

Optimization of Energy Sustainability and Global Warming Potential in Zucchini Production in the Dezful Region

Amir Azizpanah^{*1}, Meisam Mohammadi², Reza Askarizad³

- 1- Associate Professor, Department of Biosystems Mechanics, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.
- 2- Assistant Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.
- 3- M.Sc. Student, Department of Biosystems Mechanics, Faculty of Agriculture, Ilam University, Iran.

*Corresponding author: a.azizpanah@ilam.ac.ir

(Received: 30 November 2025

Revised: 05 January 2026

Accepted: 9 February 2026)

Extended Abstract

1. **Introduction:** Agricultural systems are under increasing sustainability and environmental pressure to improve resource-use efficiency in response to rising energy demand, environmental degradation, and greenhouse gas emissions. Intensive use of fertilizers, fossil fuels, and irrigation water has increased production costs and reduced environmental sustainability. Improving resource-use efficiency is therefore essential for sustainable agricultural production. Data Envelopment Analysis (DEA), particularly the Constant Returns to Scale (CRS) and Variable Returns to Scale (VRS) models are an effective tool for evaluating technical efficiency and identifying input waste without reducing output. Integrating energy analysis with environmental indicators such as carbon efficiency and greenhouse gas emissions provides a comprehensive framework for sustainability assessment. Zucchini (*Cucurbita pepo* L.) is widely cultivated in Dezful County, Iran, under intensive, input-based systems that require substantial energy inputs. Excessive use of chemical fertilizers, diesel fuel, and electricity in these production systems contributes to low energy efficiency and high environmental impacts. This study evaluates energy use, efficiency indicators, GHG emissions, carbon performance, and sustainability indices in zucchini production, and determines optimal input-use patterns using DEA.
2. **Materials and Methods:** The study was conducted on 30 zucchini farms in Dezful County, Khuzestan Province, Iran. Data on inputs, including human labor, machinery, diesel fuel, fertilizers, pesticides, irrigation water, electricity, and seed, were collected through field surveys. All inputs and outputs were converted into energy units (MJ ha⁻¹) using standard energy equivalents. Energy indicators, including total input and output energy, energy ratio, net energy, and specific energy, were calculated. DEA input-oriented models under CRS and VRS assumptions were applied to evaluate technical efficiency and estimate potential input savings. Environmental impacts were assessed by calculating emissions of CO₂, CH₄, and N₂O from agricultural inputs. Global Warming Potential (GWP) was expressed as CO₂ equivalents. Carbon input, carbon output, net carbon gain, carbon efficiency, and sustainability index were also computed. Results from conventional and optimized scenarios were compared to evaluate improvements in energy and environmental performance.
3. **Results and Discussion:** Total energy input and output in conventional production were 41,414.28 and 48,042.74 MJ ha⁻¹, respectively. Electricity (31.62%), nitrogen fertilizer (28.91%), diesel fuel (16.72%), and human labor (6.48%) were the main contributors to energy consumption, indicating that irrigation and fertilizer management are key factors in energy use. DEA results showed significant inefficiencies in input use. Energy consumption decreased from 41,414.28 MJ ha⁻¹ in the conventional system to 33,973.29 MJ ha⁻¹ under the optimized scenario. The highest energy savings were related to nitrogen fertilizer (39.91%), followed by pesticides (31.07%), human labor (24.21%), and diesel fuel (21.21%). These results highlight the potential for improving farm management practices and reducing unnecessary input use. Energy performance indicators improved under the optimized system. Specific energy decreased, indicating lower energy use per unit of output. Energy ratio and net energy increased under the optimized scenario, indicating more efficient utilization of energy inputs and greater energy productivity per unit of resource consumed. Environmental analysis revealed a reduction in total GWP from about 5,185.81 kg CO₂eq ha⁻¹ in the conventional system to 4,249.94 kg CO₂eq ha⁻¹ in the optimized system. Electricity was the largest contributor to emissions (>70%), followed by diesel fuel and nitrogen fertilizer. Diesel-related emissions decreased significantly due to improved machinery management, while reduced nitrogen application lowered soil-related N₂O emissions. Despite improvements, irrigation-related electricity use remained the

main environmental concern. DEA-based efficiency analysis indicated that 16 farms were fully efficient under CRS, while 22 farms were efficient under VRS. Average efficiency scores were 96.61% (CRS) and 99.38% (VRS). Inefficient farms could reduce input use by about 7.25% without affecting yield. The VRS model identified higher potential savings due to its flexibility in accounting for scale differences. Carbon analysis showed that carbon output remained constant at 27,024.04 kg C ha⁻¹, indicating that production levels were maintained. Carbon input decreased from 1,400.17 to 1,147.48 kg C ha⁻¹, increasing net carbon gain. Carbon efficiency improved from 19.31 to 23.56, while the sustainability index increased from 18.35 to 22.55. These improvements confirm enhanced environmental performance under optimized management.

4. **Conclusion:** This study demonstrated that DEA-based optimization can substantially improve the energy and environmental performance of zucchini production systems without reducing yield. Electricity, diesel fuel, and nitrogen fertilizer were identified as the major contributors to energy use and emissions. Significant reductions in energy consumption and greenhouse gas emissions were achieved through more efficient use of production inputs, while improvements in energy indicators, carbon efficiency, and sustainability indices confirmed the effectiveness of the optimized management scenario. It was observed that improving irrigation efficiency, optimizing fertilizer application, reducing fossil fuel use, and adopting renewable energy systems can further enhance the sustainability of zucchini production. Overall, integrating energy analysis with DEA provides a powerful approach for improving resource efficiency and supporting sustainable agricultural development.

Keywords: Data Envelopment Analysis (DEA), energy efficiency, global warming, carbon efficiency, sustainability.

Citation: Azizpanah, A., Mohammadi, M., & Askarizadeh, R. (2026). Optimization of energy sustainability and global warming potential of zucchini production in the Dezful region. *Journal of Vegetables Sciences*, 19(1), 189-208. doi:10.22034/iuvs.2026.2089700.1450

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Vegetables Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



بهینه‌سازی پایداری انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی تولید کدو در منطقه دزفول

امیر عزیزپناه^{۱*}، میثم محمدی^۲، رضا عسکری زاد^۳

۱- دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

۲- استادیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

*نویسنده مسئول: a.azizpanah@ilam.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و کارایی تولید کدو سبز در شهرستان دزفول و تعیین الگوی بهینه مصرف نهاده‌ها با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) انجام شد. نتایج نشان داد که کل انرژی ورودی و خروجی به ترتیب برابر با ۴۱۴۱۴/۲۸ و ۴۸۰۴۲/۷۴ مگاژول در هکتار بود. بیشترین سهم انرژی مصرفی مربوط به الکتریسیته با ۳۱/۶۳، کود نیتروژن ۲۸/۹۱ و سوخت دیزل ۱۶/۷۲ درصد بود. بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها موجب کاهش انرژی مصرفی از ۴۱۴۱۴/۲۸ به ۳۳۹۷۳/۲۹ مگاژول در هکتار شد که عمدتاً ناشی از کاهش مصرف کود نیتروژن، سموم شیمیایی، سوخت دیزل و نیروی انسانی بود. همچنین شاخص‌های انرژی شامل نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی و انرژی خالص در شرایط بهینه افزایش یافتند که نشان‌دهنده افزایش کارایی سامانه تولید است. میزان پتانسیل گرمایش جهانی با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها از ۵۱۸۵/۵۱ به ۴۲۴۹/۹۴ کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن در هکتار کاهش یافت. مقدار کربن ورودی از ۱۴۰۰/۱۷ به ۱۱۴۷/۴۸ کیلوگرم کربن در هکتار کاهش یافت و شاخص پایداری از ۱۸/۳۵ به ۲۲/۵۵ افزایش پیدا کرد. نتایج تحلیل پوششی داده‌ها نشان داد شاخص کارایی کربن نیز از ۱۹/۳۱ در حالت مرسوم به ۲۳/۵۶ در حالت بهینه افزایش یافته که بیانگر افزایش بهره‌وری مصرف نهاده‌ها و کاهش شدت انتشار کربن در فرایند تولید است و میانگین کارایی فنی و کارایی فنی خالص مزارع به ترتیب ۹۶/۶۱ و ۹۹/۳۸ درصد بوده و بخشی از نهاده‌های مصرفی قابلیت صرفه‌جویی بدون کاهش عملکرد را دارند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پوششی، بهره‌وری انرژی، گرمایش جهانی، کارایی کربن، پایداری. مستمر.

استناد: عزیزپناه، الف، محمدی، م و عسکری‌زاد ر. (۱۴۰۵). بهینه‌سازی پایداری انرژی و پتانسیل گرمایش جهانی تولید کدو در منطقه دزفول. علوم سبزی‌ها، ۱۹(۱)، ۱۸۹-۲۰۸.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این مجله به صورت آزاد در وب سایت مجله برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترسی است.

