} v_i} \\ \text{s.t.} \quad \frac{\sum_{r=1}^s y_{rj} u_r}{\sum_{i=1}^m x_{ij} v_i} &\leq 1 \quad j = 1 \dots n \\ u_r &\geq 0 \quad r = 1 \dots s \\ v_i &\geq 0 \quad i = 1 \dots m \end{aligned} \quad (1)$$

kde u je s -rozmerný vektor váh pre výstupy, pričom u_r je jeho r -tá zložka a v je m -rozmerný vektor váh pre vstupy, pričom v_i je jeho i -tá zložka. Ak pre DMU_o existujú váhy u a v spĺňajúce podmienky vyššie uvedenej úlohy a príslušná účelová funkcia má s týmito váhami hodnotu 1, tak DMU_o je plne efektívna a leží na hranici produkčných možností. V prípade, že hodnota účelovej funkcie tejto úlohy je menšia ako 1, tak DMU_o je relatívne neefektívna. V literatúre sa tento model podľa jeho autorov (Charnes, Cooper a Rhodes) označuje ako CCR model.

Z takto naformulovanej úlohy jasne vidieť základnú myšlienku tohto DEA modelu. Keďže každá DMU produkuje viacero výstupov z viacerých vstupov, je potrebné ich nejakým spôsobom agregovať, aby sme mohli určiť efektívnosť ako podiel výstupu na jednotku vstupu. Každéj DMU sa umožní zvoliť si vlastné váhy pre vstupy a výstupy a tým priradiť jednotlivým vstupom a výstupom relatívnu dôležitosť. Každá DMU teda môže priradiť väčšiu váhu tej časti výstupov, v ktorých je relatívne efektívnejšia ako ostatné DMU. Pri voľbe váh existuje len jedno ohraničenie (okrem nezápornosti), a to aby žiadna DMU s týmito váhami nepresiahla jednotkovú efektívnosť.

Veľmi dobrou vlastnosťou tejto miery relatívnej efektívnosti (h_o) je to, že nie je nezávislá od použitých jednotiek pre vstupy a výstupy. Dôkaz tohto tvrdenia môžeme nájsť v Cooper a kol. (2007).

V ďalšej časti priblížime iný druh DEA modelov, ktoré dokážu priamo zachytiť aj

³ Takto zostavená úloha sa v literatúre označuje ako *Input-Oriented Model under a Constant Returns-to-Scale Assumption* (Luptáčik, 2010).

tento druh neefektívnosti. Ide o tzv. SBM (slacks-based measure) modely, ktoré sú založené práve na týchto rezervách (*slacks*). Do slovenčiny by sme to mohli preložiť ako miera založená na rezervách, resp. nedostatkoch. Častejšie sa však používa termín doplnkové premenné, ktorý pochádza z teórie lineárneho programovania. Budeme preto používať tento termín, hoci je viac technický.

2.2 Miera efektívnosti založená na doplnkových premenných

Miera efektívnosti založená na doplnkových premenných (SBM - *slacks-based measure*) vychádza z tzv. aditívnych modelov. Predchádzajúci model (CCR) patril do skupiny tzv. radiálnych modelov. Efektívnosť sme merali na základe proporcionálneho zlepšenia všetkých vstupov alebo výstupov. Aditívne modely fungujú na inom princípe. Spomedzi niekoľkých typov aditívnych modelov vyberieme jeden, na ktorom si vysvetlíme ich základný princíp. Podrobnejšie sa tejto problematike venujú Cooper a kol. (2007), ktorí na vysvetlenie uvádzajú nasledujúci model:

$$\begin{aligned}
 \max_{\lambda, s^-, s^+} \quad & z = \sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \\
 \text{s.t.} \quad & X\lambda + s^- = x_0 \\
 & Y\lambda - s^+ = y_0 \\
 & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\
 & s^- \geq 0, s^+ \geq 0, \lambda \geq 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

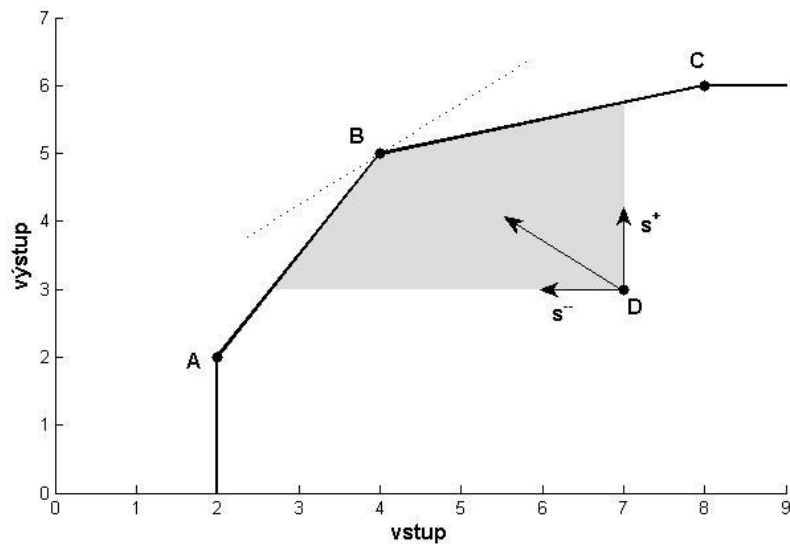
kde X je $m \times n$ rozmerná matica napozorovaných vstupov a Y je $r \times n$ rozmerná matica napozorovaných výstupov. Na vysvetlenie tohto modelu použijeme obrázok 1, kde je znázornený zjednodušený prípad s jediným vstupom a jediným výstupom.

Zo štyroch DMU (A, B, C a D) ležia tri na hranici produkčných možností, ktorá predstavuje hranicu množiny prípustných riešení úlohy (2). Body A, B a C ležia na tejto hranici. Otázkou je, ako ohodnotiť bod D. Prípustné zlepšenie jeho polohy je znázornené vektormi s^- a s^+ a oblasťou medzi nimi (sivá plocha na grafe). Teraz už je jasné, že úloha (2) hľadá pre danú DMU také zníženie vstupov a zvýšenie výstupov, aby sa táto DMU dostala do takého bodu na hranici produkčných možností, ktorý je od nej najviac vzdialený.⁴ Prerušovaná čiara na obrázku naznačuje, že v tomto prípade ide o bod B.

