



AgEcon SEARCH

RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.

Tomasz Żyłowski, Aleksandra Król, Jerzy Kozyra

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy

OCENA MOŻLIWOŚCI OGRANICZENIA ŚLADU WĘGLOWEGO W UPRAWIE KUKURYDZY NA ZIARNO¹

EVALUATION OF CAPABILITY OF CARBON FOOTPRINT REDUCTION FROM GRAIN MAIZE CULTIVATION

Słowa kluczowe: ślad węglowy, DEA, efektywność środowiskowa, kukurydza na ziarno

Key words: carbon footprint, DEA, eco-efficiency, grain maize

JEL codes: Q51, Q54

Abstrakt. Celem pracy jest ocena możliwości ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (GC) w uprawie kukurydzy na ziarno przy użyciu metodyki łączącej szacowanie śladu węglowego (CF) z metodą DEA. Do analiz wykorzystano dane ankietowe pochodzące z 32 gospodarstw w Polsce. Przedstawiono ocenę ilościową emisji gazów cieplarnianych z podziałem na główne źródła emisji w tych gospodarstwach, według metodyki oceny śladu węglowego zaproponowanej przez IPCC. Następnie określono możliwości ograniczenia poziomu emisji GC według założeń metody DEA. Potencjał ograniczenia emisji dla analizowanych gospodarstw określono w przedziale od 94 do 1047 kg CO₂-eq/ha (od 3,3 do 33,4%).

Wstęp

Ocieplanie systemu klimatycznego Ziemi nie budzi wątpliwości w świetle najnowszych badań i jest związane głównie ze wzrostem koncentracji gazów cieplarnianych (GC) w atmosferze [Stocker i in. 2013]. Rolnictwo w Polsce odpowiada za ok. 8,3% krajowej emisji GC, przy czym powoduje 78% emisji podtlenku azotu (N₂O), 30% emisji metanu (CH₄) oraz 0,25% emisji dwutlenku węgla (CO₂) [KOBiZE 2017]. W celu przeciwdziałania temu procesowi w 2014 roku uzgodniono cele polityki klimatycznej Unii Europejskiej (UE) do 2030 roku (tzw. pakiet klimatyczny), które określają ograniczenie emisji GC dla sektora non-ETS (nie objętego handlem uprawnieniami), w tym dla rolnictwa o 30%.

Proponowane w pracy podejście do oceny możliwości ograniczenia śladu węglowego w uprawie kukurydzy na ziarno łączy ocenę śladu węglowego i metodę DEA (CF+DEA) [Rebolledo-Leiva i in. 2017]. Ślad węglowy zdefiniowany jako bilans (emisji lub pochłaniania) GC w całym cyklu życia produktu i wyrażony w ekwiwalentach CO₂ (CO₂-eq), jest często stosowanym wskaźnikiem wpływu na środowisko [Pandey i in. 2011]. Natomiast DEA jest nieparametryczną metodą programowania liniowego, pozwalającą na ocenę względnej efektywności jednostek decyzyjnych – DMU (ang. *Decision Making Unit*) [Emrouznejad, Yang 2018]. Metoda ta umożliwia obliczenie efektywności technicznej (ET) badanych jednostek oraz wyznaczenie optymalnych technologii produkcji dla jednostek określonych w tej metodzie jako nieefektywne [Cooper i in. 2007]. Użycie metody CF+DEA pozwala na ocenę możliwości redukcji śladu węglowego przy użyciu do analiz danych rzeczywistych, a nie uśrednionych. Pozwala też na weryfikację hipotezy, że zmniejszenie nakładów prowadzi do zmniejszenia niekorzystnego wpływu na środowisko [Iribarren i in. 2010].