مقدمه

کدو از مهم‌ترین محصولات زراعی در ایران است که در انواع مختلفی نظیر کدوسبز، کدوخلوایی، کدوتنبل، کدو زرد و کدوی خورشتی کشت می‌شود. کشت کدوی سبز (*Cucurbita pepo* L.) به دلیل ارزش تغذیه‌ای و خواص مطلوب برای سلامت انسان، از مهم‌ترین سبزیجات مناطق گرم به شمار می‌رود. این محصول به دلیل برخورداری از رشد سریع، عملکرد بالا و سازگاری با شرایط اقلیمی گوناگون، جایگاه ویژه‌ای در تولید محصولات جالیزی داشته و نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی و توسعه الگوی تغذیه سالم در بسیاری از کشورها از جمله ایران ایفا می‌کند (Ashs, 2017). حفاظت از محیط‌زیست یکی از مهمترین ابعاد تولید است که همراه با کارآمدی فنی، اقتصادی و اجتماعی، حرکت در مسیر تولید پایدار را میسر می‌سازد. انرژی از جمله مؤلفه‌های کلیدی بعد زیست‌محیطی برای تولید پایدار است. همچنین، کاهش مصرف انرژی در فرآیند تولید محصولات، به دلیل اهمیت اقتصادی آن، ضرورتی انکارناپذیر داشته و باید به کمترین میزان ممکن دست یابد (Kheiralipour, 2022). مصرف نامتوازن و مفرط نهاده‌های آگروشیمیایی (شامل کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها) و سوخت‌های فسیلی، همگام با بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب و خاک، چالش‌های زیست‌محیطی متعددی را به همراه داشته است. این روند ناپایدار در مدیریت کشاورزی، نه تنها موجب کاهش تنوع زیستی در اکوسیستم‌های زراعی شده، بلکه آلودگی شدید زیستگاه‌های طبیعی و زوال منابع پایه را در پی داشته است. بر اساس برآوردها، فعالیت‌های کشاورزی حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در جهان را به خود اختصاص می‌دهند (Nabavi-Pelesaraei et al., 2022; Mirzaei et al., 2018). عملیات زراعی در مزارع کشاورزی (شامل آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت و برداشت) به دلیل استفاده گسترده از ماشین‌آلات، کودهای شیمیایی و سموم، بیشترین تأثیر را بر محیط زیست دارند. این عملیات به طور مستقیم با زیست‌بوم

محصولات در ارتباط هستند. از این رو، برای دستیابی به کارایی بهتر، ارتقای بهره‌وری و افزایش سازگاری با محیط زیست، لازم است شناخت علمی از قابلیت‌ها و شرایط محیطی تولید به‌طور مستمر افزایش یابد. این شناخت باید بر مبنای نیاز واقعی محصولات و با هدف تعیین میزان مصرف بهینه نهاده‌ها صورت گیرد (Wang et al., 2025). تحلیل‌های انرژی و بهینه‌سازی مصرف آن و بررسی‌های زیست‌محیطی در مطالعات متعدد بر روی محصولات کشاورزی متنوعی از جمله گوجه-فرنگی (Saidi et al., 2025)، گیلاس (Meftahi et al., 2025)، یونجه (Heydarizadeh et al., 2026)، کنبج و ماش (Rostami et al., 2025)، ذرت دانه‌ای (Hosseini et al., 2024)، کدوخلوایی (Sharifi et al., 2021)، آفتابگردان و کدو (Ramedani et al., 2024)، ترب (Azizpanah & Namdari, 2020) انجام شده است. بنابراین هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی وضعیت مصرف انرژی و بهره‌وری، میزان بهینه سازی و بررسی انتشار گازهای گلخانه‌ای برای تولید کدو است تا با تعیین مقادیر نهاده‌ها و ستاده‌ها و انرژی آن‌ها و محاسبه شاخص‌های انرژی، نقاط ضعف و قوت در تولید محصول مشخص شده و پیشنهاداتی برای ارتقای تولید آن فراهم گردد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد پژوهش

شهرستان دزفول یکی از شهرستان‌های استان خوزستان است که مساحتی در حدود ۴۷۶۲ کیلومتر مربع دارد. این شهرستان در حدود ۴۸ درجه و ۲۴ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۳۲ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی از خط استوا واقع شده است.

منطقه مورد مطالعه و جمع‌آوری داده‌ها

تحقیق حاضر در سال زراعی ۱۴۰۴ در شهرستان دزفول انجام شد. داده‌ها به وسیله پرسشنامه و مصاحبه چهره به چهره با کشاورزان منطقه و کارشناسان سازمان جهاد کشاورزی جمع‌آوری شد. تعداد پرسشنامه با استفاده از معادله (۱) تعیین شد (Nikkhah et al., 2014).

و به‌روزترین منابع علمی با ضرب مقدار هر ورودی در ضریب انرژی مربوطه بر اساس معادله (۲) تعیین شدند (Hossein et al., 2024).

معادله (۲) $E_{input} = I_{consumption} \times EC_{input}$ که در آن، E_{input} انرژی ورودی‌های مصرف‌شده (مگاژول بر هکتار)، $I_{consumption}$ میزان مصرف ورودی I (واحد بر هکتار) و EC_{input} معادل انرژی ورودی‌ها (مگاژول بر واحد) است.

شاخص‌های انرژی

از شاخص‌های انرژی به‌عنوان ابزاری برای مقایسه سیستم‌ها و مطالعه جزء به جزء آن‌ها با یکدیگر استفاده می‌شوند. در علوم کشاورزی تحلیل انرژی به‌عنوان مبحثی مهم مطرح است. برای محاسبه صحیح انرژی، شاخص‌های اصلی نسبت انرژی (*Energy Ratio*)، بهره‌وری انرژی (*Energy productivity*)، افزوده خالص انرژی (*Energy Net Gain*) مطابق روابط جدول (۱) استفاده شد.

$$n = \frac{Nt^2 S^2}{Nt^2 + t^2 S^2} \quad \text{معادله (۱)}$$

در این رابطه N معادل اندازه جامعه آماری، t student ضریب اطمینان قابل قبول که با فرض نرمال بودن توزیع صفت مورد نظر از جدول t استیودنت به دست می‌آید، S^2 برآورد واریانس صفت مورد مطالعه در جامعه که واریانس نسبت انرژی در منطقه مورد مطالعه است، d دقت و n حجم نمونه است (Hossein et al., 2024).

برآورد انرژی ورودی‌ها و خروجی

انرژی مصرفی در مزارع کدو سبز شامل انرژی ماشین‌های کشاورزی، سوخت دیزل، نیروی انسانی، کودهای شیمیایی، کود دامی، سموم شیمیایی و آبیاری بود. به‌منظور تعیین میزان انرژی ورودی و خروجی در تولید محصول در طول دوره، مقدار ضرایب استاندارد نهاده‌های مصرفی در جدول (۳) نشان داده شده است. هم‌ارز انرژی ورودی‌ها و خروجی‌ها بر اساس معتبرترین

جدول ۱. شاخص‌های انرژی در سیستم زراعی محصول.

Table 1. Energy indices in cropping system of crop.

شاخص Index	واحد Unit	روابط Equation	منابع Reference
نسبت انرژی Energy Ratio	-	$\frac{\text{Output energy (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{Total input energy (MJ ha}^{-1}\text{)}}$	(Omidmehr et al., 2019)
بهره‌وری انرژی Energy productivity	کیلوگرم بر مگاژول Kg MJ ⁻¹	$\frac{\text{yield (Kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Total input energy (MJ ha}^{-1}\text{)}}$	(Fartout Enayat et al., 2017)
انرژی خالص Net energy gain	مگاژول بر هکتار MJ ha ⁻¹	Output energy - Total input energy	(Azizpanah & Namdari., 2020)

گرمایش جهانی، باید میزان (CO₂) تولید شده ناشی از مصرف نهاده‌های متفاوت در باغات را در نظر گرفت (Yousefi et al., 2014). این نهاده‌ها به صورت کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم، سموم شیمیایی،

برای ارزیابی اثرات زیست محیطی و پتانسل گرمایش جهانی روش‌های مختلفی وجود دارد، جهت تعیین انتشار گازهای گلخانه‌ای متناسب در مزارع کدو سبز، منابع مختلفی دخالت داشته و برای محاسبه پتانسیل

است ضرب می‌شود. میزان کل کربن خروجی CO از حاصل جمع میزان کربن دانه، ساقه، ریشه و ترشحات ریشه طبق روابط ۹-۵ محاسبه شد (Yousefi *et al.*, 2014).

$$C_p = Y_p \times 0.45 \quad \text{معادله (۵)}$$

$$C_s = Y_s \times 0.45 \quad \text{معادله (۶)}$$

$$C_R = Y_R \times 0.45 \quad \text{معادله (۷)}$$

$$C_E = Y_E \times C_R \quad \text{معادله (۸)}$$

C_E و C_R ، C_S ، C_P (بر حسب گرم کربن در هکتار در سال) به ترتیب میزان کربن موجود در دانه، اندام هوایی، ریشه و مواد خارج از ریشه (مانند ترشحات ریشه) محاسبه می‌شوند. Y_P ، Y_S ، Y_R و Y_E به ترتیب وزن دانه محصول، بافت‌های هوایی، ریشه و مواد برون‌ریشه‌ای هستند. در تخصیص کربن میان بخش‌های مختلف یک گیاه دانه‌ای، فرض می‌شود که غلظت کربن در تمام بخش‌های گیاه برابر ۰/۴۵ گرم باشد. به عبارت دیگر، محتوای کربن معادل ۰/۴۵ درصد از کل عملکرد در نظر گرفته می‌شود. در ادامه نسبت کربنی که گیاه در بافت خود ذخیره می‌کند یا کارایی مصرف کربن (Carbon efficiency) نیز با استفاده از معادله ۹ محاسبه گردید (Taki *et al.*, 2018; Lal, 2004).

$$\text{Carbon efficiency} = \frac{CO (Kg\ cha^{-1})^{-1}}{CI (Kg\ cha^{-1})^{-1}} \quad \text{معادله (۹)}$$

تحلیل پوششی داده‌ها (Data Envelopment Analysis)

روش تحلیل پوششی داده‌ها DEA با استفاده از داده‌های ورودی محصول برای هر واحد تولیدی، مرز تولید ناپارامتریک را ایجاد می‌کند (Cooper *et al.*, 2007). مدل‌های DEA به دو دسته اصلی محصول‌گرا (خروجی‌محور) و نهاده‌گرا (ورودی‌محور) تقسیم می‌شوند. در مدل‌های محصول‌گرا، هدف حداکثر کردن میزان تولید محصول با توجه به مقدار معین نهاده‌های