⁴ Poznamenajme, že vzdialenosť sa v tomto prípade meria tzv. l_1 normou, ktorá je definovaná ako súčet absolútnych hodnôt jednotlivých súradníc.

Obrázok 1

Aditívny model



Zdroj: Cooper a kol. (2007)

Po týchto úvahách nám už bude celkom jasná a prirodzená nasledujúca definícia efektívnosti v zmysle aditívneho modelu.

Definícia (ADD efektívnosť): Nech λ^* , s^-* , s^+* sú optimálnym riešením úlohy (2) pre danú DMU. Hovoríme, že táto DMU je ADD efektívna vtedy a len vtedy, ak platí, že $s^-* = 0$ a súčasne $s^+* = 0$.

Aditívny model nám nedáva priamo ohodnotenie efektívnosti jednotlivých DMU, ako tomu bolo v prípade CCR modelu. Preto teraz rozšírime tento model zavedením miery efektívnosti, ktorá spĺňa veľmi dôležitú vlastnosť invariančnosti vzhľadom na použité jednotky, v ktorých sú merané jednotlivé vstupy a výstupy (units invariant). Chceme teda transformovať vektory, ktoré sú výstupom aditívneho modelu, na bezrozmerný skalár. Túto vlastnosť spĺňa už spomínaná miera efektívnosti založená na doplnkových premenných (SBM). Tá je výstupom nasledujúcej úlohy zlomkového programovania (Cooper a kol., 2007):

$$\begin{aligned}
\min_{\lambda, s^-, s^+} \quad & \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{i0}}{1 + \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{r0}} \\
s.t. \quad & X\lambda + s^- = x_0 \\
& Y\lambda - s^+ = y_0 \\
& \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\
& s^- \geq 0, s^+ \geq 0, \lambda \geq 0
\end{aligned} \tag{3}$$

Lahko sa môžeme presvedčiť, že takto definovaná miera efektívnosti spĺňa podmienku nezávislosti od použitých jednotiek, v ktorých meriame vstupy a výstupy.

Dá sa to vidieť z toho, že v zlomkoch s_i^- / x_{i0} a s_r^+ / y_{r0} je čitateľ aj menovateľ meraný v tých istých jednotkách, čím sa tieto jednotky vykrátia a ostáva bezrozmerné číslo. Ďalej platí, že s rastom s_i^- a s_r^+ klesá hodnota príslušného ρ , ktoré je ohraničené zhora aj zdola:

$$0 \leq \rho \leq 1 \tag{4}$$

Aby sme dokázali platnosť týchto dvoch vzťahov, musíme si uvedomiť, že platí $s_i^- \leq x_{i0}$ pre každé i a teda $0 \leq s_i^- / x_{i0} \leq 1$ pre každé i . Z toho vyplýva, že

$$0 \leq \frac{\sum_{i=1}^m s_i^- / x_{i0}}{m} \leq 1$$

Pre výstupy už ten istý vzťah neplatí, pretože doplnkové premenné pri výstupe môžu byť väčšie, ako je hodnota samotného výstupu. Lepšie si tento fakt uvedomíme z obrázku 1. Platí teda len ohraničenie z jednej strany:

$$0 \leq \frac{\sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{r0}}{s}$$

Z týchto vzťahov už vyplývajú nerovnosti (4) a platí, že $\rho = 1$ vtedy a len vtedy, ak sú všetky doplnkové premenné pre vstupy aj výstupy nulové. Na základe týchto výsledkov môžeme teraz uviesť definíciu tzv. SBM efektívnosti.

Definícia (SBM efektívnosť): Nech ρ^* je riešením úlohy (3). Hovoríme, že príslušná DMU je SBM efektívna vtedy a len vtedy, ak platí, že $\rho^* = 1$.

Taktiež sme sa už presvedčili, že táto podmienka je ekvivalentná s podmienkou, že všetky doplnkové premenné sú nulové, t. j. $s^{-*} = 0$ a súčasne $s^{+*} = 0$. Správnou modifikáciou uvedených myšlienok a úvah zostavíme vlastný model na ohodnotenie eko-efektívnosti rozhodovacích jednotiek pri zohľadnení produkcie neželateľného výstupu.

3 Model pre hodnotenie eko-efektívnosti – dvojkroková metóda

3.1 Dáta

Často sa stáva, že požadované údaje nie sú verejne dostupné, alebo ich presné hodnoty nie sú vôbec známe. Niekedy sa však dajú získať približné odhadnuté dáta na základe iných dát a na základe silného vzťahu medzi nimi. Takýmto údajom potom hovoríme proxy dáta. V ďalších častiach práce budeme pracovať práve s takýmito údajmi. Ak, napríklad, poznáme údaj o veľkosti produkcie a zároveň aj mieru využitia kapacít, tak odtiaľ vieme jednoducho dopočítať údaj o celkovej kapacite.

CEMBUREAU (European Cement Association) zverejňuje údaje o produkcii cementu. Na úrovni závodov je pokrytých len niečo okolo 40 % jednotiek. Na úrovni štátov sú dostupné údaje o celkovej produkcii cementu a odhadovanej kapacite. Odtiaľ je možné dopočítať priemernú úroveň využitia kapacít a tú následne použiť pre jednotlivé cementárne.

Pokiaľ ide o výrobu slinku, čo je medziprodukt pri výrobe cementu, tak odhad objemu jeho produkcie je možné získať kombináciou údajov o produkcii cementu z CEMBUREAU databázy a informácií o štruktúre vyrábaného cementu. Každý druh cementu obsahuje špecifický podiel slinku. Prenásobením tohto podielu veľkosťou produkcie cementu dostaneme odhad produkcie slinku. Táto metóda má však pomerne veľký nedostatok. Neuvažuje s možnosťou predaja a nákupu slinku od iných cementární. Produkcia slinku sa pripíše tej cementárni, kde bol slinok spotrebovaný na výrobu cementu, hoci v skutočnosti mohol byť nakúpený od inej cementárne, ktorá ho vyrobila a predala.