Metodę DEA wykorzystuje się do badania efektywności całego sektora rolniczego oraz porównywania jego efektywności pomiędzy poszczególnymi państwami UE [Akande 2012,

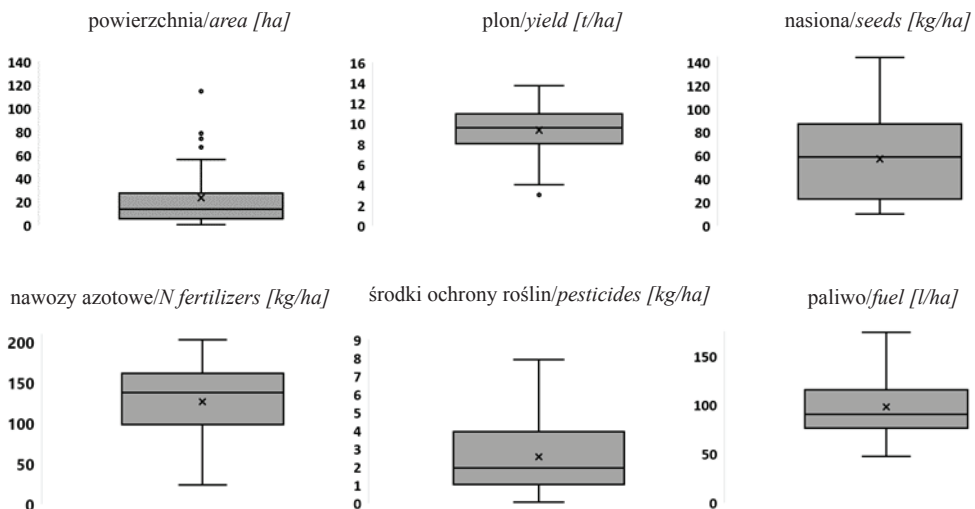
¹ Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.6 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Kanellopoulos i in. 2014, Kočišová 2015] i do wyznaczenia technicznej efektywności „nowych” państw UE [Bojniec i in. 2014]. DEA stosowano również do badania efektywności produkcji mleka [Madau i in. 2017], oliwy [Dios-Palomares, Martínez-Paz 2011], roślin energetycznych [Vlontzos i in. 2014] oraz wpływu rozdrobnienia i zróżnicowania gospodarstw na efektywność produkcji [Hengzhou i Tong 2013]. Metoda łącząca szacowanie śladu węglowego i DEA była już wcześniej używana do oceny możliwości ograniczenia emisji GC, m.in. w uprawie soi [Mohammadi i in. 2013], ryżu [Mohammadi i in. 2015], pszenicy [Syp i in. 2015, Nabavi-Pelesaraei i in. 2016] i winorośli [Vázquez-Rowe 2012].

W pracy podjęto próbę oceny śladu węglowego w uprawie kukurydzy na ziarno. Kukurydza jest obecnie jedną z podstawowych roślin uprawnych w Polsce o rosnącym znaczeniu gospodarczym, również z powodu obserwowanego ocieplenia klimatu [Ochal i in. 2015, Nieróbca i in. 2008]. Według szacunków GUS w 2016 roku uprawa kukurydzy na ziarno zajmowała 595 tys. ha (14,55% powierzchni zbóż), a zbiory osiągnęły poziom 4,3 mln t [GUS 2017].

Material i metodyka badań

Dane ankietowe wykorzystane do wyznaczenia śladu węglowego są podzbiorem bazy danych, obejmującej 250 gospodarstw z terenu z całej Polski, powstającej w ramach projektu LCAGri [www.lcagri.iung.pl], na potrzeby oceny śladu węglowego gospodarstw rolnych w Polsce. Wykorzystano dane z 32 gospodarstw uprawiających kukurydżę na ziarno w 2016 roku. Opracowana baza danych zawiera m.in. informacje o powierzchni poszczególnych upraw, plonie, ilości użytych środków produkcji na 1 ha (nawozy mineralne i naturalne, użyte środki ochrony roślin, paliwo, nasiona), klasie bonitacyjnej i pH gleby oraz strefie klimatycznej według klasyfikacji IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) [IPCC 2007]. Statystyki opisowe 32 analizowanych gospodarstw dotyczące powierzchni uprawy, uzyskiwanych plonów i wykorzystania środków produkcji przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Rozkład statystyczny najważniejszych danych ankietowych z 32 gospodarstw (przedstawiono 5, 25, 75, 95 percentyl wraz ze średnią i medianą)