سوخت دیزل، ماشین‌ها و حمل و نقل در مزارع می‌باشند (Khoshnevisan *et al.*, 2013; Bakhtiari *et al.*, 2015). پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) از جمع گازهای گلخانه‌ای محاسبه شده و به صورت معادل CO_2 بیان می‌شوند. گازهای گلخانه‌ای عمده شامل دی‌اکسیدکربن (CO_2)، نیترو اکسید (N_2O) و متان (CH_4) می‌باشند (Omidmehr, 2019). تأثیر گازهای دی‌اکسیدکربن، متان و اکسید نیتروژن بر گرمایش زمین متفاوت می‌باشد (جدول ۲)، به طوری که هر واحد متان (CH_4) حدود ۲۱ و اکسید نیتروژن (N_2O) حدود ۳۱۰ برابر دی‌اکسیدکربن در گرمایش زمین نقش دارند. میزان پتانسیل گرمایش جهانی بر اساس معادله (۳) محاسبه گردید (Khodaei johan *et al.*, 2022).

$$GWP = CO_2\text{flux} + (N_2O\text{flux} \times 310) + (CH_4\text{flux} \times 21) \quad \text{معادله (۳)}$$

در این معادله (GWP) پتانسیل گرمایش جهانی (کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن در هکتار)، $CO_2\text{flux}$ انتشار دی‌اکسیدکربن حاصل از مصرف نهاده‌های شیمیایی، سوخت دیزل، الکتریسیته، $N_2O\text{flux}$ انتشار اکسید نیتروژن حاصل از مصرف نهاده‌ها و $CH_4\text{flux}$ انتشار متان حاصل از مصرف نهاده‌ها بر اساس جدول (۲) می‌باشند. روابط مربوط به شاخص پایداری (SI) و خروجی کربن (CO) به صورت معادله زیر ارائه شده است:

$$IS = \frac{(CO - CI)}{CI} \quad \text{معادله (۴)}$$

در معادله IS نشان‌دهنده شاخص پایداری، CO بیانگر مجموع خروجی کربن (شامل بذر، ساقه و ریشه) می‌باشد. CI نیز مخفف مجموع ورودی کربن است که محتوای کربن ناشی از نهاده‌های شیمیایی، سوخت و الکتریسیته را نشان می‌دهد. برای محاسبه CI مقدار دی‌اکسید کربن تولیدشده در اثر مصرف نهاده‌ها در نسبت وزن مولکولی کربن به CO_2 که برابر با ۰/۲۷

مصرفی است، در حالی که در مدل‌های نهاده‌گرا، هدف کاهش مصرف نهاده‌ها در ازای سطح معینی از تولید است. در این مدل‌ها، هر یک از واحدها تحت عنوان واحد تصمیم‌گیرنده (Decision Making Unit) یا DMU نامیده می‌شوند. انتخاب نوع مدل DEA به میزان کنترل‌پذیری نهاده‌ها و ستاده‌ها بستگی دارد، بدین معنا که هر یک از این متغیرها کنترل‌پذیری بیشتری داشته باشند، مدل متناسب با آن به عنوان مدل مناسب انتخاب می‌شود. در تحقیق حاضر، از آنجا که اعمال تغییرات در مقدار مصرف نهاده‌ها عملی‌تر است، از دو مدل بازگشت به مقیاس ثابت (Constant Returns to Scale) یا CRS و بازگشت به مقیاس متغیر (Variable Returns to Scale) یا VRS با ماهیت ورودی‌محور برای مزارع کدو سبز در شهرستان دزفول استفاده شد.

دلیل انتخاب رویکرد مدل ورودی‌محور آن است که تنها یک خروجی (عملکرد محصول) وجود دارد، در حالی که چندین نهاده ورودی در فرایند تولید نقش دارند. مدل بازگشت به مقیاس به این معناست که اگر میزان نهاده‌های ورودی x برابر شود، میزان خروجی y برابر خواهد شد. پس از انجام محاسبات، در صورتی که $y > x$ باشد، بازده به مقیاس مدل افزایشی و اگر $x = y$ باشد، مقدار بازده به مقیاس ثابت و اگر $x < y$ باشد، میزان بازده به مقیاس کاهش‌ی خواهد بود (Hesampour et al., 2022). معادله بین کارایی فنی، کارایی فنی خالص و کارایی مقیاس به صورت معادله (۱۰) می‌باشد:

$$SE = \frac{TE_{CRS}}{PTE_{VRS}} \quad \text{معادله (۱۰)}$$

جدول ۲ - ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای به ازای هر واحد ورودی‌های شیمیایی و پتانسیل گرمایش جهانی برای تولید کدو سبز.

Table 2. Greenhouse gas emission coefficients per unit of chemical inputs and global warming potential (GWP) for zucchini production.

منابع Reference	متان CH ₄	اکسید نیتروس N ₂ O	دی اکسید کربن CO ₂	واحد Unit	ورودی Inpute
(Snyder et al., 2009)	5.20	0.70	3560	لیتر (L)	سوخت دیزل Diesel
(Snyder et al., 2009)	3.70	0.03	3100	کیلوگرم kg	کود نیتروژن Nitrogen Fertilizer
(Snyder et al., 2009)	1.80	0.02	1000	کیلوگرم kg	کود فسفر Phosphate (P ₂ O ₅)
(Snyder et al., 2009)	1.00	0.01	700	کیلوگرم kg	کود پتاسیم potassium
(Asgharipour et al., 2016)	0.01	0.02	5100	لیتر L	سموم شیمیایی Chemical biocides
(Snyder et al., 2009)	0.02	8.82	61.2	کیلو وات ساعت Kwh	الکتریسیته (Electricity)
(Asgharipour et al., 2016)	21	310	1	-	پتانسیل گرمایش جهانی GWP CO ₂ equivalence factor

که در اینجا کارایی فنی برآورد شده از مدل بازده ثابت نسبت به مقیاس (Technical Efficiency) بر پایه مدل CRS و کارایی فنی برآورد شده از مدل بازده متغیر نسبت به مقیاس (Pure Technical

Efficiency) بر پایه مدل VRS و مقدار کارایی مقیاس (Scale Efficiency) که مقدار آن بیشتر از یک نخواهد بود. هر کدام از این مدل‌ها بر پایه (خروجی‌محور-ورودی محور) می‌باشند. بدین معنی که

DEA، واحدهای کارا و ناکارا شناسایی و شاخص‌های انرژی در شرایط واقعی و بهینه برای تولید کدوی سبز مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

جدول (۳) مقدار و سهم هر کدام از نهاده‌های ورودی در تولید کدو سبز در مزارع شهرستان دزفول را نشان می‌دهد. بر این اساس کل انرژی ورودی برابر ۴۱۴۱۴/۲۸ و کل انرژی خروجی ۴۸۰۴۲/۷۴ مگاژول بر هکتار محاسبه شد. پس از بررسی و محاسبه درصد انرژی نهاده‌های مصرفی مشخص گردید که الکتریسیته با ۳۱/۶۳ و کود نیترژن با ۲۸/۹۱ و سوخت دیزل با ۱۶/۷۲ و نیروی انسانی ۶/۴۸ درصد بیشترین میزان درصد مصرف نهاده‌ها را به خود اختصاص دادند. در سایر تحقیقات محصولات کشاورزی، پژوهشگران به مطالعه تحلیل انرژی ورودی و خروجی دیگر محصولات کشاورزی شامل کدو حلوائی به ترتیب ۱۶۱۹۱ و ۲۷۱۴۳ مگاژول بر هکتار (Sharifi et al., 2021)، یونجه ۷۶۲۳۷/۶۳ و Heydarizadeh et al., 2026)، گیلان ۲۵۱۶۷/۹۴ و ۴۴۹۵۰/۲۱ مگاژول بر هکتار (Meftahi et al., 2025) و ذرت دانه‌ای ۱۹۷۸۱۷/۲۵ و ۸۷۳۱۹۷/۱۰ مگاژول بر هکتار (Hosseini et al., 2024) گزارش نمودند. مطالعات پیشین نیز مقادیر متفاوتی از انرژی ورودی و خروجی را برای محصولات کشاورزی مختلف گزارش نموده‌اند. در این راستا میزان انرژی ورودی و خروجی برای تولید یونجه برابر با ۷۶۲۳۷/۶۳ و ۱۹۵۶۵۶/۶۷ مگاژول در هکتار (Heydarizadeh et al., 2026)، برای تولید گیلان ۲۵۱۶۷/۹۴ و ۴۴۹۵۰/۲۱ مگاژول در هکتار (Meftahi et al., 2025) و برای ذرت دانه‌ای ۱۹۷۸۱۷/۲۵ و ۸۷۳۱۹۷/۱۰ مگاژول در هکتار بوده است (Hosseini et al., 2024). تفاوت میان این مقادیر انرژی نشان‌دهنده تأثیر نوع محصول، سطح فناوری و مکانیزاسیون، الگوی مصرف نهاده‌ها و شرایط اقلیمی و مدیریتی بر الگوی مصرف انرژی در سامانه‌های تولید کشاورزی است. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با

یک DMU ناکارا می‌تواند بواسطه کاهش سطح نهاده‌های ورودی در حالی که مقدار نهاده خروجی ثابت است (ورودی‌محور) به یک واحد کارا تبدیل شود. به طور کلی، فرض بازده ثابت به مقیاس CRS بدان معناست که با افزایش میزان نهاده‌های ورودی به یک نسبت معین، خروجی (عملکرد محصول) نیز به همان نسبت تغییر می‌کند. این شرایط نشان می‌دهد که هر DMU می‌تواند میزان نهاده‌ها را بدون محدودیت تغییر دهد. در تحقیق حاضر، استفاده از روش ورودی‌محور مناسب به نظر می‌رسد، زیرا تنها یک خروجی (عملکرد محصول) وجود دارد و به طور معمول از چندین نهاده ورودی برای تولید محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. معیار استاندارد کارایی در این حالت مطابق معادله (۱۱) تعریف می‌شود (Sefeedpari et al., 2014).

