



Comparative Analysis of Conventional and MFCA Methods for Assessing Energy and Economic Efficiency of Tomato Production in Nahavand County

Kambiz Saidi¹ | Majid Namdari² | Alireza Yousefi³

1. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail:

saidikambiz@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: namdari@znu.ac.ir

3. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail:

yousefi.alireza@znu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Jan. 18, 2025

Revised: March. 15, 2025

Accepted: Apr. 5, 2025

Published online: Winter 2025

Keywords:

Efficiency,

Energy ratio,

Profit to cost ratio,

Energy input-output.

ABSTRACT

Agriculture, as a major energy consumer, requires innovative approaches to enhance efficiency. This study analyzes the energy and economic aspects of tomato production in Nahavand County using conventional methods and Material Flow Cost Accounting (MFCA). Negative energy, representing wasted energy in production, was a key indicator in efficiency analysis. Results showed an average energy input of 168,945 MJ per hectare, with a positive output of 208,213 MJ ha⁻¹ and a negative output of 38,888 MJ ha⁻¹. Electricity and chemical fertilizers accounted for 68% and 21% of total energy input, respectively. Findings highlight the importance of considering waste and negative energy. MFCA, incorporating environmental costs and waste, revealed a 19% lower energy efficiency than conventional methods. Moreover, tomato losses, comprising 80% of negative outputs, were the largest energy waste factor. Proposed solutions include modern equipment, precise harvest management, integrated pest and disease management, and smart irrigation technologies. Economic analysis also showed a significant difference in gross return between methods. These results suggest that MFCA is an effective tool for improving efficiency and reducing environmental impacts in agriculture, offering practical strategies for sustainable development. This research provides a basis for informed decision-making in optimizing resource and energy use. Extensive energy subsidies in Iran have reduced incentives for energy efficiency improvements, posing a challenge to sustainability efforts. Addressing this issue requires further research to develop policies that promote optimal energy consumption in agricultural production.

Cite this article: Saidi, K., Namdari, M., & 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 Biosystem Engineering*, 55 (4),45-62. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388967.665582>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388967.665582>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Agricultural systems constitute significant contributors to global energy consumption, both directly and indirectly, exerting considerable influence on environmental sustainability. Within tomato production, energy demands encompass the entire production cycle, extending from pre-planting activities to post-harvest management. Achieving efficient energy utilization is paramount for minimizing input costs and mitigating environmental impacts. However, inefficiencies inherent in conventional agricultural practices often lead to resource wastage and economic losses. Material Flow Cost Accounting (MFCA), as outlined in ISO 14051 standards, provides a structured framework for identifying and quantifying these inefficiencies. By meticulously evaluating material and energy flows, MFCA facilitates informed decision-making processes aimed at minimizing resource wastage, optimizing input utilization, and enhancing economic viability. This study integrates MFCA with conventional energy and economic analyses to comprehensively investigate energy efficiency and identify cost-saving strategies within the context of tomato production in Nahavand, Hamedan Province, Iran. The findings of this research are anticipated to contribute significantly to the advancement of sustainable agricultural development by effectively addressing inefficiencies and promoting optimal resource utilization.

Purpose

The primary objective of this research is to conduct a comprehensive evaluation of energy consumption and perform a rigorous economic analysis of open field tomato production in Nahavand, Hamedan Province, utilizing both traditional accounting methods and the MFCA framework. This study endeavors to identify critical material flows and their associated costs to uncover potential opportunities for resource optimization, enhance overall productivity, and mitigate environmental impacts. Furthermore, the findings of this research are intended to provide practical and actionable strategies for enhancing energy efficiency and achieving sustainable development goals within the context of tomato production.

Method

The study employs a mixed methodology combining energy analysis, MFCA based on ISO 14051 standards, and economic evaluations. A total of 92 farms were analyzed, determined using Cochran's sample size formula for statistical representation. The study's boundaries were defined from farm input entry to the output gate (gate-to-gate approach), including seedling preparation. Input and output flows, both positive (e.g., tomato yield) and negative (e.g., waste, emissions), were quantified for four key stages of production: pre-planting, planting, cultivation, and harvesting. Energy coefficients for each input and output were applied using recognized scientific references. Negative outputs such as fertilizer emissions and water losses were estimated using IPCC guidelines, while energy performance indicators and economic metrics were computed using established formulas.

Results

The mean energy input for tomato production was 168,945 MJ/ha, with positive and negative energy outputs recorded at 208,213 MJ/ha and 38,888 MJ/ha, respectively. Electrical energy dominated inputs, contributing approximately 68% (115,168 MJ/ha) of total input energy, followed by chemical fertilizers at 21% (34,665 MJ/ha). Inefficient water pumps, deep wells, and long water transfer distances were primary drivers of high electricity consumption. Negative energy outputs primarily arose from tomato waste (80.3%, 31,234 MJ/ha), nitrate leaching (12.3%, 4,787 MJ/ha), and irrigation water loss (4.5%, 1,760 MJ/ha). Compared to previous studies, the energy inputs per hectare for tomato farming in this region were notably higher, attributed to intensive resource use.

Economic evaluations revealed significant opportunities for cost savings and resource optimization. MFCA identified critical inefficiencies, particularly related to water and fertilizer management. Targeted interventions such as improving irrigation systems, optimizing fertilizer application, and adopting advanced crop management techniques can substantially mitigate resource waste and improve economic viability.

Conclusion

This study unequivocally demonstrates the utility of integrating energy and economic analyses with the MFCA framework to enhance resource efficiency and promote sustainability within the context of tomato production. The results of this research highlight the critical role of electricity and fertilizers as key drivers of input energy consumption. The implementation of effective waste management strategies, such as optimizing harvest timing, employing improved equipment, and providing comprehensive worker training, can

significantly reduce production losses. Furthermore, the adoption of integrated water and nutrient management practices will not only decrease energy inputs and mitigate environmental footprints but also ensure enhanced profitability. The insights derived from this study can be effectively utilized by policymakers and agricultural practitioners to promote sustainable agricultural practices, ensuring alignment with global sustainability standards such as ISO 14051. These findings underscore the significant potential of employing systematic approaches to improve resource efficiency, reduce costs, and support the sustainable development of agricultural systems in Iran and beyond.

Author Contributions

Conceptualization, M.N. and A.Y.; methodology, M.N. and K.S.; software, M.N.; validation, M.N., K.S. and A.Y.; formal analysis, M.N. and K.S.; investigation, M.N. and K.S.; resources, M.N.; data curation, M.N. and K.S.; writing-original draft preparation, M.N.; writing-review and editing, M.N.; visualization, M.N.; supervision, M.N. and A.Y.; project administration, M.N. and A.Y.; funding acquisition, M.N., A.Y. and K.S.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support provided by the University of Zanjan, which contributed significantly to the completion of this study.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the University of ABCD (Ethical code: IR.UT.RES.2024.500). The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

تحلیل مقایسه‌ای روش‌های حسابداری مرسوم و MFCA برای ارزیابی بهره‌وری انرژی و اقتصادی در تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان نهاوند

کامبیز سعیدی^۱ | مجید نامداری^۲ | علی رضا یوسفی^۳

۱. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: saidikambiz@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: namdari@znu.ac.ir

۳. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: yousefi.alireza@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	کشاورزی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی، نیازمند روش‌های نوین برای بهبود کارایی است. این پژوهش به تحلیل انرژی و اقتصادی تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان نهاوند با استفاده از روش‌های مرسوم و حسابداری هزینه جریان مواد (MFCA) می‌پردازد. در این مطالعه، مفهوم انرژی منفی، که بیانگر انرژی تلف‌شده در فرآیند تولید است، بررسی شد. نتایج نشان داد که میانگین انرژی ورودی به ازای هر هکتار ۱۶۸۹۴۵ مگاژول و خروجی مثبت ۲۰۸۲۱۳ مگاژول است، در حالی که خروجی منفی برابر با ۳۸۸۸۸ مگاژول محاسبه شد. برق و کودهای شیمیایی به ترتیب ۶۸ و ۲۱ درصد از کل ورودی انرژی را تشکیل دادند. یافته‌های پژوهش نشان داد لحاظ کردن ضایعات و انرژی منفی اهمیت بالایی دارد. روش MFCA با در نظر گرفتن هزینه‌های محیط‌زیستی، کاهش ۱۹ درصدی بازده انرژی نسبت به روش‌های مرسوم را نشان داد. همچنین، تلفات گوجه‌فرنگی با ۸۰ درصد سهم از خروجی‌های منفی، بزرگ‌ترین عامل هدررفت انرژی بود. راهکارهای پیشنهادی شامل استفاده از تجهیزات مدرن، مدیریت دقیق برداشت، مدیریت تلفیقی آفات و بیماری‌ها، و به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند برای آبیاری است. تحلیل اقتصادی نیز تفاوت قابل توجهی را در سود ناخالص بین دو روش محاسباتی نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که MFCA ابزاری مؤثر برای بهبود بهره‌وری و کاهش اثرات محیط‌زیستی در کشاورزی است و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه در بهینه‌سازی مصرف منابع باشد. تخصیص بارانه‌های انرژی در ایران، منجر به کاهش انگیزه در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی شده است. این موضوع به‌عنوان یک عامل بازدارنده در بهبود بهره‌وری انرژی، شایسته توجه و بررسی در مطالعات آتی می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۱۶	
تاریخ انتشار: زمستان ۱۴۰۳	
واژه‌های کلیدی: بهره‌وری، بازده انرژی، نسبت سود به هزینه، انرژی ورودی-خروجی	

استاد: سعیدی، کامبیز؛ نامداری، مجید؛ و یوسفی، علی‌رضا (۱۴۰۳). تحلیل مقایسه‌ای روش‌های حسابداری مرسوم و MFCA برای ارزیابی بهره‌وری انرژی و اقتصادی در تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان نهاوند، مجله مهندسی بیوسیستم ایران ایران، ۵۵ (۴)، ۴۵-۶۲.