Figure 1. Distribution of the main survey's data from the 32 farms (5, 25, 75 and 95 percentiles, together with the mean and the median)

Źródło: opracowanie własne

Source: own study

Ślad węglowy w uprawie kukurydzy na ziarno wyznaczono korzystając z metodyki ISO 14067 [ISO 2013]. Przyjęto potencjał globalnego ocieplenia w 100-letnim horyzoncie czasowym dla N_2O w stosunku do CO_2 równy 298 [IPCC 2007]. Zgodnie z metodyką IPCC zastosowaną do obliczania emisji polowych N_2O oraz CO_2 , jako podstawową jednostkę funkcjonalną dla emisji gazów cieplarnianych przyjęto $kg\ CO_2\text{-eq/ha/rok}$ [Eggleston i in. 2006]. Pozwala to na proste przeliczenie emisji GC na jednostkę plonu ($kg\ CO_2\text{-eq/kg}$ masy ziaren). Polowe emisje N_2O obliczono w podziale na bezpośrednie (N_2O) oraz pośrednie (związane z ulatnianiem się, wymywaniem i przesiąkaniem związków azotu). Emisje związane z wytworzeniem stosowanych środków produkcji obliczono używając wskaźników użytych w projekcie Biograce [Neeft 2011]. W opracowaniu nie uwzględniono zmian glebowej materii organicznej.

Użyto metody DEA (*Data Envelopment Analysis*) zorientowanej na nakłady z uwzględnieniem stałego oddziaływania skali produkcji – CCR (ang. *Constans Return to Scale*). Dla jednostki decyzyjnej o numerze i i zagadnienie optymalizacyjne może być sformułowane następująco [Bogetoft, Otto 2011]:

min θ pod warunkami:

$$-y_i + Y\lambda \geq 0$$

$$\theta x_i - X\lambda \geq 0$$

$$\theta \in R, \lambda \geq 0$$

gdzie: x_i – wektor nakładów (wejściowy) dla jednostki i , $i = 1 \dots N$, N – liczba jednostek decyzyjnych, y_i – wektor rezultatów (wyjściowy) dla jednostki i , λ – macierz współczynników kombinacji liniowych technologii optymalnej, X , Y – macierze wejścia i wyjścia.

Obliczeń technologii optymalnej dla jednostki i (x_i^*) można dokonać korzystając z równania: $x_i^* = \lambda_i X$, gdzie λ_i jest wektorem współczynników kombinacji liniowych dla jednostki o numerze i .

Jako danych wejściowych w metodzie DEA użyto ilości zastosowanych środków produkcji: nawozów azotowych (kg), paliwa (l), środków ochrony roślin (kg), nasion (kg). Dane wyjściowe to plon (kg) oraz emisje GC ($kg\ CO_2\text{-eq}$). Podobne zestawy zmiennych stosowano w pracach stosujących metodykę CF+DEA [Mohammadi i in. 2013, 2015, Syp i in. 2015, Nabavi-Pelesaraei i in. 2016, Vázquez-Rowe 2012].