معادله (۱۱)

$$Efficiency = \frac{u_1 y_1^* + u_2 y_2^* + \dots + u_N y_N^*}{v_1 x_1^* + v_2 x_2^* + \dots + v_M x_M^*}$$

که در این رابطه: $u_1, u_2, \dots$ وزن‌های داده شده به خروجی n ($n=1,2,\dots,N$) و $y_1^*, y_2^*, \dots, y_N^*$ مقدار خروجی n ($n=1,2,\dots,N$) از j امین DMU، $v_1, v_2, \dots$ وزن‌های داده شده به ورودی m ($m=1,2,\dots,M$) و $x_1^*, x_2^*, \dots, x_M^*$ مقدار ورودی m ($m=1,2,\dots,M$) برای j امین DMU، که DMU تحت بررسی است، می‌باشد. کارایی اغلب بین صفر و یک محدود می‌شود. کارایی اغلب مزارع کدو بین صفر و یک محدود می‌شود. هدف به‌کارگیری مدل تحلیل پوششی داده‌ها DEA در این پژوهش، بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و مدیریت کارای منابع انرژی، بدون ایجاد افت محسوس در تولید میزان عملکرد محصول مزارع کدوسبز در منطقه مورد مطالعه است. داده‌های تحقیق ابتدا در محیط نرم‌افزار Excel 2016 آماده‌سازی و سپس با استفاده از نرم‌افزار STATA، انرژی بهینه و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از هر یک از نهاده‌ها محاسبه شد. در ادامه، با بهره‌گیری از مدل‌های

مطالعات مذکور نشان داد که میزان انرژی ورودی و خروجی در تولید کدوسبزی در محدوده مقادیر گزارش شده برای سایر محصولات کشاورزی قرار دارد.

جدول ۳. مقادیر انرژی نهاده‌ها و ستانده‌ها به ازای هر هکتار در تولید کدو سبز در شهرستان دزفول.

Table 3. Energy values of inputs and outputs per hectare for zucchini production in Dezful.

درصد	انرژی ورودی (مگاژول در هکتار)	ضریب انرژی	واحد	نهاده
Percentage	Energy Input (MJ ha ⁻¹)	Energy Equivalent	Unit	Input
6.48	268.62	1.96	ساعت	نیروی انسانی
			h	Human labor
2.29	949.06	62.7	ساعت	ماشین‌آلات
			h	Machinery
16.72	6925.56	56.31	لیتر	سوخت دیزل
			L	Diesel fuel
28.91	11972.66	66.14	کیلوگرم	کود نیتروژن
			kg	Nitrogen fertilizer
3.62	1504.82	12.44	کیلوگرم	کود فسفر
			kg	Phosphate fertilizer
1.62	669	11.15	کیلوگرم	کود پتاسیم
			kg	Potassium fertilizer
5.79	2401.48	0.3	کیلوگرم	کود دامی
			kg	Farmyard manure
1.74	722.09	238	لیتر	علف‌کش
			L	Herbicide
0.82	337.17	216	لیتر	سم قارچ‌کش
			L	Fungicide
0.32	139.92	101.2	لیتر	سم حشره‌کش
			L	Insecticide
31.62	13101.12	11.93	ساعت	الکتریسیته
			kwh	Electricity
0.01	4.77	1.9	کیلوگرم	بذر
			kg	Seed
100	41414.28	—	—	مجموع انرژی ورودی
				Total input energy
100	48042.74	0.8	کیلوگرم	عملکرد
			kg	Yield (Output)

استفاده از الگوهای مدیریتی مناسب و بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها می‌تواند نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش اتلاف منابع در تولید کدو سبز داشته باشد. بررسی سهم نهاده‌های مختلف در صرفه‌جویی انرژی نشان داد که کود نیتروژن با ۳۹/۹۱ درصد بیشترین میزان انرژی ذخیره‌شده را به خود اختصاص داده است. بالا بودن سهم این نهاده

در شکل (۱) میزان انرژی مصرفی نهاده‌ها در وضعیت مرسوم و بهینه در مزارع کدو سبز منطقه دزفول نشان داده شده است. نتایج نشان داد که کل انرژی مصرفی در حالت مرسوم برابر ۴۱۴۱۴/۲۸ مگاژول در هکتار بود، در حالی که این مقدار در الگوی کشت بهینه به ۳۳۹۷۳/۲۹ مگاژول در هکتار کاهش یافت. این کاهش قابل توجه انرژی مصرفی بیانگر آن است که

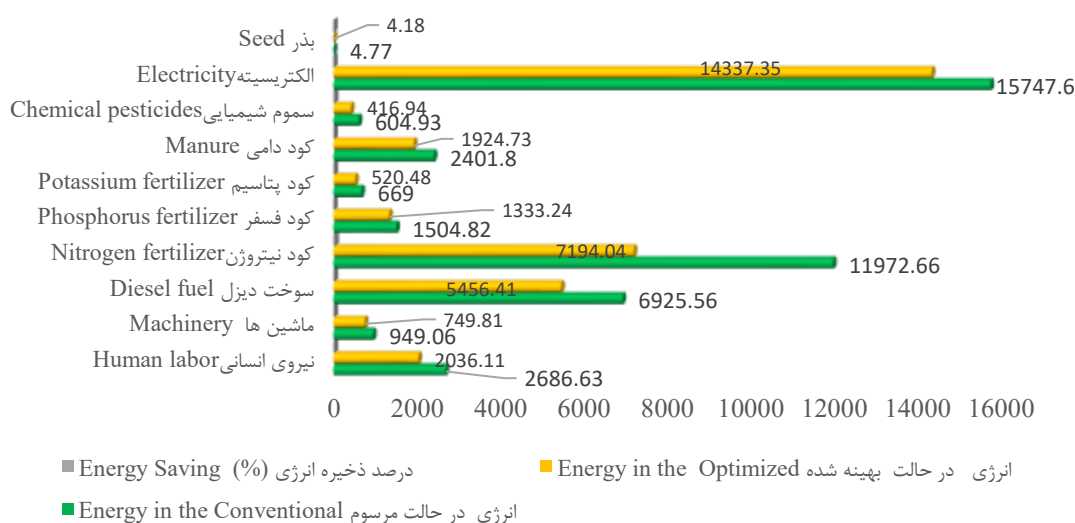
نشان‌دهنده مصرف بیش از حد کودهای نیتروژنه در روش‌های مرسوم تولید و وابستگی بالای سیستم تولید به نهاده‌های شیمیایی است. از آن‌جا که تولید و مصرف کودهای نیتروژنه نیازمند انرژی زیادی است، مدیریت صحیح مصرف این کودها از طریق تعیین دقیق نیاز گیاه، آزمون خاک و کاربرد بهینه کود می‌تواند تأثیر چشمگیری در کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های تولید و همچنین کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی داشته باشد. پس از کود نیتروژن، سموم شیمیایی با ۳۱/۰۷ درصد در رتبه دوم صرفه‌جویی انرژی قرار گرفتند. این نتیجه نشان می‌دهد که در شرایط بهینه، مدیریت بهتر آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز و استفاده هدفمندتر از سموم موجب کاهش مصرف انرژی مرتبط با این نهاده شده است. همچنین نیروی انسانی و سوخت دیزل به ترتیب با ۲۴/۲۱ و ۲۱/۲۱ درصد سهم قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی داشتند. کاهش مصرف سوخت دیزل می‌تواند ناشی از بهبود عملیات مزرعه‌ای، مدیریت بهینه اجرای عملیات ماشینی و استفاده کارآمدتر از تجهیزات کشاورزی باشد. از سوی دیگر، کاهش انرژی مصرفی نیروی انسانی نیز بیانگر افزایش کارایی مدیریت مزرعه و بهبود زمان‌بندی در اجرای عملیات تولید است. نادری و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی انتخاب بهترین نوع سازه برای کشت فلفل دلمه‌ای پرداختند و گزارش نمودند گلخانه‌های تولید فلفل دلمه‌ای در ایران با توجه به مصرف ۹۴/۵ درصد گاز طبیعی و ۴/۵ درصد الکتریسیته به لحاظ مصرف انرژی در وضعیت ناپایداری قرار دارند (Naderi et al., 2018). در تحقیقی در شهرکرد به منظور کاهش میزان نهاده‌های مصرفی در تولید ذرت علوفه‌ای با روش تحلیل پوششی داده‌ها گزارش شد بیشترین مقدار انرژی ذخیره شده مربوط به سموم علف‌کش و کودهای شیمیایی به ترتیب با ۲۱/۵۵ درصد و ۱۹/۶۴ درصد می‌باشد (Rastegar et al., 2020). به طور کلی نتایج شکل (۱) نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها نه تنها موجب کاهش چشمگیر مصرف انرژی در مزارع کدو سبز می‌شود، بلکه می‌تواند از طریق کاهش

هزینه‌های تولید، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی، زمینه را برای توسعه کشاورزی پایدار در منطقه دزفول فراهم سازد.

بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل (۲)، مقادیر شاخص‌های انرژی در شرایط مرسوم و بهینه‌شده بر پایه روش تحلیل پوششی داده‌ها DEA مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که اجرای الگوی بهینه مصرف نهاده‌ها موجب بهبود قابل توجه عملکرد انرژی در سامانه تولید کدو سبز در منطقه شده است. به گونه‌ای که مقدار شاخص انرژی ویژه در حالت بهینه کمتر از شرایط مرسوم بود. کاهش انرژی ویژه بیانگر آن است که برای تولید یک واحد محصول، انرژی کمتری مصرف شده و در نتیجه کارایی مصرف انرژی در سامانه تولید افزایش یافته است. این موضوع را می‌توان ناشی از مدیریت صحیح نهاده‌ها، کاهش مصرف سوخت، کودهای شیمیایی و سایر منابع انرژی بر دانست. در مقابل، مقدار شاخص انرژی خالص در حالت بهینه افزایش یافت. انرژی خالص از اختلاف بین انرژی خروجی و انرژی ورودی حاصل می‌شود؛ بنابراین افزایش این شاخص نشان‌دهنده آن است که سامانه تولید در شرایط بهینه توانسته است انرژی بیشتری نسبت به انرژی مصرفی تولید یا ذخیره نماید. این امر بیانگر بهبود بازده کلی سامانه تولید کدو سبز در منطقه مورد مطالعه است. همچنین، شاخص نسبت انرژی که از تقسیم انرژی خروجی بر انرژی ورودی به دست می‌آید، در حالت بهینه برابر ۲/۴۷ و در حالت مرسوم ۱/۶۴ محاسبه گردید. افزایش این شاخص بیانگر آن است که انرژی مصرف‌شده با کارایی و اثربخشی بیشتری به محصول تبدیل شده است. در واقع، هرچه مقدار نسبت انرژی بالاتر باشد، کارایی سامانه تولید از نظر مصرف انرژی مطلوب‌تر خواهد بود. همچنین میزان بهره‌وری در حالت مرسوم برابر ۲/۰۵ و در حالت بهینه ۳/۰۸ برآورد گردید. محققین به بررسی شاخص‌های انرژی تولید بذر و میوه

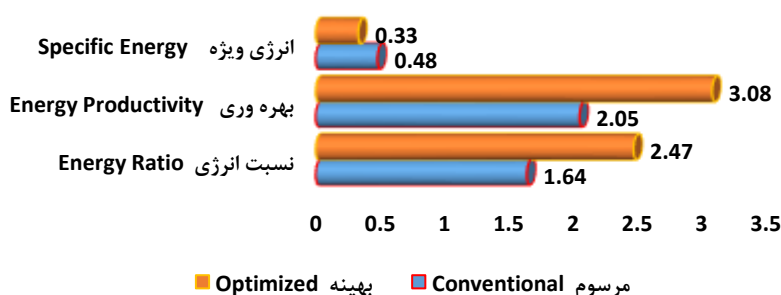
حالت بهینه محاسبه شد. همچنین کل انرژی ورودی معادل ۲۵۱۶۷/۹۴ مگاژول بر هکتار محاسبه شد که پس از بهینه‌سازی در میزان مصرفی نهاده‌ها، کاهش ۴۴۶۳/۰۵ مگاژول بر هکتار در کل انرژی ورودی گزارش شد (Meftahi *et al.*, 2025). در تحقیقی شاخص انرژی برای تولید بامیه و گوجه فرنگی در منطقه چوتاناگپور هندوستان به ترتیب ۲/۵۸ و ۷/۵۸ گزارش گردید (Sarkar *et al.*, 2023).

کدو پرداختند و گزارش نمودند که شاخص بازده انرژی به ترتیب برابر ۱/۱۶ و ۱/۴۳ بوده است که بیانگر استفاده مؤثر از انرژی در اکوسیستم‌های تولید کدو می‌باشد (Azarpour *et al.*, 2013). همچنین در پژوهشی دیگر در زمینه مصرف انرژی و بهینه‌سازی تولید گیلاس گزارش شد مقادیر نسبت انرژی و انرژی خالص به ترتیب برابر با ۱/۷ و ۱۹۷۸۲/۲۷ مگاژول بر هکتار در حالت مرسوم و ۲/۱ و ۲۴۱۴۵/۳۱ مگاژول بر هکتار در



شکل ۱- مقدار انرژی مصرف نهاده‌ها در حالت مرسوم و بهینه شده.

Figure 1- Energy consumption of inputs under conventional and optimized conditions.



شکل ۲- مقدار شاخص‌های انرژی در حالت مرسوم و بهینه شده

Figure 2- Energy indices values in the conventional and optimized conditions

Potential نهاده‌های مختلف را در تولید کدو سبز در دو حالت مرسوم و بهینه‌شده بر پایه روش تحلیل پوششی را نشان می‌دهند. در سیستم کشت کدوسبز در حالت مرسوم، مقدار کل پتانسیل گرمایش جهانی برابر

انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی به روش تحلیل پوششی داده‌ها جداول (۵ و ۴)، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) Global Warming

حدود ۵۱۸۵/۸۱ کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن و در حالت بهینه برابر ۴۲۴۹/۹۴ کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن گزارش شده است، که مقدار پتانسیل گرمایش جهانی در حالت مرسوم نشان‌دهنده شدت بالای انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر مصرف غیر بهینه نهاده‌ها است. بیشترین سهم انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به سوخت دیزل بود که حدود ۷۱۸/۱۶ کیلوگرم معادل CO₂ و نزدیک به ۱۳/۸۴ درصد کل GWP را شامل می‌شود. علت اصلی این موضوع مصرف زیاد سوخت در راستای اجرای عملیات خاک‌ورزی، آماده‌سازی زمین و حمل‌ونقل است. به طور کلی احتراق سوخت‌های فسیلی مستقیماً باعث آزاد شدن گازهای CO₂ و تا حدودی CH₄ و N₂O می‌شود. دومین منبع اصلی گرمایش جهانی، کود نیتروژن با حدود ۵۷۶/۹۱ کیلوگرم معادل CO₂ و سهم ۱۱/۱۲ درصد کل GWP را شامل می‌شود. دلیل اصلی این موضوع انتشار اکسید نیتروژن N₂O پس از مصرف کودهای ازته در خاک است. این نتایج نشان می‌دهد مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب زیست‌محیطی در تولید کدو سبز است. برق مصرفی نیز با حدود ۳۶۹۰/۴۸ کیلوگرم معادل CO₂ و سهم ۳۱/۶۳ درصد نقش بسیار مهمی در گرمایش جهانی دارد. این مقدار بالا ناشی از مصرف انرژی الکتریکی در سیستم‌های پمپاژ آب و آبیاری است. از آنجا که تولید برق در بیشتر کشورها وابسته به سوخت‌های فسیلی است، افزایش مصرف برق به صورت غیرمستقیم انتشار گازهای گلخانه‌ای را افزایش می‌دهد. مقدار GWP حاصل از مصرف سوخت دیزل از حدود ۷۱۸/۱۶ کیلوگرم معادل CO₂ به ۳۷۶/۵۷ کیلوگرم معادل CO₂ کاهش یافته است. این کاهش چشمگیر در اثر بهبود مدیریت عملیات در مزارع، کاهش تردد ماشین‌آلات و افزایش کارایی مصرف سوخت است. همچنین در حالت بهینه انرژی برق سهم بالایی در تولید GWP دارد و حدود ۷۹/۰۵ درصد کل انتشار را تشکیل می‌دهد. این مسئله نشان می‌دهد اگرچه مصرف نهاده‌ها بهینه شده،

اما سامانه آبیاری هنوز وابستگی زیادی به انرژی الکتریکی دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، اجرای الگوی بهینه مصرف نهاده‌ها موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش وابستگی سامانه تولید به سوخت‌های فسیلی، افزایش بهره‌وری مصرف انرژی در مزارع و ارتقای پایداری زیست‌محیطی تولید کدو سبز می‌شود. بنابراین سهم بالای انرژی برق در هر دو سامانه بیانگر آن است که مدیریت انرژی الکتریکی هنوز چالش اصلی سامانه تولید محسوب می‌شود و توسعه فناوری‌های آبیاری کم‌مصرف، استفاده از انرژی خورشیدی و بهبود راندمان پمپ‌ها می‌تواند نقش مهمی در کاهش بیشتر پتانسیل گرمایش جهانی داشته باشد. محققین به بررسی پتانسیل گرمایش جهانی تولید چغندر قند پرداختند و مقدار تولید گازهای دی‌اکسید کربن، اکسید نیتروژن و متان را به ترتیب برابر ۲۶۶۸/۳۵، ۲۲/۹۲ و ۳/۴۹ گزارش نمودند (Yousefi *et al.*, 2014). پتانسیل گرمایش جهانی در مزارع کلزای خراسان شمالی برابر ۲۴۱۳/۳۸ کیلوگرم معادل دی‌اکسیدکربن در هکتار محاسبه شد (Babaeian *et al.*, 2021). در گزارشی پتانسیل گرمایش جهانی تولید خیار و آفتابگردان در منطقه هلیلان استان ایلام به ترتیب ۸۵۵۴/۹۷ و ۲۴۱۷/۴۲ کیلوگرم معادل دی‌اکسید کربن در هکتار گزارش شد که پتانسیل گرمایش تولید خیار مقدار ۳/۵۳ برابر بیشتر از پتانسیل گرمایش جهانی ناشی از کشت آفتابگردان بود و مصرف نهاده‌های برق، سوخت دیزل و کود نیتروژن بیشترین منابع انتشار بودند (Azizpanah *et al.*, 2023). در یک بررسی مصرف نهاده‌های برق، کود نیتروژن و فسفات و ماشین‌های زراعی مهم‌ترین منابع آلاینده‌گی از پتانسیل گرمایش جهانی معرفی شدند. در تحقیقی در مزارع کلزا مقدار انتشار دی‌اکسید کربن، اکسید نیتروژن و متان به ترتیب ۷۳۱/۹۷، ۰/۰۸ و ۱/۰۶ کیلوگرم در هکتار و کم‌تر از میزان انتشارات گازهای گلخانه‌ای نتایج حاصل از این تحقیق بود (Shahhoseini *et al.*, 2023).