<https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388967.665582>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388967.665582>

مقدمه

تولیدات کشاورزی با مصرف نهاده‌هایی از جمله سوخت، آب، برق، کودهای شیمیایی، سموم شیمیایی و نیروی کار انسانی به شدت به منابع مختلف انرژی وابسته است. از این رو تحلیل‌های انرژی و اقتصادی نقش بسیار مهمی در افزایش کارایی و پایداری تولیدات کشاورزی ایفا می‌کنند. از آنجایی که کشاورزی مصرف‌کننده عمده انرژی است، درک الگوهای مصرف انرژی و بهینه‌سازی آن می‌تواند منجر به بهبود قابل توجهی در بهره‌وری و صرفه‌جویی در هزینه‌ها شود (Yadav et al., 2024).

تحلیل الگوهای انرژی و اقتصادی در بخش کشاورزی می‌تواند به شناسایی فرصت‌های صرفه‌جویی در هزینه‌ها از طریق استفاده بهینه از منابع کمک کند (Elahi et al., 2022). روش‌های متداول ارزیابی انرژی و اقتصادی در کشاورزی، اغلب به ارزیابی‌های سنتی متکی هستند که ممکن است هزینه‌های محیط‌زیستی مرتبط با شیوه‌های کشاورزی را نادیده انگارند. این روش‌ها معمولاً بهره‌وری را بر اساس ورودی‌ها و خروجی‌ها یا عملکرد و درآمد ارزیابی می‌کنند، بدون آنکه دیدگاهی جامع از ورودی منابع و تولیدات غیرملموس مانند ضایعات یا انتشارات داشته باشند. در نتیجه، ممکن است به تصمیماتی منجر شوند که منافع کوتاه‌مدت را بر شیوه‌های پایدار ترجیح دهند. علاوه بر این، ارزیابی‌های متداول اغلب وابستگی متقابل بین عوامل مختلف تولید را نادیده می‌گیرند که می‌تواند ناکارآمدی‌ها را پنهان کرده و بهبود پایداری کلی را با مشکل مواجه سازد (Rodríguez et al., 2019; Hercher-Pasteur et al., 2020).

برای تجزیه و تحلیل موثر استفاده از انرژی و پیامدهای اقتصادی آن، روش‌های متعددی توسعه یافته است. یکی از روش‌های ارزیابی‌های تولید، روش حسابداری هزینه جریان مواد^۱ (MFCA) می‌باشد. حسابداری هزینه جریان مواد به عنوان یک ابزار قدرتمند در حوزه مدیریت هزینه و محیط زیست، امکان شناسایی دقیق و کمی‌سازی جریان مواد، انرژی و هزینه‌های مرتبط در فرآیندهای تولید را فراهم می‌آورد. با بهره‌گیری از این روش، می‌توان به تحلیل دقیق نقاط بحرانی در زنجیره ارزش پرداخته و با شناسایی منابع هدررفت، اقدامات اصلاحی مؤثری را جهت بهینه‌سازی مصرف منابع و کاهش ضایعات اتخاذ نمود. MFCA به عنوان یکی از اجزای کلیدی سیستم‌های مدیریت محیط‌زیستی^۲ (EMA)، با تلفیق جنبه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی، ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در راستای بهبود عملکرد و کاهش اثرات محیط‌زیستی واحدهای تولیدی به شمار می‌رود. این روش با ارائه یک چارچوب جامع و سازگار با استانداردهای بین‌المللی نظیر ISO 14051، به واحدهای تولیدی کمک می‌کند تا ضمن ارتقای بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها، به اهداف توسعه پایدار نیز دست یابند (ISO 14051, 2011; Dekamin et al., 2024).

MFCA داده‌های بینش‌داری را در رابطه با جنبه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی فرایندهای تولیدی ارائه می‌دهد. این روش به‌طور خاص بر اهمیت حسابداری صریح هزینه‌های ضایعات تأکید دارد که می‌تواند به طور قابل توجهی به هزینه‌های کلی متحمل شده توسط یک فرایند تولیدی کمک کند. این رویکرد نه تنها تصویر واضح‌تری از پیامدهای مالی ضایعات ارائه می‌دهد، بلکه از مدیریت کارآمد منابع برای همسو شدن با اهداف توسعه پایدار نیز حمایت می‌کند (Arum, 2023). ارزیابی جامع و سازگاری مداوم روش‌های انرژی در نهایت تاب‌آوری و پایداری کشاورزی را تقویت خواهد کرد (Kamyab et al., 2024).

کشت گوجه فرنگی در ایران نقش مهمی در چشم‌انداز کشاورزی ایفا می‌کند و به امنیت غذایی و اقتصاد کشور کمک می‌کند. گوجه فرنگی عمدتاً در شرایط محیطی متنوعی در سراسر ایران کشت می‌شود. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، در سال ۱۴۰۲، ایران با سطح زیر کشت ۷۳۵۵۹ هکتار و تولید ۳۳۶۷۵۹۹ تن گوجه فرنگی، یکی از تولیدکنندگان عمده این محصول در منطقه محسوب می‌شود (FAO, 2025). استان همدان با مساحت زیر کشت ۷۸۴ هکتار و تولید ۳۲۹۶۹ تن گوجه‌فرنگی در سال ۱۴۰۲ (طبق گزارش سازمان جهاد کشاورزی استان همدان)، یکی از قطب‌های مهم تولید این محصول در کشور است (MAJ, 2025).

تحلیل‌های انرژی و اقتصادی در مطالعات متعدد بر روی محصولات کشاورزی متنوعی از جمله گندم (Ghorbani et al., 2011)، یونجه (Mobtaker et al., 2012)، سیب‌زمینی (Zangeneh et al., 2011)، مرکبات (Mohammadshirazi et al., 2015)، سیب (Dilay et al., 2021)، و علوفه (Fathollahi et al., 2018) انجام شده است. تولید گوجه‌فرنگی نیز از این قاعده مستثنی نبوده و مطالعات مشابهی در ترکیه (Ozkan et al., 2011; Cetin and Vardar, 2008)، استان تهران (Heidari and Omid, 2011)، و اصفهان (Taki et al., 2013, Pahlavan et al., 2011) صورت گرفته است.

1. Material Flow Cost Accounting

2. Environmental Management Accounting

در حالی که مطالعات گسترده‌ای در زمینه کاربرد روش حسابداری هزینه جریان مواد (MFCA) در صنایع مختلف انجام شده است (Tran and Herzig, 2020)، استفاده از این روش در بخش کشاورزی هنوز محدود بوده و به عنوان یک رویکرد نوآورانه در این حوزه مطرح می‌شود. بیشتر مطالعاتی که از MFCA در کشاورزی استفاده کرده‌اند، بر روی محصولات همپون سیبزمینی (دکامین، ۱۴۰۰)، کلزا (دکامین، ۱۳۹۹)، انگور (دکامین و خیرعلی‌پور، ۱۴۰۲)، ذرت (Afshar and Dekamin, 2022)، محصولات گلخانه‌ای (Dekamin et al., 2024)، سویا (Dekamin and Barmaki, 2019)، بذر گشنیز (Dekamin et al., 2022)، تولید چپیس سیبزمینی (Amicarelli et al., 2022)، و تولید گوشت (Bux and Amicarelli, 2022) متمرکز بوده است. در این مطالعات، استفاده از MFCA در ارزیابی بهره‌وری انرژی و اقتصادی نشان داده است که این روش قادر است تا ضایعات و ناکارآمدی‌های غیرقابل مشاهده‌ای را شناسایی کند که در روش‌های سنتی اغلب نادیده گرفته می‌شوند. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای بر روی سیبزمینی (دکامین، ۱۴۰۰)، نتایج نشان داد که محاسبه هزینه‌های زیست‌محیطی و انرژی منفی می‌تواند بازدهی انرژی را تا ۲۵ درصد کاهش دهد. یافته مشابهی در مطالعات مربوط به کلزا و انگور نیز مشاهده شده است (دکامین و خیرعلی‌پور، ۱۴۰۲؛ دکامین، ۱۳۹۹)، که به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها در تولید کمک کرده‌اند. تاکنون، مطالعه‌ای با استفاده از روش MFCA به طور خاص بر روی تولید گوجه‌فرنگی مزرعه‌ای انجام نشده است. نوآوری این پژوهش در استفاده از روش حسابداری هزینه جریان مواد برای ارزیابی بهره‌وری انرژی و اقتصادی در تولید گوجه‌فرنگی مزرعه‌ای است. این روش که پیش از این در صنایع مختلف کاربرد داشته، تاکنون در کشاورزی و به‌ویژه تولید گوجه‌فرنگی، به‌طور خاص مورد استفاده قرار نگرفته است. این تحقیق با ترکیب تحلیل‌های اقتصادی و انرژی، به‌ویژه شناسایی ضایعات و ناکارآمدی‌های محیط‌زیستی که در روش‌های مرسوم نادیده گرفته می‌شوند، امکان ارزیابی دقیق‌تر و جامع‌تر بهره‌وری منابع را در کشاورزی فراهم می‌آورد. همچنین، این روش می‌تواند به عنوان ابزاری نوین در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی در بخش کشاورزی معرفی شود. هدف از این پژوهش، ارزیابی مصرف انرژی و تحلیل اقتصادی تولید گوجه‌فرنگی مزرعه‌ای در منطقه نهاوند استان همدان با استفاده از روش حسابداری مرسوم و حسابداری هزینه جریان مواد است. این مطالعه تلاش می‌کند تا با شناسایی جریان مواد و هزینه‌های مرتبط، فرصت‌های کاهش هدررفت منابع، بهبود بهره‌وری، و کاهش اثرات محیط‌زیستی را بررسی نماید. همچنین، نتایج تحقیق می‌تواند به ارائه راهکارهای عملی در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی و تحقق اهداف توسعه پایدار در تولید گوجه‌فرنگی کمک کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، تعداد نمونه و شرح مختصری از فرایند تولید