Veľkým problémom sú údaje o použitom palive pri výrobe slinku a cementu, ako aj o množstve spotrebovaného tepla pri pálení slinku. Tieto informácie sú dôležité kvôli odhadu množstva vyprodukovaných emisií, pretože tieto priamo závisia od množstva potrebného tepla a druhu použitého paliva. Počas výroby cementu sa emisie tvoria jednak pri výrobe slinku a taktiež pri spaľovaní použitých palív. Prvý druh emisií odhadneme podľa Harrison a Radov (2002) ako súčin odhadnutého množstva vyprodukovaného slinku a priemerného množstva emisií na jednotku produkcie slinku. Množstvo druhého druhu emisií odhadneme na základe spotreby tepla, použitého druhu paliva a jeho emisného faktora.

Používanie takýchto proxy dát má určite svoje slabé stránky, ale v niektorých prípadoch je zozbieranie skutočných dát nemožné, alebo takéto údaje jednoducho nie sú k dispozícii. Takýmto prípadom je aj tvorba emisií pri výrobe cementu na úrovni jednotlivých podnikov. Pomocou vyššie popísaného postupu zhromaždili Harrison a Radov (2002) údaje o francúzskych cementárniach. Tieto proxy dáta môžeme vidieť v tabuľke A, ktorá je súčasťou prílohy.

3.2 Špecifikácia modelu a jeho výsledky

Naším cieľom v tejto časti bude vytvoriť model, ktorý určí efektívnosť rozhodovacích jednotiek a zohľadní pritom aj to, že časť produkcie, ktorú tieto jednotky produkujú, tvoria nežiaduce statky - emisie. Zároveň budeme chcieť tento model rozšíriť o regulačnú podmienku na množstvo produkcie emisií. Porovnaním efektívnosti pred a po zavedení tejto regulačnej podmienky získame odhad vplyvu regulácie na efektívnosť jednotlivých rozhodovacích jednotiek a tiež odvetvia ako celku. Ako sme už spomínali, výsledky budeme numericky ilustrovať na príklade francúzskych cementární, o ktorých sú k dispozícii vhodné dáta.

Do modelu potrebujeme zahrnúť environmentálne štandardy, resp. normy, ktoré musia jednotlivé regulované subjekty dodržiavať. V literatúre je známych viacero spôsobov, ako tieto štandardy špecifikovať. Napríklad, Luptáčik (2010) rozlišuje tri druhy environmentálnych štandardov:

- intenzita regulácie, resp. emisie na jednotku vstupu: $\frac{Emisie}{Input} \leq \alpha_1$
- emisie na jednotku výstupu: $\frac{Emisie}{Output} \leq \alpha_2$
- absolútna úroveň emisií: $Emisie \leq \alpha_3$

Ďalším krokom je vybrať spomedzi rôznych DEA modelov (napr. CCR model, BCC model, Slacks-based measure model) taký, ktorý bude najlepšie vyhovovať podmienkam skúmanej problematiky. CCR model, napríklad, nedokáže zachytiť všetky druhy neefektívnosti. Hlavne z tohto dôvodu je pre naše účely vhodnejší tzv. SBM (*slacks-based measure*) model, ktorému sme sa podrobnejšie venovali v predchádzajúcej časti.

Tým, čo odlišuje našu situáciu od tradičných DEA modelov, je prítomnosť nežiaducich (neželateľných) výstupov - emisií. Podľa spôsobu, ako do týchto DEA modelov môžeme zahrnúť nežiaduce statky, rozlišujú Korhonen a Luptáčik (2004) tri rôzne modely:

- Model A: Emisie sú považované za negatívny výstup.
- Model B: Emisie sú do modelu zahrnuté ako vstupy.
- Model C: Emisie sú do modelu zahrnuté ako vstupy a vstupy sú považované za negatívny výstup.

Keďže máme tri rôzne systémy environmentálnych štandardov a k tomu tri spôsoby, ako na nežiaduce výstupy (emisie) nahliadať, môžeme teoreticky uvažovať deväť rôznych modelov ohodnotenia vplyvu environmentálnej regulácie na efektívnosť rozhodovacích jednotiek (DMU). Poznamenajme ešte, že stále uvažujeme iba s

využitím jedného DEA modelu, a to SBM. V opačnom prípade, by množstvo možných modelov na ohodnotenie vplyvu regulácie na efektívnosť ešte vzrástlo. Postupne sa budeme venovať jednotlivým druhom modelov. Najskôr však ešte uvedme tabuľku popisných štatistík dát, s ktorými budeme pracovať.

Tabuľka 3

Popisné štatistiky vstupných údajov

Premenná	Jednotky	Min	Max	Priemer	Sigma
Emisie	tis. ton	52	755	308,3	153,5
Spotreba tepla	MMBtu	236	3027	1321,2	659,2
Produkcja slinku	tis. ton	59	1014	398,3	206,4
Produkcja cementu	tis. ton	75	1230	500,2	272,0

Zdroj: vlastné spracovanie

V nasledujúcich častiach sa budeme postupne venovať všetkým trom modelom a pri každom z nich implementujeme dve rôzne regulačné ohraničenia, a to povolené množstvo emisií na jednotku vstupu a povolené množstvo emisií na jednotku výstupu. Regulácii pomocou stanovenia absolútnej výšky emisií sme sa nevenovali, pretože tento prístup vyžaduje stanoviť pre každú jednotku exogénne dané povolené množstvo emisií. Tieto množstvá by volili arbitrárne a neboli by nijako zdôvodnené, čo by mohlo viesť k diskriminácii niektorých jednotiek a na druhej strane k zvýhodňovaniu iných jednotiek.