جدول ۴- انتشار گازهای گلخانه‌ای (کیلوگرم در هکتار) نهاده‌های شیمیایی و پتانسیل گرمایش جهانی آنها در حالت مرسوم.

Table 4- Greenhouse gas emissions (kg ha⁻¹) of chemical inputs and their global warming potential in the conventional system.

نهاده‌ها Inputs	واحد unit	دی‌اکسید کربن CO ₂	اکسید نیتروژن N ₂ O	متان CH ₄	پتانسیل گرمایش جهانی GWP (kg CO ₂ eq)	درصد پتانسیل گرمایش جهانی % of GWP
سوخت دیزل Diesel fuel	لیتر L	437.84	0.861	0.639	718.16	13.848
کود نیتروژن Nitrogen fertilizer	کیلوگرم kg	561.16	0.0054	0.669	576.91	11.124
کود فسفر Phosphorus fertilizer	کیلوگرم kg	120.96	0.0024	0.217	126.28	2.435
کود پتاسیم Potassium fertilizer	کیلوگرم kg	42	0.0006	0.061	43.44	0.837
علف کش Herbicide (kg)	لیتر L	30.48	0.00011	5.97×10 ⁻⁵	30.52	0.589
الکتریسیته Electricity	کیلو وات ساعت kWh	80.78	11.64	0.0264	369.48	71.16
کل انتشار گازها Total emissions	-	1273.24	12.51	1.613	—	100
ضریب پتانسیل گرمایش جهانی GWP coefficient (CO ₂ equivalent)		1273.24	3878.68	32.88	—	—

مقادیر ذخیره شده نهاده‌ها با استفاده از مدل‌های

CRS و VRS

جدول (۶) مقادیر ذخیره شده نهاده‌ها را با استفاده از دو مدل تحلیل پوششی داده‌ها یعنی مدل بازده متغیر نسبت به مقیاس Variable Returns to Scale (VRS) و مدل بازده ثابت نسبت به مقیاس (CRS) Constant Returns to Scale نشان می‌دهد. این مقادیر بیانگر میزان صرفه جویی یا کاهش مصرف نهاده‌ها در صورت حرکت واحدهای تولیدی به سمت مرز کارایی هستند. مقایسه نتایج دو مدل نشان می‌دهد که در اغلب نهاده‌ها، مقادیر ذخیره شده در مدل VRS بیشتر از مدل CRS بوده است، موضوعی که بیانگر انعطاف پذیری بیشتر مدل VRS در ارزیابی کارایی و شناسایی ناکارایی‌های مدیریتی در واحدهای تولیدی است. بر اساس نتایج جدول (۶)، در مدل VRS بیشترین مقدار ذخیره مربوط به انرژی مصرفی نیروی انسانی با مجموع

۳۳۱/۸۹ و میانگین ۶۱/۱۴ بوده است. پس از آن، انرژی ماشین‌آلات با مجموع ۷/۱۷، مصرف برق با مجموع ۱۱۸۱/۲۱ و میانگین ۹۹/۷۲ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهند که مدیریت عملیات مزرعه، ساعت کار استفاده از نیروی انسانی و استفاده از ماشین‌آلات از مهم‌ترین عوامل ایجاد اتلاف انرژی و نهاده در سیستم تولید بوده‌اند. همچنین مقدار ذخیره در مصرف کود دامی ۱۵۸۹/۱۵، سموم آفت کش ۲/۸۵ بیانگر آن است که بخشی از نهاده‌های شیمیایی نیز بیش از مقدار بهینه مصرف شده‌اند و امکان کاهش مصرف بدون افت عملکرد وجود دارد. در مقابل، مقادیر ذخیره شده در مدل CRS به طور محسوسی کمتر از مدل VRS است. برای مثال، مجموع ذخیره انرژی نیروی انسانی در مدل CRS برابر ۴۲۵/۶۸ و میانگین آن ۱۰۸/۳۶ بوده که نسبت به مدل VRS اختلاف قابل توجهی دارد. از نظر نهاده‌های انرژی‌بر، اختلاف دو مدل در مصرف سوخت دیزل نیز قابل توجه است؛ به طوری که

کیلوگرم کربن در هکتار گزارش شده است. ثابت ماندن کربن خروجی نشان می‌دهد که اجرای الگوی بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها بدون کاهش عملکرد تولید صورت گرفته و سطح تولید محصول حفظ شده است. این موضوع از دیدگاه پایداری بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا هدف اصلی در بهینه‌سازی، کاهش مصرف منابع و آلاینده‌ها بدون افت عملکرد اقتصادی و تولیدی است. در مقابل، مقدار کربن ورودی از ۱۴۰۰/۱۷ کیلوگرم کربن در هکتار در حالت مرسوم به ۱۱۴۷/۴۸ کیلوگرم کربن در هکتار در حالت بهینه کاهش یافته است. این کاهش نشان می‌دهد که با مدیریت صحیح نهاده‌ها، به‌ویژه مصرف سوخت، کودهای شیمیایی، ماشین‌آلات و سایر نهاده‌های انرژی‌بر، می‌توان میزان انتشار کربن و اثرات زیست‌محیطی تولید را به طور محسوسی کاهش داد. همچنین مقدار کربن خالص از ۲۵۶۲۳/۸۷ به ۲۵۸۷۶/۵۵ کیلوگرم کربن در هکتار افزایش یافته است.

مقدار ذخیره سوخت دیزل در مدل VRS برابر ۹۶/۰۹ و در مدل CRS برابر ۹۸/۲۵ گزارش شده است. این موضوع نشان می‌دهد که مدیریت بهینه عملیات ماشینی، کاهش تردهای غیرضروری و استفاده مناسب از تجهیزات می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف سوخت و هزینه‌های تولید داشته باشد (Naderi *et al.*, 2018). همچنین کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی نظیر علف‌کش، آفت‌کش و کود دامی علاوه بر کاهش هزینه‌ها، موجب کاهش پیامدهای زیست‌محیطی و انتشار آلاینده‌ها خواهد شد. در باغات گیلان در مدل CRS معادل ۶۲۴۷/۷ مگاژول و میانگین ۴۳۰/۰۱ مگاژول بر هکتار انرژی قابل ذخیره بود (Meftahi *et al.*, 2025). شکل (۳) مقادیر محتوای کربن و شاخص پایداری تولید کدوی سبز را در دو حالت مرسوم (Conventional) و بهینه‌شده (Optimized) بر اساس مدل VRS نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، میزان کربن خروجی در هر دو حالت برابر با ۲۷۰۲۴/۰۴

جدول ۵- انتشار گازهای گلخانه‌ای نهاده‌های شیمیایی و پتانسیل گرمایش جهانی آنها در حالت بهینه.

Table 5. Greenhouse gas emissions (kg ha⁻¹) of chemical inputs and their global warming potential under the optimized condition.

درصد پتانسیل گرمایش جهانی % of GWP	پتانسیل گرمایش جهانی GWP (kg CO ₂ eq)	متان CH ₄	اکسید نیتروژن N ₂ O	دی‌اکسید کربن CO ₂	واحد unit	نهاده‌ها Inputs
8.86	376.57	0.5038	0.0678	344.96	لیتر L	سوخت دیزل Diesel fuel
8.15	346.65	0.4024	0.0032	337.18	کیلوگرم kg	کود نیتروژن Nitrogen fertilizer
2.63	111.89	0.1929	0.0021	107.17	کیلوگرم kg	کود فسفر Phosphorus fertilizer
0.79	33.81	0.0466	0.0004	32.67	کیلوگرم kg	کود پتاسیم Potassium fertilizer
0.49	21.04	4.12×10 ⁻⁵	8.21×10 ⁻⁵	21.02	لیتر L	علف کش Herbicide (kg)
79.05	3359.99	0.0241	10.59	73.54	کیلو وات ساعت kWh	الکتریسیته Electricity
100	-	1.16	10.67	916.54	-	کل انتشار گازها Total emissions
—	—	24.56	3308.81	916.54	-	ضریب پتانسیل گرمایش جهانی GWP coefficient (CO ₂ equivalent)

جدول ۶- مقادیر ذخیره شده نهاده‌ها با استفاده از مدل‌های VRS و CRS بر حسب (مگاژول در هکتار).

Table 6. Amount of Saved Inputs Using VRS and CRS Models (MJ ha⁻¹).

Total جمع کل	Electricity الکتریسیته	Phosphate Fertilizer کود فسفر	Potassium Fertilizer کود پتاسیم	Manure کود دامی	Nitrogen Fertilizer کود نیتروژن	Diesel Fuel سوخت دیزل	Machinery ماشین آلات	Human Labor نیروی انسانی	Analysis Model تحلیل مدل	Total
3244.72	1181.21	72.25	13.32	1589.15	2.85	96.09	7.71	331.89	VRS	Total
341.42	99.72	12.23	6.65	52.92	0.66	16.25	2.21	146.91	VRS	Average
3125.34	1056	85.59	12.98	1416.36	2.26	98.35	11.35	425.68	CRS	Total
249.56	48.35	11.19	3.35	52.98	0.61	17.36	3.87	108.36	CRS	Average

شناسایی الگوی بهینه مصرف نهاده‌ها و کاهش اثرات زیست‌محیطی بخش کشاورزی نشان می‌دهد. در تحقیقی مشابه در آبادان شاخص پایداری برای تولید گندم ۲/۴۵ و برای تولید کلزا ۱/۱۷ گزارش شد (Khodaei joghan *et al.*, 2022). کارایی مصرف کربن و شاخص پایداری برای نظام زراعی تولید کلزا در شهرستان کلالة به ترتیب ۴/۷۹ و ۳/۷۹ بود که نشان دهنده پایداری محیطی مناسب نظام زراعی تولید کلزا در این شهرستان است (Shahhoseini *et al.*, 2023). در تحقیقی دیگر میزان کارایی مصرف کربن در تولید گیلاس به روش مرسوم برابر ۲۰/۵۲ و به روش بهینه برابر ۳۱/۹۶ محاسبه شد (Meftahi *et al.*, 2025). به طور کلی، نتایج جدول نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها بر اساس مدل VRS می‌تواند ضمن حفظ سطح تولید، موجب کاهش ورودی‌های کربنی، افزایش کارایی کربن، بهبود شاخص پایداری و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی در تولید کدوی سبز در منطقه شود.