کشت گوجه‌فرنگی در منطقه نهاوند در فضای باز با آماده‌سازی زمین آغاز می‌شود که شامل شخم‌زنی عمیق، نرم کردن خاک و افزودن کودهای آلی و شیمیایی متناسب با نیاز خاک است. پس از آماده‌سازی زمین، نشاهای گوجه‌فرنگی که در گلخانه یا خزانه تولید شده‌اند، در فصل بهار و پس از رفع سرما به زمین اصلی منتقل می‌شوند. کاشت نشاها با فاصله‌های مناسب انجام می‌گیرد تا تهویه و رشد بهتر گیاه تضمین شود. آبیاری در مراحل اولیه به‌صورت منظم انجام می‌گیرد و سپس با رشد گیاه، از روش‌هایی مانند آبیاری قطره‌ای برای افزایش بهره‌وری استفاده می‌شود. آب در این منطقه عموماً به کمک پمپ‌های برقی از چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق استخراج می‌گردد و به شبکه توزیع تزریق می‌گردد. در طول فصل رشد، مبارزه با آفات و بیماری‌ها، تغذیه مناسب از طریق کوددهی و وجین علف‌های هرز از جمله اقدامات ضروری هستند. کودهای شیمیایی مورد استفاده عموماً کود اوره، کود دی‌آمونیم فسفات و کود پتاسیم فسفات می‌باشد. برای علف‌کشی طیف وسیعی از سموم نظیر: گراماکسون (ماده موثره: ۲۰ درصد)، سولفوسولفورون (۷۵ درصد)، توفوردی (۶۷/۵ درصد)، آکلونیفن (۶۰ درصد)، متری‌بوزین (۷۰ درصد)، ترفلان (۴۸ درصد)، و راندآپ (۴۱ درصد)؛ برای آفت‌کشی سمومی نظیر: دیازینون (۶۰ درصد)، اکامت (۲۵ درصد)، اسپینوزا (۱۲ درصد)، و اکاتین (۵۰ درصد)؛ و برای قارچ‌کشی سمومی نظیر: بنومیل (۵۰ درصد)، تو اس ام (۴۰ درصد)، کاربندازیم (۵۰ درصد)، توپاس (۲۰ درصد)، و مانکوزب (۸۰ درصد) که در بازار متداول می‌باشند استفاده می‌شود. در نهایت، محصول رسیده در چند مرحله برداشت می‌شود تا از کیفیت و تازگی گوجه‌ها اطمینان حاصل گردد.

براساس شرحی که داده شده، مرزهای سیستم در این مطالعه از درگاه ورودی مزرعه تا درگاه خروجی مزرعه (gate to gate) را شامل می‌شود. تهیه نشا نیز در داخل این سیستم منظور گردیده است. مطالعه در تعدادی از مزارع گوجه‌فرنگی شهرستان نهاوند انجام شد. شهرستان نهاوند، واقع در جنوب غربی استان همدان، با مختصات جغرافیایی تقریباً ۳۴/۱۹ درجه عرض شمالی و ۴۸/۳۷ درجه طول شرقی، یکی از مناطق مستعد کشاورزی در ایران است. این منطقه در دامنه‌های زاگرس و ارتفاع متوسط ۱۶۶۰ متر از سطح دریا قرار دارد و دارای

اقلیمی معتدل کوهستانی با زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل است. نپاوند از بارش سالانه‌ای حدود ۵۰۰ میلی‌متر برخوردار است که از جمله بالاترین مقادیر در استان همدان به شمار می‌آید (MAJ, 2025; IRIMO, 2025).

برای اطمینان از نماینده بودن نتایج تحقیق، حجم نمونه مورد نیاز با بهره‌گیری از فرمول معتبر کوکران^۱ محاسبه شد. این فرمول به طور گسترده‌ای در مطالعات کشاورزی و سایر علوم برای تعیین اندازه نمونه مناسب به کار می‌رود. فرمول کوکران، بر اساس مفاهیم آماری مانند ضریب اطمینان (t)، واریانس (S²) و دقت مورد نظر (d)، حجم نمونه مورد نیاز (n) را محاسبه می‌کند (Ghasemi-Mobtaker et al., 2022):

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

ضریب اطمینان نشان‌دهنده سطح اطمینان ما به نتایج است و از جدول t-استیودنت به دست می‌آید. واریانس، پراکندگی داده‌ها حول میانگین را نشان می‌دهد و در این مطالعه، واریانس نسبت انرژی از یک نمونه اولیه ۲۵ مزرعه برآورد شده است. ابتدا، یک نمونه تصادفی از ۲۵ مزرعه گوجه‌فرنگی انتخاب شد و نسبت انرژی در هر مزرعه محاسبه گردید. سپس، با استفاده از این داده‌ها، واریانس نسبت انرژی برآورد شد. در نهایت، با جایگذاری مقادیر بدست آمده در فرمول کوکران، حجم نمونه نهایی تعیین شد. حجم نمونه از طریق فرمول کوکران ۹۲ برآورد گردید.

اجرای حسابداری جریان مواد

برای اجرای MFCA از استانداردهای ISO 14051 استفاده شد. بر اساس این استاندارد، محصولات به دو دسته مثبت و منفی طبقه‌بندی می‌شوند. محصولات مثبت شامل مواردی هستند که انتظار می‌رود از فرآیند تولید حاصل شوند، در حالی که محصولات منفی شامل ضایعات و آلاینده‌هایی هستند که در طول فرآیند تولید ایجاد می‌شوند (ISO 14051, 2011).

در این پژوهش، مرکز مقدارسنجی^۲ (QC) به عنوان یک واحد مستقل در فرآیند تولید در نظر گرفته شد که ورودی‌ها (مواد و انرژی) و خروجی‌ها (محصولات و پسماندها) آن به صورت کمی و کیفی اندازه‌گیری شد. این مراکز، هسته اصلی جمع‌آوری داده‌ها در MFCA هستند. در مطالعه حاضر، مراحل مختلف تولید گوجه‌فرنگی از جمله پیش‌کاشت، کاشت، داشت و برداشت به عنوان مراکز مقدارسنجی تعریف شدند (شکل ۱). برای هر مرکز مقدارسنجی، کلیه ورودی‌ها (مانند نهاده‌های کشاورزی، انرژی و غیره) و خروجی‌ها (از جمله محصول گوجه‌فرنگی، آلاینده‌های گازی و پسماندهای جامد) شناسایی و اندازه‌گیری شدند. سپس داده‌های جمع‌آوری شده از تمامی مراکز مقدارسنجی، برای تحلیل کل سیستم تولید گوجه‌فرنگی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور انجام تحلیل‌های MFCA، رابطه اساسی آن (رابطه ۲) که تعادل بین ارزش کل خروجی‌ها (با در نظر گرفتن هرگونه تغییر انرژی درون QC) با مقدار کل ورودی‌های مصرف‌شده را نشان می‌دهد استفاده شد (ISO, 2011, Dekamin and Barmaki, 2019):

$$\sum M_{pi.wi(in)} = \sum_{i=1}^p M_{pi(in)} + \sum_{i=1}^w M_{wi(in)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این رابطه $M_{pi.wi(in)}$ مجموع انرژی/مواد ورودی، $M_{pi(in)}$ مقدار محصول مثبت و $M_{wi(in)}$ مقدار انتشار و اتلاف انرژی (انرژی منفی) است. انرژی منفی، که به عنوان انرژی تلف‌شده یا غیرمولد در فرآیندهای تولید تعریف می‌شود، نقش مهمی در تحلیل بهره‌وری انرژی ایفا می‌کند (Afshar and Dekamin, 2022). کاهش انرژی منفی می‌تواند به بهبود کارایی سیستم و کاهش هزینه‌های تولید کمک کند.