3.2.1 Model A

Ako už bolo spomínané v predchádzajúcej časti, v modeli A budeme s emisiami uvažovať ako s negatívnym výstupom. Tento prístup je veľmi intuitívny, pretože z hľadiska efektívnosti je určite lepšie, ak daná DMU vyprodukuje menej emisií pri ostatných podmienkach nezmenených. Na základe týchto predpokladov a teórie odvodenej v tretej kapitole, vyzerá takýto model nasledovne:

$$\begin{aligned}
 \min_{\lambda, s^-} \quad & \rho = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}} \\
 \text{s. t.} \quad & x_0 = X\lambda + s^- \\
 & y_0^b \geq Y^b \lambda \\
 & y_0^g \leq Y^g \lambda \\
 & s^- \geq 0, \lambda \geq 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

kde m je počet vstupov, x je vektor vstupov, s^- sú doplnkové premenné pre vstupy, y^b je vektor nežiaducich výstupov (*bads*), y^g je vektor žiaducich výstupov (*goods*) a Y^b , Y^g a X sú matice napozorovaných hodnôt nežiaducich a žiaducich výstupov a vstupov.

Z účelovej funkcie úlohy (5) vidíme, že model A hľadá pre každú DMU jej nevyužitú možnosť v znižovaní vstupov v porovnaní s najlepšimi cementárňami. Tieto rezervy nepriamo odhaľujú aj rezervy v eko-efektívnosti, pretože množstvo vyprodukovaných emisií je zvyčajne pozitívne korelované s množstvom spotrebovanej energie. Dokonca v niektorých prípadoch, keď nie je možné merať množstvo vyprodukovaných emisií priamo, používa sa odhad aj na základe množstva spotrebovanej energie pri produkcii firmy.

Do tohto modelu budeme postupne pridávať rôzne formy regulácie množstva emisií. Model musíme vytvoriť tak, aby doplnené regulačné ohraničenie nezvýšilo (teda znížilo alebo nezmenilo) hodnotu účelovej funkcie. Dôjde teda k zníženiu technickej efektívnosti aspoň niektorých DMU, a teda aj k zníženiu priemernej efektívnosti tohto odvetvia ako celku. Toto zníženie efektívnosti, ktoré vzniklo ako dôsledok pridania regulačného ohraničenia do úlohy (5), budeme považovať za vplyv regulácie na efektívnosť príslušných DMU, resp. celého odvetvia.

Model A a regulácia emisií na jednotku vstupu

Pri hodnotení vplyvu regulácie budeme postupovať v dvoch na seba nadväzujúcich krokoch. V prvom kroku vyriešime úlohu (5). Jej výsledkom budú hodnoty efektívnosti bez uplatnenia environmentálnej regulácie. Druhý krok bude predstavovať zohľadnenie regulačného ohraničenia, v tomto prípade reguláciu emisií na jednotku vstupu. Postup bude nasledovný. Označme x_0^* , y_0^{g*} a y_0^{b*} projekcie príslušných premenných na hranicu produkčných možností, ktoré sú výsledkom úlohy (5). To znamená, že platí:

$$\begin{aligned}x_0^* &= x_0 - s^- \\y_0^{g*} &= y_0^g + s^g \\y_0^{b*} &= y_0^b - s^b\end{aligned}$$

Ak vo všeobecnosti máme prípad s viacerými nežiaducimi výstupmi a viacerými vstupmi, je potrebné dávať väčší pozor na to, aby boli pravidlá regulácie stanovené jednoznačne. S týmto problémom sa môžeme vysporiadať napríklad tak, že určíme jeden referenčný vstup a množstvo vyprodukovaných nežiaducich statkov budeme porovnávať vzhľadom k tomuto vstupu. Označme tento referenčný vstup danej rozhodovacej jednotky ako $refx$. Následne overíme splnenie regulačnej podmienky, čo v tomto prípade znamená, či platí

$$\frac{y_{r0}^{b*}}{refx_0^*} \leq \alpha_{1r} \quad \forall r = 1 \dots s_2 \quad (6)$$

pričom v našom prípade, kde máme len jeden nežiaduci výstup, platí $s_2 = 1$. Koeficient α_{1r} je tzv. regulačným koeficientom a udáva intenzitu regulácie. Čím je nižší, tým je regulácia prísnejšia. Ak táto podmienka je splnená, tak regulácia nebude mať žiaden

vplyv na efektívnosť danej DMU, čiže platí $\rho_0^r = \rho_0$, kde ρ_0^r predstavuje efektívnosť po zohľadnení environmentálnej regulácie. V prípade, že podmienka (6) splnená nebude, zdefinujeme novú, tzv. regulačnú doplnkovú premennú s^r , ktorú zohľadníme pri výpočte efektívnosti pod vplyvom regulácie. Regulačná doplnková premenná pre konkrétnu DMU bude mať tvar

$$s_0^r = y_0^{b*} - \alpha_1 x_0^*$$

a následne o túto premennú upravíme výpočet efektívnosti. Koefficient efektívnosti po zohľadnení vplyvu regulácie (zahrňujúci regulačnú doplnkovú premennú) vypočítame v tejto verzii modelu nasledovným spôsobom:

$$\rho_0^r = 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^- + s^r}{x_{i0}} \quad (7)$$

Keďže platí, že $s^r \geq 0$, tak odtiaľ vyplýva, že $\rho_0^r \leq \rho_0$. Ich rozdiel budeme považovať za vplyv regulácie na efektívnosť. Výsledky modelu A s reguláciou emisií na jednotku vstupu pre rôzne hodnoty regulačného parametra α_1 môžeme vidieť v tabuľke 4.

Tabuľka 4

Výsledky modelu A s reguláciou emisií na jednotku vstupu

Intenzita regulácie	Priemerná efektívnosť	Vplyv regulácie
bez regulácie	0,9004	0,00 %
$\alpha_1 = 0,3$	0,8999	0,00 %
$\alpha_1 = 0,25$	0,8895	1,09 %
$\alpha_1 = 0,2$	0,8458	5,46 %
$\alpha_1 = 0,15$	0,8008	9,96 %
$\alpha_1 = 0,1$	0,7558	14,47 %

Zdroj: vlastné spracovanie

Vidíme, že bez uplatnenia regulácie je priemerná efektívnosť podľa modelu A 90.04 %. Pri stanovení regulačnej podmienky pre množstvo emisií na jednotku vstupu s parametrom $\alpha_1 = 0.3$ klesla priemerná efektívnosť na hodnotu 89.99 %. To znamená, že priemerná efektívnosť klesla o 0.05 %, čo predstavuje vplyv environmentálnej regulácie. Ak reguláciu sprísňime znížením parametra α_1 na hodnotu 0.25, tak priemerná efektívnosť klesne na 88.95 %, čo znamená, že vplyv regulácie vzrastie na 1.09 %. Pri ďalšom znižovaní regulačného parametra postupne rastie vplyv regulácie, pričom pre hodnotu $\alpha_1 = 0.1$ dosahuje až 14.46 %.