تحلیل پوششی داده‌ها

نتایج حاصل از ارزیابی کارایی انرژی مزارع کدوسبز با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌ها DEA و فرض بازده متغیر نسبت به مقیاس VRS در جدول (۷) ارائه

افزایش کربن خالص نشان می‌دهد که سهم کربن تثبیت‌شده در محصول نسبت به کربن مصرفی بیشتر شده و سیستم تولید در حالت بهینه توانسته عملکرد زیست‌محیطی مطلوب‌تری داشته باشد و تولیدکننده با مصرف منابع کمتر می‌تواند همان میزان تولید را حفظ کند و در نتیجه بازده کربنی سامانه افزایش یافته است. شاخص کارایی کربن نیز از ۱۹/۳۱ در حالت مرسوم به ۲۳/۵۶ در حالت بهینه افزایش یافته است. این شاخص نشان می‌دهد که به ازای هر واحد کربن مصرفی، مقدار بیشتری محصول یا کربن خروجی تولید شده است. افزایش این شاخص بیانگر بهبود بهره‌وری مصرف نهاده‌ها و کاهش شدت انتشار کربن در فرایند تولید است. در واقع، سامانه تولید در شرایط بهینه توانسته با مصرف کربن کمتر، کارایی بیشتری ایجاد کند. علاوه بر این، شاخص پایداری از ۱۸/۳۵ به ۲۲/۵۵ افزایش یافته است که بیانگر بهبود پایداری سیستم تولید در اثر اجرای الگوی بهینه است. افزایش شاخص پایداری نشان می‌دهد که سامانه تولید از نظر مصرف منابع، انتشار آلاینده‌ها و حفظ عملکرد، به سمت شرایط پایدارتر حرکت کرده است. این موضوع اهمیت استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها DEA و مدل VRS را در

شده است. بر اساس نتایج، از مجموع ۳۰ واحد مورد بررسی، ۱۶ واحد دارای کارایی فنی کامل (۱۰۰ درصد) و ۱۴ واحد دارای کارایی فنی کمتر از یک بودند. به عبارت دیگر، ۵۳/۳۴ درصد از واحدها بر روی مرز کارایی قرار داشته و ۴۶/۶۶ درصد از مزارع با درجات متفاوتی از ناکارایی فنی مواجه بودند.



شکل ۳- محتوای کربن و شاخص پایداری تولید کدوسبز در حالت مرسوم و بهینه‌سازی شده بر اساس مدل VRS.
Figure 3. Carbon Content and Sustainability Index of Zucchini Production under Conventional and Optimized Conditions Based on the VRS Model.

کارایی کمتر از یک بودند؛ به‌طوری‌که ۷۳/۳۴ درصد از واحدها کارا و ۲۶/۶۶ درصد آن‌ها دارای درجاتی از ناکارایی مدیریتی بودند. بالاتر بودن تعداد واحدهای کارا در کارایی فنی خالص نسبت به کارایی فنی نشان می‌دهد که بخشی از ناکارایی مشاهده‌شده در مزارع ناشی از مقیاس تولید بوده و ضعف مدیریت مزرعه نمی‌باشد. به عبارت دیگر، برخی از بهره‌برداران از نظر نحوه مصرف نهاده‌ها عملکرد مناسبی داشته‌اند، اما به دلیل فعالیت در مقیاسی غیر بهینه نتوانسته‌اند به کارایی فنی کامل دست یابند. میانگین کارایی فنی خالص مزارع ناکارا در مدل VRS برابر با ۹۷/۳۶ درصد بود. این نتیجه نشان می‌دهد که مزارع ناکارا با بهبود مدیریت تولید و تخصیص بهینه نهاده‌ها می‌توانند ضمن حفظ سطح تولید، تنها با ۹۷/۳۶ درصد از نهاده‌های فعلی به مرز کارایی دست یافته و حدود ۲/۴ درصد از نهاده‌های مصرفی را صرفه‌جویی کنند. بنابراین، ارتقای دانش مدیریتی بهره‌برداران، بهبود برنامه‌ریزی مصرف نهاده‌ها و استفاده از توصیه‌های فنی می‌تواند نقش مهمی در افزایش کارایی انرژی و پایداری تولید کدوسبز ایفا کند.

این موضوع نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از مزارع هنوز از تمامی ظرفیت‌های موجود برای استفاده بهینه از نهاده‌ها بهره‌برداری نکرده‌اند و امکان کاهش مصرف نهاده‌ها بدون افت عملکرد وجود دارد. برای نمونه، کارایی فنی واحد شماره ۱۵ برابر با ۸۸/۲۴ درصد برآورد شد که بیانگر آن است که این واحد می‌تواند بدون کاهش در میزان تولید، مصرف تمامی نهاده‌های خود را به میزان ۱۱/۷۶ درصد کاهش داده و به مرز کارایی دست یابد. چنین وضعیتی می‌تواند ناشی از مدیریت نامناسب مصرف نهاده‌ها، استفاده بیش از حد از منابع انرژی بر و یا عدم به‌کارگیری الگوهای بهینه تولید باشد. میانگین کارایی واحدهای ناکارا نیز ۹۲/۷۵ درصد به دست آمد که نشان می‌دهد این واحدها به طور متوسط قادرند با حفظ سطح تولید فعلی، حدود ۷/۲۵ درصد از نهاده‌های مصرفی خود را صرفه‌جویی کنند. این میزان صرفه‌جویی بیانگر ظرفیت قابل توجه برای ارتقای بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های تولید در مزارع کدوسبز منطقه مورد مطالعه است. در بررسی کارایی فنی خالص تحت مدل VRS، تعداد ۲۲ واحد از ۳۰ مزرعه دارای کارایی فنی خالص کامل و ۸ واحد دارای

جدول ۷. ارزیابی مزارع کدو سبز با واحدهای مرجع از طریق مدل CCR ورودی محور.

Table 7. Evaluation of zucchini farms with reference units through the input-driven CCR model.

واحد تولیدی DMU	رتبه Rank	کارایی فنی (درصد) CRS Efficiency (%)	کارایی فنی خالص VRS (%)	کارایی مقیاس ES (%)	بازده نسبت به مقیاس Return to scale (RTS)
dmu:1	24	95.33	99.69	95.62	Irs
dmu:2	25	94.29	98.29	95.93	Irs
dmu:3	29	90.96	96.83	93.94	Irs
dmu:4	1	100	100	100	Crs
dmu:5	1	100	100	100	Crs
dmu:6	28	94.74	97.19	97.48	Irs
dmu:7	23	79.70	100	79.70	Irs
dmu:8	30	90.95	93.76	97.01	Irs
dmu:9	1	100	100	100	Crs
dmu:10	21	88.78	100	88.78	Irs
dmu:11	1	100	100	100	Crs
dmu:12	17	98.49	100	98.49	Irs
dmu:13	18	97.95	100	97.95	Irs
dmu:14	20	91.7	100	91.7	Irs
dmu:15	22	88.24	100	88.24	Irs
dmu:16	27	89.81	97.85	91.76	Irs
dmu:17	26	100	97.91	100	Irs
dmu:18	1	100	100	100	Crs
dmu:19	1	100	100	100	Crs
dmu:20	1	99.56	100	99.56	Irs
dmu:21	1	100	100	100	Crs
dmu:22	1	100	100	100	Crs
dmu:23	1	100	100	100	Crs
dmu:24	1	100	100	100	Crs
dmu:25	1	100	100	100	Crs
dmu:26	19	98.01	100	98.01	Irs
dmu:27	1	100	100	100	Crs
dmu:28	1	100	100	100	Crs
dmu:29	1	100	100	100	Crs
dmu:30	1	100	100	100	Crs
Average	-	96.61	99.38	97.21	-
میانگین					

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تولید کدو سبز در منطقه دزفول به میزان قابل توجهی تحت تأثیر نحوه مدیریت نهاده‌های مصرفی قرار دارد و بخش عمده انرژی مصرفی به نهاده‌هایی نظیر الکتریسیته، کودهای شیمیایی و سوخت‌های فسیلی اختصاص می‌یابد. بررسی ساختار مصرف انرژی بیانگر آن است که بهبود مدیریت این نهاده‌ها می‌تواند نقش مؤثری در افزایش کارایی انرژی، کاهش اتلاف منابع و ارتقای بهره‌وری سیستم تولید داشته باشد. به‌کارگیری روش تحلیل پوششی داده‌ها برای تعیین الگوی بهینه مصرف نهاده‌ها نشان داد که

امکان کاهش مصرف بسیاری از نهاده‌های انرژی بر بدون افت عملکرد محصول وجود دارد. اجرای الگوی بهینه سبب بهبود شاخص‌های انرژی از جمله افزایش بازده و نسبت انرژی، افزایش انرژی خالص گردید که همگی بیانگر ارتقای کارایی فنی و اقتصادی سامانه تولید هستند. نتایج تحقیق نشان داد که بخش قابل توجهی از ناکارایی موجود در مزارع ناشی از مدیریت نامناسب نهاده‌ها بوده و با اتخاذ راهکارهای مدیریتی مناسب می‌توان به سطح بالاتری از بهره‌وری دست یافت. ارزیابی اثرات زیست‌محیطی نشان داد که مصرف الکتریسیته، سوخت دیزل و کود نیتروژنه از مهم‌ترین عوامل انتشار

می‌توان اثرات منفی زیست‌محیطی را کاهش داده و به سمت کشاورزی پایدار حرکت کرد. نتایج تحلیل کارایی مزارع نیز نشان داد که بخشی از واحدهای تولیدی هنوز با مرز کارایی فاصله دارند و ظرفیت قابل توجهی برای صرفه‌جویی در مصرف نهاده‌ها و کاهش هزینه‌های تولید وجود دارد.