برآورد انرژی ورودی‌ها و خروجی‌ها

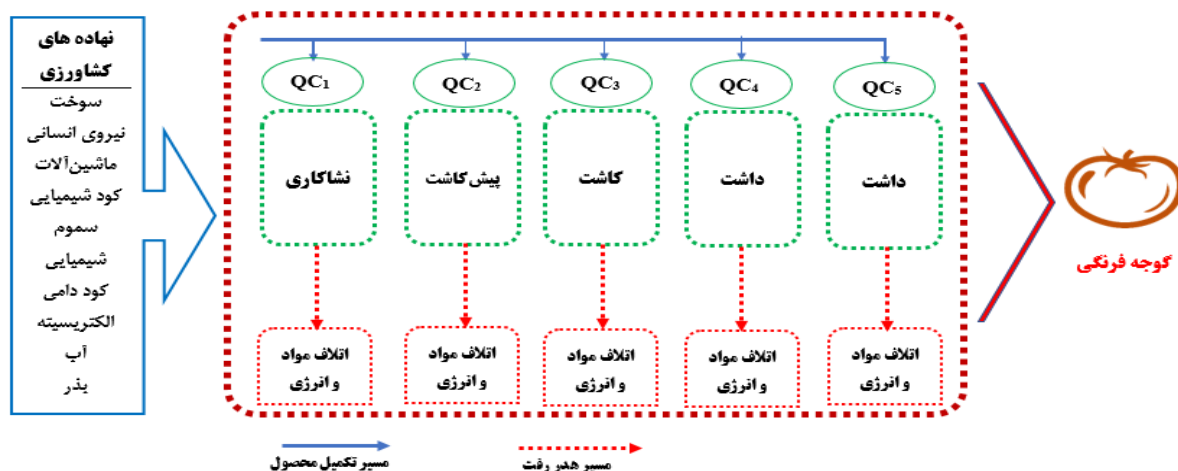
هم‌ارز انرژی ورودی‌ها و خروجی‌ها بر اساس معتبرترین و به‌روزترین منابع علمی با ضرب مقدار هر ورودی در ضریب انرژی مربوطه (معادله ۳) تعیین شدند (Hossein et al., 2024). جدول (۱) ضرایب انرژی را برای ورودی‌ها و خروجی‌ها نشان می‌دهد.

$$E_{input} = I_{consumption} \times EC_{input} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن E_{input} انرژی ورودی‌های مصرف‌شده (مگاژول بر هکتار)، $I_{consumption}$ میزان مصرف ورودی (واحد بر هکتار)، و EC_{input} معادل انرژی ورودی‌ها (مگاژول بر واحد) است. واحد ورودی‌ها بر اساس ماهیت آن‌ها متفاوت است؛ به عنوان مثال، برای سوخت

1. Cochran's sample size
2. Quantity Center

لیتر، برای کودها کیلوگرم و برای الکتربسته کیلووات ساعت است.



شکل ۱. مدل جریان مواد برای تولید گوجه‌فرنگی در مرزهای MFCA

جدول ۱. هم‌ارز انرژی برای ورودی‌ها و خروجی‌های مثبت

منبع	انرژی هر واحد (مگاژول بر واحد)	واحد	جریان ورودی/خروجی
ورودی			
Singh et al., 2025	۵۶/۳۱	لیتر	سوخت
Singh et al., 2025	۱/۹۶	ساعت	نیروی انسانی
Singh et al., 2025	۶۲/۷	ساعت	ماشین‌ها
Singh et al., 2025	۶۰/۶	کیلوگرم	کود اوره
Singh et al., 2025	۱۱/۱	کیلوگرم	کود دی‌آمونیم فسفات
Singh et al., 2025	۶/۷	کیلوگرم	کود پتاسیم سولفات
Singh et al., 2025	۲۳۸	لیتر	علف‌کش
Singh et al., 2025	۱۹۹	لیتر	آفت‌کش
Singh et al., 2025	۲۱۶	لیتر	قارچ‌کش
Hatirli et al., 2006	۰/۳	کیلوگرم	کود دامی
Singh et al., 2025	۱۱/۹۳	کیلووات ساعت	الکتربسته
Singh et al., 2025	۳/۶	کیلوگرم	بذر
خروجی منفی			
Singh et al., 2025	۳/۶	کیلوگرم	بذر
Singh et al., 2025	۱/۰۲	مترمکعب	آب آبیاری
Afshar and Dekamin, 2022	۲/۷۰	کیلوگرم	آمونیاک (NH_3)
Afshar and Dekamin, 2022	۱۲/۴۴	کیلوگرم	نیترات (NO_3^-)
Afshar and Dekamin, 2022	۳/۳۲	کیلوگرم	فسفر (P)
Afshar and Dekamin, 2022	۱/۸۸	کیلوگرم	نیتروس اکسید (N_2O)
Singh et al., 2025	۲۳۸	کیلوگرم	علف‌کش
Singh et al., 2025	۱۹۹	کیلوگرم	آفت‌کش
Singh et al., 2025	۲۱۶	کیلوگرم	قارچ‌کش
Singh et al., 2025	۳/۶	کیلوگرم	هدر رفت گوجه‌فرنگی
خروجی مثبت			
Singh et al., 2025	۳/۶	کیلوگرم	گوجه‌فرنگی

در جدول (۱)، هم‌ارز ارایه شده برای آب آبیاری در بخش خروجی منفی، مربوط به انرژی مورد نیاز برای عملیات استخراج و انتقال می‌باشد. ضرایب مورد نیاز برای محاسبه هم‌ارزهای انرژی خروجی‌های N_2O ، NH_3 و NO_3 نیز با استفاده از روش آنتروپی استاندارد تشکیل مطابق با جدول (۲) به دست آمدند (Afshar and Dekamin, 2022):

جدول ۲. آنتروپی استاندارد تشکیل انتشار کودهای شیمیایی

انتشارات	جرم مولی (g/mol)	هم‌ارز انرژی (kJ/mol)	هم‌ارز انرژی (MJ/kg)
N_2O	۴۴	۸۲/۵	۱/۸۸
NH_3	۱۷/۰۳	۴۶	۲/۷۰
NO_3	۶۲	۲۰۶	۳/۳۲

روابط مربوط به محاسبات خروجی‌های منفی

بر اساس تحلیل جریان مواد (شکل ۱)، فرایند تولید گوجه‌فرنگی به طیف گسترده‌ای از خروجی‌های منفی منجر می‌شود، از جمله انتشار آلاینده‌ها ناشی از مصرف کودها و سموم شیمیایی، و همچنین تلفات بذر، آب، و گوجه‌فرنگی. برای محاسبه خروجی‌های منفی کودهای شیمیایی براساس روابط ارایه شده در IPCC به شرح زیر استفاده شد (IPCC, 2006):

$$NH_3 - N = (N_{fer} * F_{fer}) \quad \text{رابطه ۴}$$

$$N_2O - N = N_2O - N_{(direct)} + N_2O - N_{indirect} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$N_2O - N_{(direct)} = (N_{fer}) * F_1 \quad \text{رابطه ۶}$$

$$N_2O - N_{indirect} = N_2O - N_{(ATD)} + N_2O - N_{(L)} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$N_2O - N_{(ATD)} = [(N_{fer} * Frac_{GASF})] \quad \text{رابطه ۸}$$

$$N_2O - N_{(L)} = [(N_{fer}) * Frac_{LEACH}] * F_2 \quad \text{رابطه ۹}$$

$$NO_3^- - N = (N_{fer}) * Frac_{LEACH} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در این روابط N_{fer} میزان نیتروژن موجود در کود شیمیایی مورد نظر، F_{fer} ضریب انتشار گاز آمونیاک متناسب با کود مورد استفاده، $N_2O - N_{(direct)}$ میزان انتشار مستقیم نیتروس اکساید، F_1 فاکتور انتشار $N_2O - N_{indirect}$ انتشار غیرمستقیم نیتروس اکساید، $N_2O - N_{(ATD)}$ میزان انتشار نیتروس اکساید در فرایندهای هوایی، $N_2O - N_{(L)}$ میزان انتشار نیتروس اکساید در اثر فرایندهای آبشویی، F_2 ، $Frac_{GASM}$ ، $Frac_{GASF}$ و F_{LEACH} نیز ضرایب مربوطه هستند. جدول (۳) مقادیر این ضرایب را نشان می‌دهد (IPCC, 2006).

جدول ۳. ضرایب و فاکتورهای استفاده شده در محاسبات خروجی‌های منفی

مقدار	ضرایب و فاکتورها
+/۱۷	ضریب آمونیاک
+/۰۱	F_1
+/۰۰۷۵	F_2
+/۲	$Frac_{GASM}$
+/۱	$Frac_{GASF}$
+/۳	F_{LEACH}

اتلاف آب مصرف شده با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی منطقه و نیاز آبی گیاه و روابط ارایه شده در منابع (Harmanto et al., 2019; Ewaid et al., 2005) محاسبه شد. خروجی منفی مربوط به سموم شیمیایی نیز براساس میزان ماده موثره آن‌ها و دستورالعمل ارایه شده در IPCC محاسبه گردید (IPCC, 2006).