Model A a regulácia emisií na jednotku výstupu

Ak chceme uplatniť formu regulácie emisií na jednotku výstupu, postup je veľmi podobný tomu predchádzajúcemu. V prvom kroku znova vyriešime úlohu (5) a vypočítame projekcie pôvodných premenných na hranicu produkčných možností. V tomto prípade, keďže máme dva žiaduce výstupy (cement a slinok), potrebujeme určiť jeden referenčný výstup, ku ktorému sa bude regulácia vzťahovať. Rozhodli sme sa, že týmto výstupom bude cement. Následne kontrolujeme, či je splnená regulačná podmienka v tvare:

$$\frac{y_{r0}^{b*}}{y_0^{g*}} \leq \alpha_{2r} \quad \forall r = 1 \dots s_2 \quad (8)$$

V tomto prípade regulátor stanovuje horné ohraničenie na podiel emisií na jednotku produkcie, čo sme označili ako α_2 . Znova platí, že ak regulačná podmienka je splnená, tak regulácia nemá vplyv na vypočítanú efektívnosť danej cementárne. V opačnom prípade vypočítame veľkosť regulačnej doplnkovej premennej zo vzťahu

$$s_0^r = y_0^{b*} - \alpha_2 y_0^{g*}$$

a znova o túto hodnotu upravíme výpočet efektívnosti danej DMU. Výsledky tohto postupu s rôznymi hodnotami regulačného parametra α_2 môžeme vidieť v tabuľke 5.

Tabuľka 5

Výsledky modelu A s reguláciou emisií na jednotku výstupu

Intenzita regulácie	Priemerná efektívnosť	Vplyv regulácie
bez regulácie	0,9004	0,00 %
$\alpha_2 = 0,6$	0,8833	1,71 %
$\alpha_2 = 0,5$	0,8529	4,75 %
$\alpha_2 = 0,4$	0,8170	8,34 %
$\alpha_2 = 0,3$	0,7798	12,06 %
$\alpha_2 = 0,2$	0,7418	15,87 %

Zdroj: vlastné spracovanie

Priemerná efektívnosť všetkých cementární (odvetvia) bez uplatnenia regulácie je znova 0.9004, teda 90.04 %, pretože v prvom kroku tohto postupu riešime presne tú istú úlohu ako v predchádzajúcom prípade. Tentokrát sme postupne menili hodnoty parametra α_2 a sledovali, ako sa menia hodnoty efektívnosti. Treba pripomenúť, že nemá význam voliť veľkosť tohto parametra úplne ľubovoľne. Pre príliš veľké hodnoty by takéto regulačné obmedzenie nemalo zmysel, pretože by ho bez problémov splnili všetky DMU. Nešlo by teda o aktívne ohraničenie. Voľbou príliš nízkej hodnoty parametra α_2 by sme zas spôsobili to, že žiadna DMU by takéto ohraničenie nespĺnila.

V tomto modeli sa ukázalo ako zmysluplné vyberať hodnoty regulačného koeficientu z intervalu [0.2, 0.6].

V tabuľke 5 vidíme, že pre hodnotu parametra $\alpha_2 = 0.6$ klesla priemerná efektívnosť z 90.04 % na 88.33 %. To znamená, že po zohľadnení regulačného ohraničenia klesla priemerná efektívnosť o 1.71 %. Ďalej vidíme, že keď sme postupne znižovali hodnotu α_2 , priemerná efektívnosť taktiež klesala. Pre $\alpha_2 = 0.5$ to bolo 85.29 % (pokles o 4.75 %), pre $\alpha_2 = 0.4$ už iba 81.7 %, čo predstavovalo vplyv regulácie vo výške 8.34 %, pre $\alpha_2 = 0.3$ vzrástol vplyv regulácie na 12.06 % a pre $\alpha_2 = 0.2$ až na 15.86 %, čo zodpovedá priemernej efektívnosti 74.18 %.

3.2.2 Model B

V tejto verzii modelu uvažujeme s emisiami ako so vstupmi. Intuitívne je táto myšlienka v poriadku, pretože očakávame, že s rastúcim množstvom vstupov ako aj rastúcim množstvom emisií sa pri ostatných podmienkach nezmenených stáva firma menej efektívnou. Na základe toho, čo sme uviedli v predchádzajúcich častiach, vyzerá takýto model nasledovne:

$$\begin{aligned} \min_{\lambda, s^-, s^b} \quad & \rho = 1 - \frac{1}{m + s_2} \left(\sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}} \right) \\ \text{s. t.} \quad & x_0 = X\lambda + s^- \\ & y_0^b = Y^b \lambda + s^b \\ & y_0^g \leq Y^g \lambda \\ & s^- \geq 0, s^b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

kde s_2 je počet nežiaducich výstupov (v našom prípade 1), s^b sú doplnkové premenné (*slacks*) týchto nežiaducich výstupov, s^- sú doplnkové premenné vstupov, y^b je vektor nežiaducich výstupov (*bads*), y^g je vektor žiaducich výstupov (*goods*), x je vektor vstupov a Y^b , Y^g a X sú matice napozorovaných hodnôt nežiaducich a žiaducich výstupov a vstupov.

Rovnako ako v prípade modelu A aj model B rozšírime o regulačné obmedzenia a budeme sledovať vývoj priemernej efektívnosti v závislosti od meniacej sa hodnoty regulačných parametrov.