Możliwości redukcji emisji GC w uprawie kukurydzy na ziarno zmierzono przy wykorzystaniu pięcioetapowej metody łączącej szacowanie śladu węglowego i model DEA [Vázquez-Rowe i in. 2010]. Poszczególne kroki to:

1. Analiza zbioru wejść i wyjść – LCI (ang. *Life Cycle Inventory*) dla każdego gospodarstwa. Obliczenie śladu węglowego CF (ang. *carbon footprint*) dla każdego gospodarstwa.
2. Ślad węglowy oszacowano dla głównych źródeł emisji: polowych emisji N_2O i CO_2 oraz emisji pochodzących z wcześniejszych procesów (ang. *background process*), związanych z wytworzeniem używanych środków produkcji.
3. Zorientowana na nakłady analiza DEA, pozwalająca na minimalizację nakładów przy zachowaniu wielkości rezultatów. Analiza ta pozwala wyznaczyć efektywność techniczną gospodarstw ($ET = 1$ dla efektywnych, oraz $ET < 1$ dla nieefektywnych) oraz wartości nakładów docelowych, będących ważoną kombinacją technologii obiektów efektywnych.
4. Ponowne obliczenie śladu węglowego dla gospodarstw nieefektywnych środowiskowo, z wyznaczonymi w kroku trzecim zmniejszonymi wartościami środków produkcji.
5. Interpretacja wyników. Porównanie pomiędzy obecnym a docelowym poziomem wpływu na środowisko. Ocena struktury optymalnych technologii produkcji dla obiektów nieefektywnych.

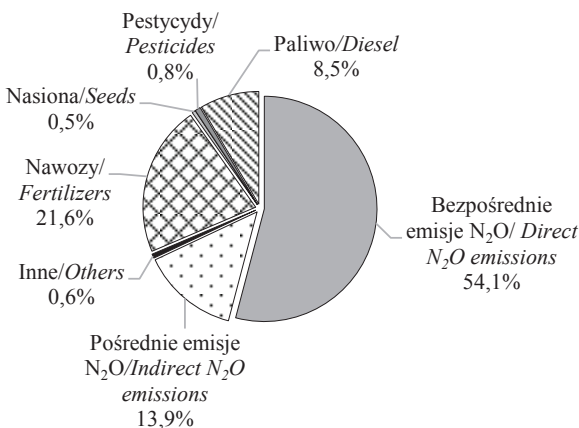
Do obliczeń efektywności technicznej za pomocą modelu DEA oraz analiz statystycznych użyto języka R [R Core Team 2014] oraz środowiska RStudio [RStudio Team 2015].

Wyniki badań i dyskusja

Emisje GC z uprawy kukurydzy w analizowanych gospodarstwach wahały się od 1178 do 4636 kg CO₂-eq/ha (średnio 3434 kg CO₂-eq/ha), w zależności od ilości zastosowanych środków produkcji. W przeliczeniu na plon odpowiada to emisjom na średnim poziomie 0,37 kg CO₂-eq/kg ziarna (od 0,23 do 0,78 kg CO₂-eq/kg ziarna). Uzyskane wyniki były zbliżone do przedstawianych w literaturze przedmiotu. Na przykład Dan Zhang i współautorzy [2017] szacowali emisje GC w uprawie kukurydzy na średnim poziomie 4052 kg CO₂-eq/ha (0,48 kg CO₂-eq/kg ziarna). Badania Bao-Luo Ma i współautorów [2012] wykazały ścisłą zależność między ilością stosowanych nawozów azotowych a emisją GC, która waha się w zależności od ilości zastosowanych nawozów od 370 (bez nawożenia) do 4569 kg CO₂-eq (250 kg N) w monokulturze. Podobne wyniki otrzymano też w warunkach polskich, w pracy badającej wpływ na środowisko dwóch gospodarstw z terenu Wielkopolski – 3041 kg CO₂-eq/ha (0,314 kg CO₂-eq/kg ziarna) [Holka i in. 2017].

Największy udział w emisjach GC związany był z użyciem nawozów azotowych (połowe emisje N₂O: bezpośrednio – 54,1% i pośrednio – 13,9%) i emisją powstałą na poziomie produkcji nawozów azotowych (21,6%). Emisje związane z wytworzeniem i użyciem pozostałych rozważanych środków produkcji stanowiły razem ok 10% stwierdzonych emisji (rys. 2).