محاسبات شاخص‌های عملکرد انرژی و اقتصادی

پس از شناسایی ورودی‌ها و خروجی‌های مثبت و منفی، می‌توان با استفاده از روابط زیر، شاخص‌های انرژی تولید گوجه‌فرنگی را محاسبه کرد. شاخص‌های انرژی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای مقایسه و تحلیل سیستم‌های مختلف تولید به کار می‌روند و می‌توانند در بهبود

بهره‌وری انرژی نقش مؤثری داشته باشند. شاخص‌های اصلی در این زمینه عبارتند از: نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی (بر حسب کیلوگرم بر مگاژول)، شدت انرژی (بر حسب مگاژول بر کیلوگرم) و انرژی خالص (بر حسب مگاژول بر هکتار) که با روابط ۱۱ تا ۱۴ محاسبه می‌شوند (Elhami et al., 2021).

$$\text{رابطه ۱۱)} \quad \text{نسبت انرژی} = \frac{\text{انرژی خروجی (مگاژول بر هکتار)}}{\text{انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)}}$$

$$\text{رابطه ۱۲)} \quad \text{بهره‌وری انرژی} = \frac{\text{عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)}}{\text{انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)}}$$

$$\text{رابطه ۱۳)} \quad \text{شدت انرژی} = \frac{\text{انرژی ورودی (مگاژول بر هکتار)}}{\text{عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)}}$$

$$\text{رابطه ۱۴)} \quad \text{انرژی ورودی} - \text{انرژی خروجی} = \text{خالص انرژی}$$

با مشخص بودن ورودی‌ها و خروجی‌های مثبت و منفی و قیمت هر کدام از آن‌ها، می‌توان هزینه‌ها و درآمدها و شاخص‌های اقتصادی را نیز می‌توان به کمک روابط ۱۵ تا ۱۸ برآورد گردید (Unakitan and Aydın, 2018):

$$\text{رابطه ۱۵)} \quad \text{قیمت (دلار بر کیلوگرم)} \times \text{عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)} = \text{ارزش ناخالص تولید}$$

$$\text{رابطه ۱۶)} \quad \text{هزینه متغیر تولید (دلار بر هکتار)} - \text{ارزش ناخالص تولید (دلار بر هکتار)} = \text{سود ناخالص}$$

$$\text{رابطه ۱۷)} \quad \text{نسبت سود به هزینه} = \frac{\text{ارزش ناخالص تولید (دلار بر هکتار)}}{\text{هزینه متغیر تولید (دلار بر هکتار)}}$$

$$\text{رابطه ۱۸)} \quad \text{بهره‌وری} = \frac{\text{عملکرد گوجه فرنگی (کیلوگرم بر هکتار)}}{\text{هزینه متغیر تولید (دلار بر هکتار)}}$$

بحث و نتایج

تحلیل انرژی برای تولید گوجه‌فرنگی

میانگین انرژی ورودی و خروجی برای تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان نهاوند در جدول (۴) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، میانگین ورودی انرژی برای تولید گوجه‌فرنگی ۱۶۸۹۴۴/۵۲ مگاژول در هکتار است، در حالی که میانگین انرژی خروجی منفی برابر ۳۸۸۸۸/۱۰ و خروجی مثبت ۲۰۸۲۱۳/۲۰ مگاژول در هکتار به دست می‌آید. مطالعات قبلی (Kuswardhani et al., 2013; Yelmen et al., 2019; Dimitrijević et al., 2015; Esengun et al., 2007; Moghaddam et al., 2011; Hatirli et al., 2006; Nasirpour et al., 2023) برای کشت گوجه‌فرنگی در مزرعه، انرژی ورودی در محدوده ۴۷۶۴۷ تا ۱۰۶۷۱۶ مگاژول بر هکتار و انرژی خروجی در محدوده ۴۱۹۴۳ تا ۱۳۶۰۰۰ مگاژول بر هکتار را گزارش کرده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان انرژی مصرف شده به ازای هر هکتار از کشت زراعی گوجه‌فرنگی در این مطالعه به طور قابل توجهی بالاتر از مطالعات دیگر بود. ضمن درک تفاوت روش‌ها و ضرایب مورد استفاده در محاسبات، عوامل آب و هوایی منطقه، رقم گوجه‌فرنگی کشت شده و نوع کودها و سموم استفاده شده، این امر را می‌توان به میزان بالای مصرف الکتریسته و کودهای شیمیایی در مزارع گوجه‌فرنگی مورد بررسی نسبت داد. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، الکتریسته با سهم حدود ۶۸ درصد (معادل ۱۱۵۱۶۸ مگاژول بر هکتار) در کل ورودی انرژی به عنوان بیشترین ورودی مصرفی شناسایی شد، و کودهای شیمیایی (نیتروژنه، فسفات و پتاسه) با حدود ۲۱ درصد (معادل ۳۴۶۶۵ مگاژول بر هکتار) در رتبه بعدی جای دارد. استفاده از پمپ‌های آب ناکارآمد و قدیمی، عمق بالای چاه‌ها و فاصله زیاد انتقال آب از چاه تا مزرعه از مهم‌ترین دلایل مصرف بالای انرژی الکتریکی به شمار می‌روند. یکی از چالش‌های اصلی در کشاورزی مدرن، انتقال آب به زمین‌هایی است که فاصله زیادی از منابع آبی دارند. این مسئله موجب افزایش قابل توجه مصرف انرژی برای پمپاژ و انتقال آب شده است. در گذشته، بسیاری از این

زمین‌ها به کشت دیم اختصاص داشتند، اما با پیشرفت فناوری و بهبود روش‌های انتقال آب، به تدریج به کشت آبی تغییر یافته‌اند. پهلوان و همکاران (Pahlavan et al., 2011) و یلمن و همکاران (Yelmen et al., 2019) دو نهاده الکتربسیسته و کودهای شیمیایی را اصلی‌ترین ورودی‌های انرژی در تولید گوجه‌فرنگی گزارش کرده‌اند.

جدول ۴. ورودی‌ها، خروجی‌های مثبت و خروجی‌های منفی انرژی در تولید گوجه‌فرنگی در نهاوند

جریان ورودی/خروجی	واحد	انرژی هر واحد (مگاژول بر واحد)	مقدار مصرف/تولید (واحد بر هکتار)	معادل انرژی (مگاژول بر هکتار)
ورودی				
سوخت	لیتر	۵۶/۳۱	۱۱۶/۵۵	۶۵۶۲/۹۳
نیروی انسانی	ساعت	۱/۹۶	۸۶۹/۸۲	۱۷۰۴/۸۵
ماشین آلات	ساعت	۶۲/۷	۴۶/۸۲	۲۹۳۵/۶۱
کود اوره	کیلوگرم	۶۰/۶	۴۳۴/۷۸	۲۶۳۴۷/۶۷
کود دی‌آمونیم فسفات	کیلوگرم	۱۱/۱	۵۰۰	۵۵۵۰
کود پتاسیم سولفات	کیلوگرم	۶/۷	۴۱۳/۰۴	۲۷۶۷/۳۷
علف کشت	لیتر	۲۳۸	۲/۰۶۵	۴۹۱/۴۷
آفت کشت	لیتر	۱۹۹	۲/۴۶	۴۸۹/۵۴
قارچ کشت	لیتر	۲۱۶	۲/۹۶	۶۳۹/۳۶
کود دامی	کیلوگرم	۰/۳	۲۰۹۲۳/۹	۶۲۷۷/۱۷
الکتربسیسته	کیلووات ساعت	۱۱/۹۳	۹۶۵۳/۶۵	۱۱۵۱۶۸/۰۴
بذر	کیلوگرم	۳/۶	۲/۹۲	۱۰/۵۱
جمع ورودی				۱۶۸۹۴۴/۵۲
خروجی‌های منفی				
بذر	کیلوگرم	۳/۶	۰/۲۹	۱/۰۴
آب آبیاری	مترمکعب	۱/۰۲	۱۷۲۶	۱۷۶۰/۵۲
آمونیاک (NH ₃)	کیلوگرم	۲/۷۰	۵۹/۷۹	۱۶۱/۴۳
نیترات (NO ₃ ⁻)	کیلوگرم	۱۲/۴۴	۳۸۴/۸۱	۴۷۸۷/۰۴
فسفر (P)	کیلوگرم	۳/۳۲	۵/۰۲	۱۶/۶۷
نیترس اکسید (N ₂ O)	کیلوگرم	۱/۸۸	۶/۰۳	۱۱/۳۴
علف کشت	کیلوگرم	۲۳۸	۱/۲۶	۲۹۹/۸۸
آفت کشت	کیلوگرم	۱۹۹	۱/۳۴	۲۶۶/۶۶
قارچ کشت	کیلوگرم	۲۱۶	۱/۶۲	۳۴۹/۹۲
هدر رفت گوجه‌فرنگی	کیلوگرم	۳/۶	۸۶۷۶	۳۱۲۳۳/۶
جمع خروجی‌های منفی				۳۸۸۸۸/۱۰
خروجی مثبت				
گوجه‌فرنگی	کیلوگرم	۳/۶	۵۷۸۳۷	۲۰۸۲۱۳/۲
جمع خروجی مثبت				۲۰۸۲۱۳/۲

براساس جدول (۴)، مجموع انرژی خروجی‌های مثبت و منفی در تولید گوجه‌فرنگی به ترتیب ۲۰۸۲۱۳/۲ و ۳۸۸۸۸/۱۰ مگاژول بر هکتار برآورد شده است. در میان معادل‌های انرژی مربوط به خروجی‌های منفی، بیشترین سهم مربوط به هدررفت گوجه‌فرنگی است که ۸۰/۳ درصد از کل (معادل ۳۱۲۳۳/۶۰ مگاژول بر هکتار) را شامل می‌شود. پس از آن، آبشویی نیترات با سهم ۱۲/۳ درصد (معادل ۴۷۸۷/۰۴ مگاژول بر هکتار) و هدررفت آب آبیاری با ۴/۵ درصد (۱۷۶۰/۵۲ مگاژول بر هکتار) قرار دارند. سهم سایر عوامل اندک بوده و اهمیت کمتری دارند. نتایج مشابهی در حسابداری هزینه جریان مواد تولید سوپا گزارش شده است. نتایج مشابهی در حسابداری هزینه جریان مواد تولید سوپا گزارش شده است، به طوری که هدررفت سوپا، نیترژن و آب آبیاری به ترتیب ۳۶، ۳۳ و ۲۳ درصد از خروجی منفی را تشکیل می‌دهند. سهم سایر موارد در این مطالعه نیز ناچیز بوده است (Dekamin and Barmaki, 2019). در تولید ذرت (Afshar and

(Dekamin, 2022)، کلزا (دکامین، ۱۳۹۹)، و انگور (دکامین و خیرعلی پور، ۱۴۰۲) نیز نتایج تقریباً مشابهی گزارش شده است. برای کاهش تلفات گوجه‌فرنگی در مزارع، به‌کارگیری استراتژی‌های مدیریت یکپارچه ضروری است. مدیریت بهینه برداشت، شامل تعیین دقیق زمان برداشت، استفاده از تجهیزات مناسب و آموزش کارگران، نقش اساسی در کاهش آسیب‌های فیزیکی محصول دارد. انتخاب ارقام مقاوم به آفات و بیماری‌ها و تنظیم تراکم کشت مناسب نیز بهبود کیفیت و افزایش بازدهی تولید را به همراه دارد. علاوه بر این، مدیریت تغذیه‌ای دقیق و آبیاری بهینه، با کاهش تنش‌های محیطی، به افزایش ماندگاری محصول و کاهش ضایعات پس از برداشت کمک می‌کند. همچنین، پایش مستمر مزارع و به‌کارگیری روش‌های تلفیقی کنترل آفات و بیماری‌ها، شامل کنترل بیولوژیک و شیمیایی، از راهکارهای مؤثر در کاهش تلفات محصول محسوب می‌شود (Manohar et al., 2022).