Model B a regulácia emisií na jednotku vstupu

Postup zohľadnenia regulačného ohraničenia je podobný ako v predchádzajúcich prípadoch. V prvom kroku vypočítame koeficient efektívnosti pomocou úlohy (9). Pomocou doplnkových premenných, ktoré sú súčasťou jej riešenia, dopočítame projekcie premenných na hranicu produkčných možností. V tejto verzii regulácie potrebujeme projekcie vstupov a nežiaducich výstupov:

$$\begin{aligned} x_0^* &= x_0 - s^- \\ y_0^{b*} &= y_0^b - s^b \end{aligned}$$

Overíme, či tieto hodnoty spĺňajú regulačné ohraničenie:

$$\frac{y_{r0}^{b*}}{ref\ x_0^*} \leq \alpha_{1r} \quad \forall r = 1 \dots s_2$$

Ak je ohraničenie splnené, tak environmentálna regulácia nemá vplyv na efektívnosť. V opačnom prípade dodefinujeme regulačnú doplnkovú premennú $s_0^r = y_0^{b*} - \alpha_1 x_0^*$ a zohľadníme ju pri výpočte efektívnosti pod vplyvom regulácie nasledovným spôsobom:

$$\rho^r = 1 - \frac{1}{m + s_2} \left(\sum_{i=1}^m \frac{s_i^- + s^r / 2}{x_{i0}} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b + s^r / 2}{y_{r0}^b} \right) \quad (10)$$

Veľkosť regulačného parametra α_1 sme postupne menili v rámci intervalu [0,1, 0,25] a výsledky môžeme vidieť v tabuľke 6. Priemerná efektívnosť sledovaného odvetvia je podľa modelu B bez uplatnenia regulácie 91,19 %. Pre regulačný parameter $\alpha_1 = 0,25$ sa táto priemerná efektívnosť nezmenila. To znamená, že takéto ohraničenie nemalo praktický význam, pretože ho aj bez regulácie všetky jednotky splnili. Pri ďalšom znižovaní α_1 sa už efektívnosť mení. Pre hodnotu $\alpha_1 = 0,2$ sa priemerná efektívnosť znížila na 89,32 %, čo predstavuje vplyv regulácie vo výške 1,87 %. Ďalším znižovaním parametra α_1 na úroveň 0,15 a 0,1 sme postupne dosiahli priemernú efektívnosť vo výške 87,07 % a 84,82 %, čo predstavovalo vplyv regulácie na úrovni 4,12 % a 6,37 %.

Tabuľka 6

Výsledky modelu B s reguláciou emisií na jednotku vstupu

Intenzita regulácie	Priemerná efektívnosť	Vplyv regulácie
bez regulácie	0,9119	0,00 %
$\alpha_1 = 0,25$	0,9119	0,00 %
$\alpha_1 = 0,2$	0,8932	1,87 %
$\alpha_1 = 0,15$	0,8707	4,12 %
$\alpha_1 = 0,1$	0,8482	6,37 %

Zdroj: vlastné spracovanie

Model B a regulácia emisií na jednotku výstupu

Regulačné ohraničenie v tomto prípade predstavuje nerovnosť

$$\frac{y_{r0}^{b*}}{ref\ y_0^{g*}} \leq \alpha_{2r} \quad \forall r = 1 \dots s_2 \quad (11)$$

Platí, že pokiaľ toto ohraničenie je splnené, tak nedochádza k zmene efektívnosti v porovnaní s prípadom bez regulácie. V opačnom prípade definujeme regulačnú doplnkovú premennú pre konkrétnu DMU ako $s_0^r = y_0^{b*} - \alpha_2 y_0^{g*}$ a o túto premennú upravíme výpočet efektívnosti, čím dostaneme ρ^r .

Výsledky úlohy modelu B bez regulácie, ako aj s rôznymi hodnotami regulačného parametra α_2 , môžeme vidieť v tabuľke 7. Priemerná efektívnosť bez uplatnenia akejkoľvek regulácie je rovnaká ako v predchádzajúcom modeli, pretože sa od seba líšia iba regulačnou podmienkou. Dosahuje teda hodnotu 91.19 %. Pre hodnotu parametra $\alpha_2 = 0.6$ dochádza k zníženiu priemernej efektívnosti na 90.54 %. Vplyv regulácie je teda len 0.64 %. Po zmene parametra α_2 na 0.5 došlo k zníženiu priemernej efektívnosti na 87.18 %, čo predstavovalo vplyv regulácie vo výške 4.01 %. K výraznejšiemu zníženiu priemernej efektívnosti došlo po znížení α_2 na úroveň 0.4. Pre túto hodnotu regulačného parametra dosiahla priemerná efektívnosť úroveň 82.55 %, čo predstavuje vplyv regulácie vo výške 8.64 %. Po ďalšom znížení α_2 na hodnotu 0.3 a 0.2 klesla postupne priemerná efektívnosť na 77.65 % a 72.66 %. Vplyv regulácie bol teda v týchto prípadoch 13.54 % a 18.53 %.

Tabuľka 7

Výsledky modelu B s reguláciou emisií na jednotku výstupu

Intenzita regulácie	Priemerná efektívnosť	Vplyv regulácie
bez regulácie	0,9119	0,00 %
$\alpha_2 = 0,6$	0,9054	0,64 %
$\alpha_2 = 0,5$	0,8718	4,01 %
$\alpha_2 = 0,4$	0,8255	8,64 %
$\alpha_2 = 0,3$	0,7765	13,54 %
$\alpha_2 = 0,2$	0,7266	18,53 %

Zdroj: vlastné spracovanie

3.2.3 Model C

V tejto verzii modelu sú emisie do modelu zahrnuté ako vstupy a vstupy sú považované za negatívny výstup. To znamená, že tento model môžeme zapísať nasledovne:

$$\begin{aligned}
\min_{\lambda, s^b} \quad & \rho = 1 - \frac{1}{s_2} \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \\
s. t. \quad & x_0 \geq X\lambda \\
& y_0^b = Y^b \lambda + s^b \\
& y_0^g \leq Y^g \lambda \\
& s^b \geq 0, \lambda \geq 0
\end{aligned} \tag{12}$$

Tento model, ako vyplýva z účelovej funkcie, hľadá pre každú cementáreň jej nevyužitú možnosť v znižovaní produkcie emisií. Význam jednotlivých premenných ostáva rovnaký ako v predchádzajúcich alternatívach.