Analiza efektywności technicznej przeprowadzona za pomocą metody DEA wykazała, że wśród 32 analizowanych gospodarstw tylko 8 było efektywnych (25%) w sensie metody DEA (ET=1). Średnia wartość efektywności dla gospodarstw określonych jako nieefektywne wynosiła 0,81. Dla ilustracji rozważmy przykład gospodarstwa o numerze 1. Jego efektywność techniczna jest równa 0,87. Gospodarstwami referencyjnymi (ang. *peer set*) dla tego gospodarstwa są gospodarstwa o numerach: 10, 12, 17. Optymalną dla niego technologię produkcji można opisać wzorem: $x_1^* = \lambda_{10}x_{10} + \lambda_{12}x_{12} + \lambda_{17}x_{17}$, gdzie x_{10} , x_{12} , x_{17} są wektorami danych wejściowych dla gospodarstw o odpowiednich numerach a współczynniki je poprzedzające, wagami uzyskanymi jako rezultat zastosowania modelu DEA (dla tego przypadku: $\lambda_{10} = 0,13$, $\lambda_{12} = 0,17$, $\lambda_{17} = 0,66$). Technologia docelowa (optymalna) wyznaczona przez model DEA gwarantuje osiągnięcie wskaźnika ET = 1 dla rozważanego gospodarstwa. Metoda nie daje jednak wskazówek, jak można osiągnąć taką strukturę. Po przeliczeniu na nakłady, oznacza to zmniejszenie stosowanych środków produkcji odpowiednio o 12,7% (nasiona, paliwo, nawozy azotowe) i 60% (środki ochrony roślin). Wyniki obliczeń dla wszystkich gospodarstw nieefektywnych przedstawiono w tabeli 1. Należy wskazać na trudności związane z praktycznym zastosowaniem uzyskanych rezultatów. Nie zawsze możliwa jest redukcja środków produkcji o obliczone wartości procentowe. Na przykład z obliczeń wynika konieczność ograniczenia wysiewu nasion o 78,3% dla gospodarstwa o numerze 25. Do interpretacji wyników otrzymanych przez zastosowanie metody DEA należy więc podchodzić z ostrożnością.



Rysunek 2. Udział procentowy głównych źródeł emisji gazów cieplarnianych w produkcji kukurydzy na ziarno.

Figure 2. Percentage contribution of main GHG emission sources in the production of grain maize

Źródło: opracowanie własne
Source: own study

W 4. kroku stosowanej metodyki CF+DEA zredukowane wartości nakładów użyto do ponownego obliczenia śladu węglowego gospodarstw nieefektywnych. Szczegółowe zestawienie potencjalnych możliwości redukcji emisji GC przedstawiono w tabeli 1. Uzyskane wyniki wskazują na możliwości redukcji emisji gazów cieplarnianych w zakresie od 3,3 do 33,4% (mediana równa 11,3%), co przekłada się na redukcję emisji gazów cieplarnianych wahającą się od 94 do 1047 kg CO₂-eq/ha (średnio 447 kg CO₂-eq/ha). W przeliczeniu na plon pozwala to na zmniejszenie emisji w przedziale od 0,01 do 0,26 kg CO₂-eq/kg. Wyniki uzyskane przez Alinę Syp i współautorów [2015] wskazują na możliwości ograniczenia emisji GC w uprawie pszenicy ozimej w zakresie od 7 do 18%, w zależności od wielkości gospodarstwa. Ali Mohammadi i współautorzy [2013] wskazali na możliwości ograniczenia śladu węglowego w uprawie soi o 11%. Przeprowadzone analizy potwierdzają także istnienie różnic istotnych statystycznie (*p-value* = 0,0093, test t-Studenta z poprawką Welcha) między obecnym a docelowym (po zastosowaniu optymalnej technologii) śladem węglowym.