آبشویی نیترات حاصل از استفاده بیش از حد کودهای شیمیایی در کشاورزی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی است. این پدیده منجر به آلودگی منابع آب زیرزمینی و سطحی شده و سلامت انسان و اکوسیستم‌های آبی را به خطر می‌اندازد. تجمع نیترات در آب باعث بروز مشکلاتی مانند بیماری مته‌م‌گلوبینی و رشد بی‌رویه جلبک‌ها شده و در نتیجه، کاهش اکسیژن‌رسانی به آب و اختلال در تعادل زیستی آبزیان را به دنبال دارد. برای کاهش این مشکل، مدیریت بهینه مصرف کود، جایگزینی بخشی از کودهای شیمیایی با کودهای آلی، کنترل دقیق آبیاری و کشت گیاهان پوششی توصیه می‌شود. با اجرای این راهکارها، می‌توان به طور هم‌زمان از آلودگی منابع آب جلوگیری کرده و به پایداری تولید محصولات کشاورزی کمک کرد (Sheikhzeinoddin et al., 2016; Divya and Belagali, 2012; Pandorf et al., 2020; Calabrese and Campanale, 2024).

با وجود آن‌که در این پژوهش، سهم انرژی خروجی منفی مربوط به آب، نسبت به مطالعات پیشین (Afshar and Dekamin, 2020; Dekamin and Barmaki, 2019; Dekamin, 2022) کمتر بوده است که علت اصلی آن را می‌توان به استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای در منطقه مورد مطالعه نسبت داد، اما همچنان امکان بهبود بهره‌وری آبیاری گوجه‌فرنگی با تلفیق مدیریت هوشمند و فناوری‌های نوین وجود دارد. استفاده از سنسورهای رطوبت خاک و داده‌های هواشناسی، زمان‌بندی دقیق آبیاری را تسهیل کرده و از هدررفت آب جلوگیری می‌کند. تجهیز سیستم به قطره‌چکان‌های هوشمند و پوشش سطح خاک با مالچ، توزیع یکنواخت آب و کاهش تبخیر را به دنبال دارد. تقسیم آبیاری به دوره‌های کوتاه‌تر و مکرر نیز ریشه‌ها را به جستجوی آب در لایه‌های سطحی خاک تشویق می‌کند. به‌کارگیری فناوری‌های خودکار و اینترنت اشیا، همراه با آموزش کشاورزان، به مدیریت بهینه سیستم آبیاری کمک کرده و پایداری تولید گوجه‌فرنگی را افزایش می‌دهد (Ma et al., 2024; Somnuek et al., 2020; Al-Ghobari et al., 2015).

روش‌های محاسبات مرسوم و MFCA نقش مهمی در تحلیل و درک الگوی مصرف انرژی در سیستم تولید گوجه‌فرنگی دارند. شاخص‌های انرژی مرتبط با تولید گوجه‌فرنگی، با استفاده از این دو روش، در جدول (۵) ارائه شده است. روش مرسوم محاسبه کارایی انرژی در کشاورزی، معمولاً بر اساس تقسیم انرژی خروجی بر انرژی ورودی است. این روش، با نادیده گرفتن ضایعات و محصولات جانبی منفی، تصویری اغراق‌آمیز از کارایی سیستم ارائه می‌دهد. در مقابل، حسابداری انرژی مبتنی بر MFCA رویکردی جامع‌تر است که تمامی جریان‌های انرژی، از جمله ضایعات و محصولات منفی را در محاسبات خود لحاظ می‌کند.

جدول ۵. شاخص‌های انرژی در تولید گوجه‌فرنگی: روش‌های متداول و هزینه‌یابی جریان مواد (MFCA)

شاخص انرژی	واحد	حسابداری مرسوم	هزینه‌یابی جریان مواد MFCA
انرژی ورودی	MJ ha ⁻¹	۱۶۸۹۴۴/۵۲	۱۶۸۹۴۴/۵۲
انرژی خروجی	MJ ha ⁻¹	۲۰۸۲۱۳/۲	۱۶۹۳۲۵/۱۰
انرژی مثبت	MJ ha ⁻¹	۲۰۸۲۱۳/۲	۲۰۸۲۱۳/۲
انرژی منفی	MJ ha ⁻¹	۰	-۳۸۸۸۸/۱۰
بازده انرژی	-	۱/۲۳	۱/۰۰
بهره‌وری انرژی	kg MJ ⁻¹	۰/۳۴	۰/۳۴
شدت انرژی	MJ kg ⁻¹	۲/۹۲	۲/۹۲
انرژی خالص	MJ ha ⁻¹	۳۹۲۶۸/۶۸	۳۸۰/۵۸

جدول ۵ نشان می‌دهد که در حالی که بازده انرژی در محاسبات مرسوم ۱/۲۳ است، این مقدار در روش MFCA به ۱/۰۰ کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش، لحاظ کردن انرژی منفی (ضایعات) در محاسبات MFCA است. این امر نشان می‌دهد که روش‌های مرسوم با

نادیده گرفتن انرژی مصرف شده برای تولید ضایعات، تصویری اغراق آمیز از بازده انرژی ارائه می‌دهند. کاهش ۱۹ درصدی بازده انرژی در روش MFCA نسبت به روش‌های مرسوم، اهمیت در نظر گرفتن انرژی منفی را در ارزیابی دقیق کارایی سیستم‌ها برجسته می‌سازد. در تولید سویا نیز کاهش ۲۵ درصد در بازده انرژی در روش MFCA نسبت به روش مرسوم گزارش شده است (Dekamin and Barmaki, 2019). مطالعات قبلی برای بازده انرژی با محاسبات مرسوم مقادیر ۱/۴۲ (Moghaddam et al., 2011)، ۱/۳ (نصیرپور و همکاران، ۱۴۰۲)، ۱/۱۲ (Yelmen et al., 2019)، ۰/۹۲ (Taki et al., 2013) و ۰/۸۵ (Kuswardhani et al., 2013) را گزارش کرده‌اند.

جدول (۵) نشان می‌دهد که بهره‌وری انرژی در تولید گوجه‌فرنگی در هر دو روش حسابداری مقدار ۰/۳۴ کیلوگرم بر مگاژول به دست آمده است. شدت انرژی نیز که معکوس بهره‌وری انرژی است (Hosseini et al., 2024)، برای هر دو روش ۲/۹۲ به دست آمده است. دیمیتری بهره‌وری انرژی در تولید گوجه‌فرنگی را ۰/۲۴ کیلوگرم بر مگاژول و شدت انرژی را ۴/۲۳ مگاژول بر هکتار گزارش کرده است که در تطابق با این مطالعه می‌باشد (Dimitrijević et al., 2015).

انرژی خالص در MFCA با در نظر گرفتن مجموع محصولات مثبت و منفی محاسبه می‌شود. این روش، تصویر دقیق‌تری از انرژی واقعی تولید شده و مصرف شده در سیستم ارائه می‌دهد. جدول (۵) نشان می‌دهد که انرژی خالص در حسابداری مرسوم مقدار ۲۹۶۴۳/۶۳ مگاژول بر هکتار و در حسابداری MFCA مقدار ۳۸۰/۵۸ به دست آمده است.

این تفاوت در نتایج حسابداری مرسوم و MFCA نشان می‌دهد که روش MFCA به‌عنوان ابزاری دقیق‌تر می‌تواند ائتلاف انرژی را که در روش‌های مرسوم نادیده گرفته می‌شود، شناسایی و محاسبه کند. MFCA با ارائه تصویری واقع‌بینانه از کارایی سیستم، امکان شناسایی دقیق‌تر نقاط ضعف و فرصت‌های بهبود را فراهم می‌کند. با لحاظ کردن ضایعات در محاسبات، MFCA انگیزه‌ای قوی برای کاهش تولید ضایعات و بهبود مدیریت پسماندها ایجاد می‌کند. نتایج تحلیل انرژی با MFCA نشان می‌دهد که باید در بحث ضایعات زراعی گوجه‌فرنگی و هدررفت‌های آب و کود مدیریت و دقت بیشتری صورت پذیرد. بنابراین MFCA با تاکید بر کاهش مصرف انرژی و مدیریت بهینه منابع، به پایداری سیستم‌های کشاورزی کمک می‌کند.