Model C a regulácia emisií na jednotku vstupu

Postup pri výpočte efektívnosti pod vplyvom regulácie je v tomto prípade analogický ako v predchádzajúcich modeloch. Po vyriešení úlohy (12) a dopočítaní príslušných projekcií, skontrolujeme splnenie regulačnej podmienky

$$\frac{y_{r0}^{b*}}{x_0^*} \leq \alpha_{1r} \quad \forall r = 1 \dots s_2$$

Ako už je iste z predchádzajúcich modelov zrejmé, v prípade nesplnenia tohto ohraničenia dopočítame regulačnú doplnkovú premennú a o jej hodnotu upravíme výpočet koeficientu efektívnosti ρ^r . Výsledky modelu C s reguláciou emisií na jednotku vstupu uvádzame v tabuľke 8.

Tabuľka 8

Výsledky modelu C s reguláciou emisií na jednotku vstupu

Intenzita regulácie	Priemerná efektívnosť	Vplyv regulácie
bez regulácie	0,9231	0,00 %
$\alpha_1 = 0,25$	0,9231	0,00 %
$\alpha_1 = 0,2$	0,8252	9,79 %
$\alpha_1 = 0,15$	0,6396	28,35 %
$\alpha_1 = 0,1$	0,4313	49,18 %

Zdroj: vlastné spracovanie

Regulačný parameter na úrovni 0.25 nemá žiaden význam, lebo toto ohraničenie spĺňajú všetky cementárne. Prejavilo sa to tým, že priemerná efektívnosť bez regulácie ako aj s reguláciou s touto výškou α_1 je 92.31 %. Pri znížení α_1 na hodnotu 0.2 už dochádza k zníženiu priemernej efektívnosti na 82.52 %, čo predstavuje vplyv regulácie na úrovni 9.79 %. Pre hodnoty α_1 na úrovni 0.15, resp. 0.1 priemerná

efektívnosť výrazne klesá, a to na hodnoty 63.96 %, resp. 43.13 %. Tieto hodnoty zodpovedajú vplyvu regulácie vo výške 28.35 % a 49.18 %.

Model C a regulácia emisií na jednotku výstupu

Výsledky tejto verzie modelu C uvádzame v tabuľke 9. Priemerná efektívnosť celého odvetvia bez zohľadnenia regulácie je 92.31 %. Pri zohľadnení environmentálnej regulácie s hodnotou parametra $\alpha_2 = 0.6$ klesá priemerná efektívnosť všetkých cementární na 90.24 %, čo zodpovedá vplyvu regulácie vo výške 2.07 %. Postupne s poklesom parametra α_2 , čo robí reguláciu prísnejšou, klesá priemerná efektívnosť a rastie vplyv samotnej regulácie. Pre hodnotu α_2 o veľkosti 0.5 je vplyv regulácie už 12.93 % (priemerná efektívnosť je 79.38 %), pre $\alpha_2 = 0.4$ dosahuje priemerná efektívnosť už iba 64.38 % (vplyv regulácie sa rovná 27.93 %). Hodnote parametra $\alpha_2 = 0.3$ zodpovedá priemerná efektívnosť 48.53 % a pre α_2 na úrovni 0.2 je priemerná efektívnosť už iba 32.35 %. Vplyv regulácie na efektívnosť je v týchto prípadoch až 43.79 %, resp. 59.96 %.

Tabuľka 9

Výsledky modelu C s reguláciou emisií na jednotku výstupu

Intenzita regulácie	Priemerná efektívnosť	Vplyv regulácie
bez regulácie	0,9231	0,00 %
$\alpha_2 = 0,6$	0,9024	2,07 %
$\alpha_2 = 0,5$	0,7938	12,93 %
$\alpha_2 = 0,4$	0,6438	27,93 %
$\alpha_2 = 0,3$	0,4853	43,79 %
$\alpha_2 = 0,2$	0,3235	59,96 %

Zdroj: vlastné spracovanie

Závery

Základný rozdiel medzi týmito tromi modelmi spočíva v ich účelových funkciách, z čoho následne vyplýva aj ich rozdielna ekonomická interpretácia. Z účelovej funkcie modelu A vyplýva, že tento model hľadá pre každú DMU jej nevyužité možnosti v znižovaní vstupov v porovnaní s najlepšimi cementárňami. Ak napríklad efektívnosť nejakej cementárne podľa modelu A bola 0,8, znamená to, že táto cementáreň potrebuje znížiť množstvo vstupov o 20 %, aby sa stala plne efektívnou. Inými slovami, medzi sledovanými cementárňami boli aj také, ktoré dosiahli podobné výsledky, ale spotrebovali o 20 % menej vstupov.

Model C, na druhej strane, hľadá pre každú DMU jej nevyužité možnosti v znižovaní množstva emisií v porovnaní s najlepšimi cementárňami. Odhaľuje tak veľkosť rezerv, ktoré má daná cementáreň pri množstve produkovaných emisií. Model B je kombináciou modelov A a C. Zameriava sa na kombináciu rezerv, ktoré má daná cementáreň pri množstve vstupov spolu s produkciou emisií. V nasledujúcej tabuľke uvádzame porovnanie priemerných výsledkov pre všetky tri modely s reguláciou emisií na jednotku vstupu.

Tabuľka 10

Porovnanie priemerných výsledkov modelov s reguláciou emisií na jednotku vstupu

	bez regulácie	$\alpha_1 = 0,25$	$\alpha_1 = 0,2$	$\alpha_1 = 0,15$	$\alpha_1 = 0,1$
Model A	0,9004	0,8895	0,8458	0,8008	0,7558
Model B	0,9119	0,9119	0,8932	0,8707	0,8482
Model C	0,9231	0,9231	0,8252	0,6396	0,4313

Zdroj: vlastné spracovanie

Zaujímavé je hlavne porovnanie modelov A a C, pretože model B je iba ich kombináciou. Môžeme si všimnúť, že priemerná efektívnosť podľa modelu C je veľmi citlivá na zmenu regulačného parametra. Tento záver je pomerne intuitívny, pretože model C počíta efektívnosť práve na základe nevyužitých možností v znižovaní množstva produkovaných emisií. Po odstránení tejto neefektívnosti už ostáva len malý priestor na ďalšie znižovanie emisií prostredníctvom regulácie, čo sa následne prejaví veľkým vplyvom tejto regulácie na samotnú efektívnosť jednotlivých cementární. Keďže model A hľadá nevyužité možnosti v znižovaní vstupov, tak po odstránení tohto druhu neefektívnosti, ostáva ešte pomerne veľký priestor na znižovanie emisnej náročnosti pomocou regulácie. To sa v tabuľke 10 prejavilo nižšou senzitivitou efektívnosti na zmenu regulačného parametra.