Tabela 1. Efektywność techniczna, procentowe zmniejszenie środków produkcji dla technologii optymalnej wraz z porównaniem obecnego i docelowego śladu węglowego dla gospodarstw nieefektywnych
 Table 1. Technical efficiency, percentage input reduction for optimal technology and comparison of current and target carbon footprint for inefficient farms

Numer gospodarstwa/ <i>Farm number</i>	ET/ <i>Technical efficiency</i>	Nasiona/ <i>Seeds [%]</i>	Środki ochrony roślin/ <i>Pesticides [%]</i>	Paliwo/ <i>Diesel [%]</i>	Nawozy azotowe/ <i>Nitrogen fertilizers [%]</i>	Ślad węglowy obecny/ <i>Current CF [kg CO₂-eq/ha]</i>	Ślad węglowy docelowy/ <i>Target CF [kg CO₂-eq/ha]</i>	Redukcja emisji/ <i>Emission reduction [%]</i>
1	0,87	12,7	60,0	12,7	12,7	3543,4	3286,1	7,3
2	0,78	21,7	35,5	21,7	21,7	2587,8	2269,5	12,3
4	0,92	74,2	78,7	8,0	17,1	4636,2	4178,7	9,9
5	0,84	75,0	52,7	16,3	16,3	4174,4	3784,7	9,3
6	0,94	61,1	6,3	6,3	6,3	2895,4	2801,0	3,3
7	0,90	10,4	10,4	10,4	10,4	3522,6	3341,7	5,1
9	0,85	14,6	14,6	14,6	14,6	2443,1	2279,6	6,7
11	0,99	54,1	0,2	0,2	21,0	4166,3	3706,7	11,0
13	0,77	71,0	59,9	22,8	22,8	3743,4	3240,3	13,4
14	0,93	6,7	6,7	41,8	6,7	3983,1	3739,1	6,1
15	0,71	29,2	29,2	29,2	29,2	4372,8	3571,9	18,3
18	0,80	72,2	20,0	20,0	20,0	3392,8	3012,1	11,2
19	0,78	60,1	21,9	21,9	21,9	3685,0	3232,0	12,3
20	0,84	16,0	16,0	42,6	16,0	3399,0	3012,0	11,4
21	0,58	42,3	42,3	42,3	42,3	3136,5	2089,1	33,4
22	0,71	29,5	29,5	29,5	29,5	2708,5	2251,5	16,9
23	0,71	29,4	29,4	37,3	29,4	3748,4	3037,5	19,0
25	0,65	78,3	77,0	35,4	35,4	3858,1	2859,6	25,9
27	0,85	46,0	74,7	14,7	14,7	3916,8	3585,9	8,4
28	0,81	18,6	46,9	18,6	18,6	3439,1	3077,5	10,5
29	0,77	23,5	23,5	24,4	23,5	3340,1	2883,4	13,7
30	0,77	66,6	22,6	22,6	22,6	2763,3	2409,7	12,8
31	0,79	71,8	73,3	21,4	21,4	4227,8	3671,2	13,2
32	0,81	75,9	32,5	18,7	18,7	3605,6	3251,2	9,8

Źródło: opracowanie własne
 Source: own study

Podsumowanie i wnioski

W pracy oceniono możliwości redukcji śladu węglowego gospodarstw prowadzących uprawę kukurydzy na ziarno. Wykazano, że głównym źródłem emisji GC w produkcji kukurydzy na ziarno są bezpośrednie i pośrednie emisje podtlenku azotu (68%) oraz produkcja nawozów azotowych (21,6%). Uzyskane wyniki wskazują na możliwości redukcji emisji gazów cieplarnianych w zakresie od 94 do 1047 kg CO₂-eq/ha (0,01 do 0,26 kg CO₂-eq/kg ziarna), co oznacza ograniczenie śladu węglowego w przedziale od 3,3 do 33,4 %, w zależności od gospodarstwa. Wyznaczony potencjał śladu węglowego w uprawie kukurydzy na ziarno należy wiązać głównie z gospodarowaniem nawozami azotowymi.