تحلیل اقتصادی برای تولید گوجه‌فرنگی

جدول (۶)، ساختار هزینه‌های تولید گوجه‌فرنگی در شهرستان نهاوند را به تفکیک ورودی‌ها و خروجی‌ها نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، کل هزینه ورودی به سیستم معادل ۲۴۳۱/۱۸ دلار آمریکا بوده است. هزینه خروجی منفی و مثبت به ترتیب ۱۵۵۰/۳۳ و ۸۶۷۵/۵۵ دلار آمریکا ثبت شده است. بالاترین سهم از هزینه‌های ورودی به ترتیب به بذر، نیروی کار، ماشین‌آلات و کودهای شیمیایی اختصاص داشته است. نکته قابل توجه، سهم بسیار اندک هزینه برق (کمتر از ۰/۵ درصد از کل هزینه‌ها) علی‌رغم مصرف بالای انرژی برق در فرایند تولید است.

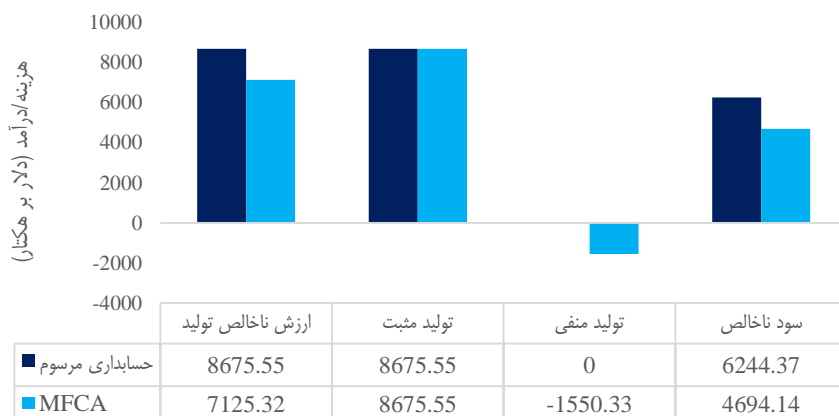
هزینه خروجی منفی محاسبه شده در تولید گوجه‌فرنگی معادل ۱۵۵۰/۳۳ دلار در هکتار بود. اصلی‌ترین هزینه تولید منفی زراعت گوجه‌فرنگی مربوط به هدررفت گوجه‌فرنگی و کودهای شیمیایی بود که به ترتیب برای کشاورز هزینه‌های پنهان ۱۳۰۱/۴ و ۸۸/۵۳ دلاری به همراه داشت. در مطالعه‌ای که در محصول انگور انجام شده بود سهم هدررفت انگور و آب آبیاری به عنوان عوامل اصلی تولید هزینه‌های منفی شناسایی شدند (دکامین و خیرعلی پور، ۱۴۰۲). با این حال، در مطالعه حاضر، به دلیل استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای، سهم هزینه‌های ناشی از هدررفت آب آبیاری کمتر بوده است.

شاخص‌های اقتصادی شامل ارزش تولید ناخالص، سود ناخالص، هزینه تولید کل، نسبت سود به هزینه و بهره‌وری اقتصادی برای دو حالت ارزیابی شدند که در شکل‌های (۲) و (۳) گزارش شده است.

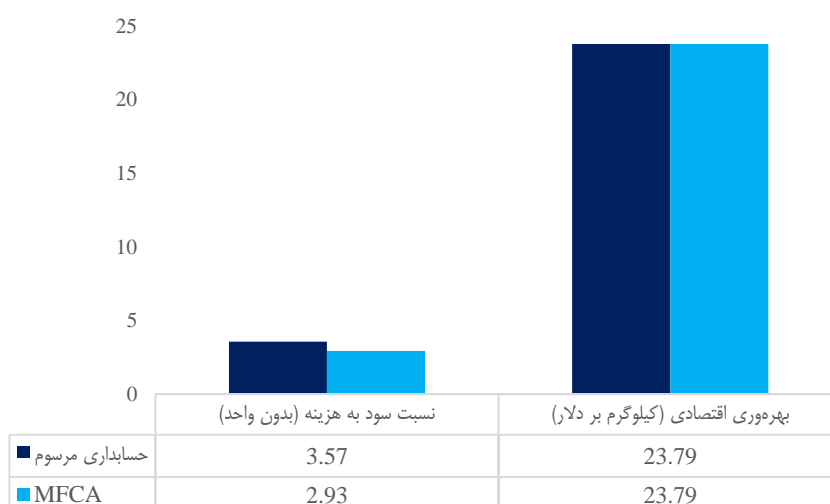
نتایج شکل (۲) نشان می‌دهد که تفاوت سود ناخالص بین محاسبات متداول و MFCA برابر با ۱۵۵۰/۳۳ دلار در هکتار است که معادل هزینه هدررفت مواد است. نسبت سود به هزینه در روش مرسوم نسبت به MFCA، به میزان ۰/۶۴ بالاتر است زیرا هزینه ضایعات مواد در حسابداری مرسوم لحاظ نشده است (شکل ۳). این نتایج به این معنی است که رویکرد MFCA با شناسایی نقاط بحرانی ائتلاف منابع، از جمله هدررفت محصول، کودهای شیمیایی، بذر و آب آبیاری، تصویری واقع‌بینانه‌تر از تحلیل‌های اقتصادی ارائه می‌دهد و هزینه‌های پنهان مرتبط با ضایعات را آشکار می‌سازد. در مطالعه‌ای که بر روی محصول سیب‌زمینی انجام شده است، نسبت سود به هزینه در حسابداری مرسوم، به میزان ۰/۶ بالاتر از MFCA گزارش شده است (دکامین، ۱۴۰۰). در نتیجه، تلفات محصول در مراحل مختلف زراعت و مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، به عنوان نقاط بحرانی، هزینه‌های تولید گوجه‌فرنگی را به‌طور غیرملموس ولی چشم‌گیر افزایش می‌دهند. برای بهبود سودآوری در این بخش، کاهش این نوع تلفات باید در اولویت برنامه‌های کشاورزان و سیاست‌گذاران قرار گیرد.

جدول ۶. ساختار هزینه - درآمد تولید گوجه‌فرنگی با نگرش هزینه‌یابی جریان مواد

هزینه (دلار بر هکتار)	مقدار مصرف/تولید (واحد بر هکتار)	هزینه هر واحد (دلار)	واحد	جریان ورودی/خروجی
ورودی				
۸/۱۶	۱۱۶/۵۵	۰/۰۷	لیتر	سوخت
۵۵۶/۶۸	۸۶۹/۸۲	۰/۶۴	ساعت	نیروی انسانی
۳۲۷/۷۴	۴۶/۸۲	۷/۰۰	ساعت	ماشین آلات
۸۲/۶۱	۴۳۴/۷۸	۰/۱۹	کیلوگرم	کود اوره
۱۴۵	۵۰۰	۰/۲۹	کیلوگرم	کود دی‌آمونیم فسفات
۹۵	۴۱۳/۰۴	۰/۲۳	کیلوگرم	کود پتاسیم سولفات
۲۳/۶۲	۲/۰۶۵	۱۱/۴۴	لیتر	علف‌کش
۳۰/۶۸	۲/۴۶	۱۲/۴۷	لیتر	آفت‌کش
۴۲/۳	۲/۹۶	۱۴/۲۹	لیتر	قارچ‌کش
۲۰۹/۲۴	۲۰۹۲۳/۹	۰/۰۱	کیلوگرم	کود دامی
۹/۶۵	۹۶۵۳/۶۵	۰/۰۰۱	کیلووات ساعت	الکتريسيته
۲۱۷/۰۴	۹۴۳۶/۳۲	۰/۰۲۳	متر مکعب	آب
۶۸۳/۴۶	۲/۹۲	۲۳۴/۰۶	کیلوگرم	بذر
۲۴۳۱/۱۸				جمع ورودی
خروجی‌های منفی				
۶۷/۸۸	۰/۲۹	۲۳۴/۰۶	کیلوگرم	بذر
۳۹/۷	۱۷۲۶	۰/۰۲۳	مترمکعب	آب آبیاری
۱۱/۳۶	۵۹/۷۹	۰/۱۹	کیلوگرم	آمونیاک (NH_3)
۷۳/۱۱	۳۸۴/۸۱	۰/۱۹	کیلوگرم	نیترات (NO_3)
۱/۴۶	۵/۰۲	۰/۲۹	کیلوگرم	فسفر (P)
۱/۱۵	۶/۰۳	۰/۱۹	کیلوگرم	نیترس اکسید (N_2O)
۱۴/۴۱	۱/۲۶	۱۱/۴۴	کیلوگرم	علف‌کش
۱۶/۷۱	۱/۳۴	۱۲/۴۷	کیلوگرم	آفت‌کش
۲۳/۱۵	۱/۶۲	۱۴/۲۹	کیلوگرم	قارچ‌کش
۱۳۰/۱۴	۸۶۷۶	۰/۱۵	کیلوگرم	هدر رفت گوجه‌فرنگی
۱۵۵۰/۳۳				جمع خروجی‌های منفی
خروجی مثبت				
۸۶۷۵/۵۵	۵۷۸۳۷	۰/۱۵	کیلوگرم	گوجه‌فرنگی
۸۶۷۵/۵۵				جمع خروجی‌های مثبت