Tabuľka 11**Porovnanie priemerných výsledkov modelov s reguláciou emisií na jednotku výstupu**

	bez regulácie	$\alpha_2 = 0,6$	$\alpha_2 = 0,5$	$\alpha_2 = 0,4$	$\alpha_2 = 0,3$	$\alpha_2 = 0,2$
Model A	0,9004	0,8833	0,8529	0,8170	0,7798	0,7418
Model B	0,9119	0,9054	0,8718	0,8255	0,7765	0,7266
Model C	0,9231	0,9024	0,7938	0,6438	0,4853	0,3235

Zdroj: vlastné spracovanie

Rovnaké porovnanie sme spravili pre všetky tri modely aj v prípade regulácie emisií na jednotku výstupu. Výsledky tohto porovnania môžeme vidieť v tabuľke 11. Aj v tomto prípade je na prvý pohľad zaujímavá hlavne vysoká citlivosť výsledkov modelu C na nastavenie regulačného parametra α_2 . Vysvetlenie tohto javu je podobné ako v predchádzajúcom prípade. Model C svojou konštrukciou zohľadňuje prísnejšie produkciu emisií pri hodnotení efektívnosti ako ostatné dva modely. Z tohto dôvodu je potom už len malý priestor na ďalšie znižovanie emisií pomocou regulácie, čo sa logicky prejaví výrazným vplyvom na efektívnosť jednotlivých cementární.

Použitá literatúra

1. COOPER, W. W. - SEIFORD, M. L. - TONE, K. 2007. Data Envelopment Analysis. New York: Springer, 2007. ISBN 978-0-387-45283-8.
2. CREW, M. - PARKER, D. 2006. International Handbook on Economic Regulation. Massachusetts: Edward Elgar Publishing, 2006. ISBN 978-1-843-76671-1.
3. FRANK, M. W. 2001. The Impact of Rate-Of-Return Regulation on Technological Innovation. Hampshire: Ashgate Publishing, 2001. ISBN 978-0-754-61609-2.
4. LISÝ, J. 2005. Výkonnosť ekonomiky a ekonomický rast. Bratislava: Iura Edition, 2005. ISBN 80-80 780-35-8.
5. LUPTÁČIK, M. 2010. Mathematical Optimization and Economic Analysis. New York: Springer, 2010. ISBN 978-0-387-89551-2.
6. VISCUSI, W. K. - HARRINGTON, J. E. - VERNON, J. M. 2005. Economics of Regulation and Antitrust. Cambridge: The MIT Press, 2005. ISBN 978-0-262-22075-0.
7. BARBERA, A. J. - McCONNELL, V. D. 1990. The impact of environmental regulations on industry productivity: Direct and indirect effects. In Journal of Environmental Economics and Management. 1990, č. 18.
8. FARREL, M. J. 1957. The Measurement of Productive Efficiency. In Journal of the Royal Statistical Society. 1957.
9. FÄRE, R. et al. 1989. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. In The Review of Economics and Statistics. 1989.
10. FÄRE, R. - GROSSKOPF, S. - TYTECA, D. 1996. An activity analysis model of the environmental performance of firms – application to fossil–fuel–fired electric utilities. In Ecological Economics. 1996.
11. HARRISON, D. - RADOV, B. D. 2002. Evaluation of alternative initial allocation mechanisms in a European Union greenhouse gas emissions allowance trading scheme. In National Economic Research Associates. 2002.
12. KORHONEN, P. - LUPTÁČIK, M. 2004. Eco–efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis. In European Journal of Operational Research. 2004.
13. Európska Environmentálna Agentúra <http://www.eea.europa.eu/>
14. Stratégia EURÓPA 2020, Dostupné na internete: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:SK:PDF>
15. The European Cement Association <http://www.cembureau.be/>

Príloha

Tabuľka A

Cementáreň	Emisie (tis. ton)	Spotreba tepla (MMBtu)	Produkcia slinku (tis. ton)	Produkcia cementu (tis. ton)
Saint-Pierre-la-Cour	755	3 027	1 014	1 230
Heming	549	2 109	706	844
Couvrot	541	2 354	736	1 074
Montalieu	518	2 239	685	870
Airvault	516	2 343	687	1 074
Le Teil	462	1 844	617	745
La Malle	441	1 999	586	662
Martres	407	1 965	494	599
Origny	399	1 843	528	623
Cormeilles	389	1 720	431	541
Lexos	375	1 466	491	583
Beucaire	354	1 465	490	614
Lumbres	349	2 107	377	468
La Couronne	345	1 283	430	523
Grave-de-Peille	344	1 460	456	580
Bussac	331	1 373	460	307
Havre-Saint-Vigor	290	1 086	364	430
Port-la-Nouvelle	256	955	320	388
Rochefort	255	979	328	375
Xeuilley	251	1 088	319	405
Beffes	249	1 130	331	479
Altkirch	248	954	319	375
Contes	242	1 173	294	340
Saint-Egreve	235	940	315	400
Gargenville	221	915	307	614
Dannes	210	953	239	330
Val-d'Azergues	201	901	264	334
Créchy	196	728	244	310
Frangey	190	800	235	272
Villiers-au-Bonin	177	732	245	276
Ranville	170	774	227	338
Pont-à-Vendin	101	594	106	135
Chambéry	92	376	126	160
Cruas	80	330	110	135
La Pérelle	52	236	59	75

Zdroj: Harrison a Radov (2002)