Literatura/Bibliografia

- Bogetoft Peter, Lars Otto. 2011. *Benchmarking with DEA, SFA, and R*. New York: Springer.
- Cooper William W., Lawrence M. Seiford, Kaoru Tone. 2007. *Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software*. New York: Springer.
- Eggleston Simon H., Leonardo Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara, Kyoto Tanabe. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. [In] *Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- Emrouznejad Ali, Guo-Ilang Yang. 2018. A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978-2016. *Socio-Economic Planning Sciences* 61: 4-8, doi: 10.1016/j.seps.2017.01.008.
- Faber Antoni, Robert Borek, Magdalena Borzęcka-Walker, Zuzanna Jarosz, Jerzy Kozyra, Rafał Pudelko, Andrzej Zaliwski. 2012. Bilans węgla i emisji gazów cieplarnianych (CO₂, CH₄ oraz N₂O) w polskim rolnictwie. [W] *Z badań nad rolnictwem społecznie zrównoważonym* (Balance of carbon and greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄ and N₂O) in Polish agriculture [In] *From research on socially sustainable agriculture*), ed. S. Zegar, 9-37. Warszawa: IERiGŻ-PIB.
- GUS. 2017. *Wyniki produkcji roślinnej w 2016 r.* (Plant production results in 2016). Warszawa: GUS.
- Holka Małgorzata, Jerzy Franciszek Bieńkowski, Janusz Jankowiak, Radosław Dąbrowicz. 2017. Life cycle assessment of grain maize in intensive, conventional crop production system. *Romanian Agricultural Research* 61: 301-3107.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. Susan Solomon, Dahe Qin, Martin Manning, Zhenlin Chen, Melinda Marquis, Kristen Averyt, Melinda M.B. Tignor, Henry L. Miller, Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC 2013. *Climate change 2013. The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, ed. Stocker Thomas F., Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Paline M. Midgley. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. 2014. *Fifth Assessment Report. Mitigation of climate change*, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3>, access: 12.07.2017.
- Iribarren Diego, Ian Vázquez-Rowe, Maria Teresa Moreira., Gumersindo Feijoo. 2010. Further potentials in the joint implementation of life cycle assessment and data envelopment analysis. *Science of the Total Environment* 408: 5265-5272, doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.078.
- ISO 2013. TS 14067: 2013: Greenhouse Gases. Carbon Footprint of Products. Requirements and Guidelines for Quantification and Communication. Geneva: International Organization for Standardization.
- KOBiZE (Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami). 2017. *Poland's National Inventory Report 2017. Greenhouse Gas Inventory for 1988-2015*. Warszawa: The National Centre for Emissions Management.
- Ma Bao-Luo, Bernice C. Liang, Dilip Kumar Biswas, Malcolm J. Morrison, Neil B. McLaughlin. 2012. The carbon footprint of maize production as affected by nitrogen fertilizer and maize-legume rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 94: 15-31, doi: 0.1007/s10705-012-9522-0.
- Mohammadi Ali, Shahin Rafiee, Ali Jafari, Tommy Dalgaard, Trydeman Marie Knudsen, Alireza Keyhani, Seyed H. Mousavi Avval, John E. Hermansen. 2013. Potential greenhouse gas emission reductions in soybean farming: A combined use of Life Cycle Assessment and Data Envelopment Analysis. *Journal of Cleaner Production* 54: 89-100.