گازهای گلخانه‌ای و افزایش پتانسیل گرمایش جهانی در تولید کدو سبز هستند. بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها موجب کاهش انتشار آلاینده‌ها، کاهش وابستگی به منابع انرژی فسیلی و بهبود عملکرد زیست‌محیطی سامانه تولید شد. همچنین افزایش کارایی کربن و شاخص پایداری بیانگر آن است که با حفظ سطح تولید،

References

- Ashs. (2017). Yellow Squash and Zucchini Cultivar Evaluation in Georgia. *HortTechnology*, 27(2), 296-302. <https://doi.org/10.21273/Horttech03605-16>
- Asgharipour, M. R., Mondani, F., & Riahinia, S. (2012). Energy use efficiency and economic analysis of sugar beet production system in Iran: A case study in Khorasan Razavi province. *Energy*, 44(1), 1078-1084. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.023>
- Azarpour, E., Mehr, S. A., Moraditochae, M., & Bozorgi, H. R. (2013). Evaluation green house gases and energy of pumpkin production in the north of Iran. *International Journal of Biosciences*, 182-190. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/3.8.182-190>
- Azizpanah, A. and Namdari, M. (2020). Investigation of Greenhouse Gas Emissions, Modelling Energy and Cost Analysis of White Radish Production in West of Iran. *Journal of Vegetables Sciences*, 4(7), 161-175. <http://dx.doi.org/10.22034/iuvs.2020.124455.1091>
- Azizpanah, A., Pourmusi, M., & Taki, M. (2023). Eco-environmental and sustainability evaluation of cucumber and sunflower productions in Iran. *Total Environment Research Themes*, 6, 100037. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100037>
- Babaeian, M., Kheirikhah, M., Ghorbanzadeh, M., Jafarian, M. (2021). Environmental hazards and energy flow in rapeseed agroecosystem. Case study: North Khorasan. *Journal of Agricultural Sciences and Sustainable Production*, 31(4), 325-339. (In Persian)
- Bakhtiari, A. A., Hematian, A., & Sharifi, A. (2015). Energy analyses and greenhouse gas emissions assessment for saffron production cycle. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(20), 16184-16201. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4843-6>
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2007). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-Solver software* (2nd ed.). Springer.
- Fartout Enayat, F., Mousavinik, S. M., & Asgharipour, M. R. (2017). Evaluation of energy use efficiency, greenhouse gas emissions and economic analysis of Sorghum production in Sistan. *Journal of Agricultural science and sustainable production*, 27(3), 33-43.
- Heydarizadeh, A., Azizpanah, A., Kohi, S., & Taki, M. (2026). Energy optimization and life cycle environmental impacts of alfalfa production in Iran: a DEA-LCA approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 28(3), 59. <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03349-9>
- Hesampour, R., Hassani, M., Hanafiah, M. M., & Heidarbeigi, K. (2022). Technical efficiency, sensitivity analysis and economic assessment applying data envelopment analysis approach: A case study of date production in Khuzestan State of Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(3), 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.08.003>

- Hossein, H. Y., Azizpanah, A., Namdari, M., & Shirkhani, H. (2024). Environmental life cycle assessment of corn production in tropical regions. *Scientific Reports*, 14(1), 20036. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70923-4>
- Kheiralipour, K. (2022). Sustainable Production: Definitions, Aspects, and Elements, 1st ed. Nova Science Publishers, New York, US.
- Khodaei Joghani, A., Taki, M., Matorian, H. (2022). Evaluating energy productivity, greenhouse gas emission, global warming potential and sustainability index of Wheat and Rapeseed agroecosystems in Khorramshahr. *Journal of Agricultural Sciences and Sustainable Production*, 32(1), 309-324. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.44507.2634>
- Khoshnevisan, B., Rafiee, Sh., Omid, M. & Mousazadeh, H. (2013). Applying data envelopment Analysis approach to improve energy efficiency and reduce GHG (greenhouse gas) emission of wheat production. *Energy*, 58, 588-593. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.030>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change, *Geoderma*. 123: 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Meftahi, F., Azizpanah, A., & Taki, M. (2025). Sustainable agricultural practices and their impact on ecological indicators: A case study of cherry production in Iran. *Sustainable Futures*, 10, 101149. <https://doi.org/10.1016/j.sfsr.2025.101149>
- Mirzaei, A., Layani, G., Azarm, H., & Jamshidi, S. (2018). Determination of optimal crop pattern of Sirjan county central part based on stability of water resources and environmental. *Journal of Agricultural Economics Research*, 9(4), 283-303. (In Persian).
- <https://doi.org/20.1001.1.20086407.1396.9.36.14.5>
- Nabavi-Pelesaraei, A., Pakravan-Charvadeh, M. R., & Ghasemi-Mobtaker, H. (2022). Predicting output energy and greenhouse gas emissions in peanut production: A case study in Astaneh-Ashrafiyeh county of Guilan province. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 53(1): 145-168. (in Persian) <https://doi.org/10.22059/IJAEDR.2021.306056.668924>
- Naderi, S. A., Lotfalian, D. A., & Taki, M. (2018). Selection of the best type of structure for greenhouse bell pepper cultivation by data envelopment analysis. *Journal of Agricultural Machinery Research*, 8 (2) ,53-62. (in Persian).
- Nikkhah, A., Emadi, B., Shabanian, F., & Hamzeh-Kalkenari, H. (2014). Energy sensitivity analysis and greenhouse gas emissions for tea production in Guilan province. *Journal of Agroecology*, 6(3), 622-633. <https://doi.org/10.22067/jag.v6i3.29852>
- omidmehr, Z. (2019). Comparison of Energy Productivity and Global Warming Potential in Rain-fed Sunflower (*Helianthus annuus L.*) Production Systems, *Journal Of Agroecology*, 11(2), 739-755. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jag.v11i2.49739>
- Ramedani, Z., Lotfi, M., Veisi, A., & Kheiralipour, K. (2024). Comparison of material and energy indicators in sunflower and pumpkin seed production systems. *Sustainability Research: Technology Development and Assessment*. <https://doi.org/10.22098/sr.2024.14811.1020>
- Rastegar, H., Lotfalian Dehkordi, A., Abedi, A., & Taki, M. (2020). Application of Data Envelopment Analysis (DEA) In Order to Reduction of Consumption Inputs in Silage Corn production in the Shahrekord County. *Iranian Journal of*

- Biosystems Engineering*, 51(2), 247-261. (in Persian).
<https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.297972.665278>
- Rostami, H., Azizpanah, A., Fathi, R., & Taki, M. (2025). Comparative analysis of environmental impact and energy consumption in sesame and mung bean production using life cycle assessment and data envelopment analysis. *Energy Nexus*, 17, 100397.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100397>
- Saidi, K., Namdari, M., and Yousefi, A. (2025). Comparative Analysis of Conventional and MFCA Methods for Assessing Energy and Economic Efficiency of Tomato Production in Nahavand County. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 55(4), 45-62. (In Persian)
<https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388967.665582>
- Sarkar, B., Das, B., Sundaram, P. K., Mali, S. S., Anurag, A. P., Upadhyaya, A., ... & Kumar, A. (2023). Energy input-output analysis and greenhouse gas emission in okra and tomato production in Chotanagpur plateau region of India: B. Sarkar et al. *Environment, Development and Sustainability*, 25(11), 12945-12964.
<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02596-w>
- Sefeedpari, P., Shokoohi, Z., & Behzadifar, Y. (2014). Energy use and carbon dioxide emission analysis in sugarcane farms: a survey on Haft-Tappeh Sugarcane Agro-Industrial Company in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 83, 212-219.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.048>
- Shahhoseini, H. R., Lotfi, S., Kazemi, H., & Kamkar, B. (2023). Evaluating the sustainability of canola agroecosystems using energy analysis, carbon footprint, and greenhouse gases, 159-171.
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.76465.1168>
- Sharifi, M., Soodmand-Moghaddam, S. and Akram, A. (2021). Investigating the Energy Consumption and Environmental Pollutants of Pumpkin Production (Case Study: Boroujerd County). *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 52(1), 27-36. (In Persian)
<https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.302359.665306>
- Snyder, C., Bruulsema, T., Jensen, T., & Fixen, P., (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 133, 247-266.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>
- Taki, M., Soheili-Fard, F., Rohani, A., Chen, G., & Yildizhan, H. (2018). Life cycle assessment to compare the environmental impacts of different wheat production systems. *Journal of Cleaner Production*, 197, 195-207.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.173>
- Wang, M. H., Rykalina, O., Borzunova, T., Kolobov, E., & Takhumova, O. (2025). Eco-integrated agriculture: Merging environmental sustainability and energy efficiency in the modern agro-production complex. *E3S Web of Conferences*, 633, 02002.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202563302002>
- Yousefi, M., Khoramivafa, M., and Mondani, F. (2014). Integrated evaluation of energy use, greenhouse gas emissions and global warming potential for sugar beet (*Beta vulgaris* L.) agroecosystems in Iran. *Atmospheric Environment*, 92: 501-505.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.050>