- Mohammadi Ali, Shahin Rafiee, Ali Jafari, Alireza Keyhani, Tommy Dalgaard, Knudsen Marie Trydeman, Lan T. Nguyen Thu, Robert Borek, John E. Hermansen. 2015. Joint Life Cycle Assessment and Data Envelopment Analysis for the benchmarking of environmental impacts in rice paddy production. *Journal of Cleaner Production* 106: 521-532.
- Nabavi-Pelesaraei Ashkan, Homa Hosseinzadeh-Bandbafha, Peyman Qasemi-Kordkheili, Hamed Kouchaki-Penchah, Farshid Riahi-Dorcheh. 2016. Applying optimization techniques to Improve of energy efficiency and GHG (Greenhouse Gas) emissions of wheat production. *Energy* 103: 672-678.
- Neef John. 2011. *Complete list of standard values. Version 4 public to harmonise European GHG calculations.* Biograce, <http://www.biograce.net/content/ghgcalculationtools/standardvalues>.
- Nieróbca Anna, Jerzy Kozyra, Katarzyna Mizak. 2008. Zmiany warunków termicznych dla uprawy kukurydzy w Polsce. [W] *Problemy agrotechniki oraz wykorzystania kukurydzy i sorgo* (Changes in thermal conditions for maize cultivation in Poland. [In] *Problems of agrotechnics and the use of maize and sorgo*), ed. T. Michalski, 26-30. Poznań: Uniwersytet w Poznaniu.
- Ochal Piotr, Tamara Jadczyzyn, Beata Jurga. 2015. Rozwój systemu korzeniowego kukurydzy w zależności od umieszczenia nawozu w glebie (The development of maize root system depending on the placement of fertilizer in the soil). *Polish Journal of Agronomy* 23: 74-81.
- Pandey Divya, Madhoolika Agrawal, Jai Shanker Pandey. 2011. Carbon footprint: current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment* 178: 135-160, doi: 10.1007/s10661-010-1678-y.
- R Core Team. 2014. *R: A language and environment for statistical computing*, <https://www.gbif.org/tool/81287/r-a-language-and-environment-for-statistical-computing>.
- RStudio Team. 2015. *RStudio: Integrated Development for RStudio*. Boston, Inc.
- Rebolledo-Leiva Ricardo, Lidia Angulo-Meza, Alfredo Iriarte, Marcela C. González-Araya. 2017. Joint carbon footprint assessment and Data Envelopment Analysis for the reduction of greenhouse gas emissions in agriculture production. *Science of the Total Environment* 593-594: 36-46.
- Syp Alina, Antoni Faber, Magdalena Borzęcka-Walker, Dariusz Osuch. 2015. Assessment of greenhouse gas emissions in winter wheat farms using Data Envelopment Analysis approach. *Polish Journal of Environmental Studies* 24: 2197-2203.
- Vázquez-Rowe Ian, Diego Iribarren, Maria Teresa Moreira, Gumersindo Feijoo. 2010. Combined application of life cycle assessment and data envelopment analysis as a methodological approach for the assessment of fisheries. *International Journal of Life Cycle Assessment* 15: 272-283, doi: 10.1007/s11367-010-0154-9.
- Zhang Dan, Jianbo Shen, Fusuo Zhang, Yu'e Li, Weifeng Zhang. 2017. Carbon footprint of grain production in China. *Scientific Report* 7, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04182-x>.

Summary

The aim of the study is to assess the possibility of reducing greenhouse gas (GC) emissions in the cultivation of maize for grain using the method combining carbon footprint (CF) and Data Envelopment Analysis (DEA). The analysis used survey data from 32 farms. The quantitative assessment of greenhouse gas emissions with a breakdown into the main emission sources was presented, and then the possibilities of limiting the level of GHG emission in these farms were determined. The emission reduction potential for the analyzed farms was specified in the range from 94 to 1,047 kg CO₂-eq/ha (from 3.3 to 33.4%).

Adres do korespondencji

mgr Tomasz Żyłowski

orcid.org/0000-0002-6665-2787

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB

Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych

ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy

e-mail: tzykowski@iung.pulawy.pl

mgr inż. Aleksandra Król

orcid.org/0000-0002-6680-6328

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PIB

Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych

ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy

e-mail: akrol@iung.pulawy.pl

dr hab. Jerzy Kozyra

orcid.org/0000-0002-7082-8765

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – PPIB

Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych

ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy

e-mail: kozyr@iung.pulawy.pl