شکل ۲. شاخص‌های اقتصادی تولید گوجه‌فرنگی: مقایسه روش‌های حسابداری مرسوم و MFCFA



شکل ۳. مقایسه نسبت سود به هزینه و بهره‌وری اقتصادی در تولید گوجه‌فرنگی با دو روش حسابداری مرسوم و MFCA

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که روش حسابداری جریان مواد و هزینه‌ها در ارتقای بهره‌وری انرژی و بهبود عملکرد اقتصادی مؤثر واقع می‌شود. با این حال، تخصیص یارانه‌های گسترده به حامل‌های انرژی، موجب کاهش هزینه‌های واقعی تولید و در نتیجه، تضعیف انگیزه برای بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌گردد. در صورت حذف یا تعدیل یارانه‌های انرژی، انتظار می‌رود که بهبود بهره‌وری انرژی به عنوان یک اولویت اساسی در نظر گرفته شود. بررسی عمیق‌تر این موضوع در مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه بر نقش حیاتی تحلیل‌های انرژی و اقتصادی در بهبود پایداری تولیدات کشاورزی، به ویژه برای گوجه‌فرنگی‌های کشت شده در مزارع شهرستان نهاوند، استان همدان، تاکید می‌کند. با استفاده از روش حسابداری هزینه جریان مواد، چارچوبی جامع برای ارزیابی جریان‌های مواد و انرژی، شناسایی ناکارآمدی‌ها و ارائه استراتژی‌هایی برای بهینه‌سازی استفاده از منابع توسعه یافت. نتایج نشان داد که برق و کودهای شیمیایی بیشترین سهم را در ورودی‌های انرژی دارند، که عمدتاً به دلیل استفاده از سیستم‌های آبیاری ناکارآمد و مصرف بیش از حد کودها می‌باشد. علاوه بر این، خروجی‌های انرژی منفی، مانند ضایعات گوجه‌فرنگی و شستشوی نیترات، به طور قابل توجهی به ناکارآمدی‌های محیط‌زیستی و اقتصادی کمک می‌کنند.

اتخاذ استراتژی‌های مدیریت یکپارچه، مانند فناوری‌های کشاورزی دقیق، روش‌های برداشت مناسب، کاربرد بهینه کود، مدیریت تلفیقی آفات و مدیریت کارآمد آب می‌تواند این ناکارآمدی‌ها را کاهش داده و بهره‌وری منابع را افزایش دهد. مقایسه روش‌های سنتی با روش MFCA نشان داد که محاسبات متداول، بازده انرژی را ۱۹ درصد بیش از حد برآورد می‌کنند. این امر بر اهمیت ادغام ضایعات و هزینه‌های محیط‌زیستی در ارزیابی‌های انرژی برای دستیابی به ارزیابی واقع‌بینانه پایداری در سیستم‌های کشاورزی تاکید می‌کند. با ارائه بینش‌های عملی و همسو کردن روش‌های تولید با اهداف توسعه پایدار، یافته‌های این مطالعه به پیشرفت تولید گوجه‌فرنگی کارآمد کمک می‌کند. علاوه بر این، سیاست‌گذاران می‌توانند از بینش‌های حاصل از این مطالعه برای توسعه سیاست‌های هدفمند که از شیوه‌های کشاورزی پایدار حمایت می‌کنند و از گذار به اقتصاد چرخشی حمایت می‌کنند، بهره ببرند.

با توجه به تأثیر یارانه‌های انرژی بر تحلیل اقتصادی، بررسی سناریوهای مختلف قیمت انرژی می‌تواند به درک بهتر پایداری اقتصادی سیستم کمک کند. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، تأثیر حذف یا کاهش یارانه‌های انرژی در تحلیل مالی و اقتصادی لحاظ گردد تا تصویری دقیق‌تر از بهره‌وری واقعی سیستم ارائه شود.

منابع

- دکامین، مجید. (۱۳۹۹). رویکردی جدید در حسابداری جریان مواد و انرژی سامانه‌های کشاورزی: مطالعه موردی کلزا در استان اردبیل. مهندسی بیوسستم/ایران، ۵۱(۴)، ۷۵۷-۷۶۸.
- دکامین، مجید. (۱۴۰۰). هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی سیب‌زمینی در استان همدان. *اقتصاد و توسعه کشاورزی*، ۳۵(۲)، ۱۰۵-۱۱۹.



دکامین، مجید و خیرعلی پور، کامران. (۱۴۰۲). هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی (MEFCA) تولید انگور در شهرستان ملایر. *اقتصاد و توسعه کشاورزی*، ۳۷(۳)، ۳۲۵-۳۴۰.

نصیریپور، صادق، جهانسوز، محمدرضا، مقدم، حسین و محمدزاده، آرش. (۱۴۰۲). مقایسه نظام تولید گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum L.*) و پیاز (*Allium cepa L.*) از نظر شاخص‌های انرژی، اقتصادی و پتانسیل انتشار گازهای گلخانه‌ای (مطالعه موردی شهرستان‌های استان البرز). *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۴(۴)، ۱۳۷-۱۵۳.

REFERENCES

- Afshar, R. K., & Dekamin, M. (2022). Sustainability assessment of corn production in conventional and conservation tillage systems. *Journal of Cleaner Production*, 351, 131508. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131508>
- Al-Ghobari, H. M., Mohammad, F. S., & El Marazky, M. S. A. (2015). Assessment of smart irrigation controllers under subsurface and drip-irrigation systems for tomato yield in arid regions. *Crop and Pasture Science*, 66(10), 1086-1095.
- Amicarelli, V., Roe, B. E., & Bux, C. (2022). Measuring food loss and waste costs in the Italian potato chip industry using material flow cost accounting. *Agriculture*, 12(4), 523. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040523>
- Arum, L. S. (2023). Pengaruh green accounting, environmental performance, material flow cost accounting (mfca) dan environmental disclosure terhadap sustainable development goals (sdgs). *Kajian Bisnis Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi Widya Wiwaha*, 31(2), 54-67.
- Bux, C., & Amicarelli, V. (2022). Material flow cost accounting (MFCA) to enhance environmental entrepreneurship in the meat sector: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Management*, 313, 115001. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115001>
- Calabrese, A., Campanale, M. (2024). Agricultural Nitrate Leaching into Groundwater Case of Study in Apulia Region. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(12), 387-394. <https://doi.org/10.12912/27197050/195114>
- Cetin, B., & Vardar, A. (2008). An economic analysis of energy requirements and input costs for tomato production in Turkey. *Renewable energy*, 33(3), 428-433. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.008>
- Dekamin, M. (2021a). A new approach to material and energy flow accounting of agricultural systems: a case study of Canola in Ardabil Province. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 51(4), 757-768. (in Persian with English abstract).
- Dekamin, M. (2021b). Potato Energy and Material Flow Cost Accounting in Hamadan Province, Iran. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 35(2), 105-119. (in Persian with English abstract).
- Dekamin, M., & Barmaki, M. (2019). Implementation of material flow cost accounting (MFCA) in soybean production. *Journal of cleaner production*, 210, 459-465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.057>
- Dekamin, M., & Kheiralipour, K. (2023). Material and Energy Flow Cost Accounting (MEFCA) of Grape Production in Malayer City. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 37(3), 325-340. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jead.2023.80448.1174>
- Dekamin, M., Kheiralipour, K., & Afshar, R. K. (2022). Energy, economic, and environmental assessment of coriander seed production using material flow cost accounting and life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(55), 83469-83482. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21585-0>
- Dekamin, M., Sadeghimofrad, T., & Ahmadloo, A. (2024). Energy, economic, and environmental (3E) assessment of the major greenhouse crops: MFCA-LCA approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(14), 21894-21912. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32576-8>
- Dilay, Y., Özkan, A., & Gülcan, B. (2021). Energy input-output analysis of apple production in Turkey: A case study for Karaman province. *Erwerbs-Obstbau*, 63(4), 375-380. <https://doi.org/10.1007/s10341-021-00594-2>
- Dimitrijević, A., Blažin, S., Blažin, D., & Ponjičan, O. (2015). Energy efficiency of the tomato open filed and greenhouse production system. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 19(3), 132-135.
- Divya, J., & Belagali, S. L. (2012). Impact of chemical fertilizers on water quality in selected agricultural areas of Mysore district, Karnataka, India. *International journal of environmental sciences*, 2(3), 1449-1458.
- Elahi, E., Zhang, Z., Khalid, Z., & Xu, H. (2022). Application of an artificial neural network to optimise energy inputs: An energy-and cost-saving strategy for commercial poultry farms. *Energy*, 244, 123169. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123169>
- Elhami, B., Raini, M. G. N., Taki, M., Marzban, A., & Heidarisoltanabadi, M. (2021). Analysis and comparison

- of energy-economic-environmental cycle in two cultivation methods (seeding and transplanting) for onion production (case study: central parts of Iran). *Renewable Energy*, 178, 875-890. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.117>
- Esengun, K., Erdal, G., Gündüz, O., & Erdal, H. (2007). An economic analysis and energy use in stake-tomato production in Tokat province of Turkey. *Renewable Energy*, 32(11), 1873–1881. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.07.005>
- Ewaid, S. H., Abed, S. A., & Al-Ansari, N. (2019). Crop Water Requirements and Irrigation Schedules for Some Major Crops in Southern Iraq. *Water*, 11(4), 756. <https://doi.org/10.3390/w11040756>
- FAO, (2025). Food and Agriculture Organization. Available from: www.fao.org.
- Fathollahi, H., Mousavi-Avval, S. H., Akram, A., & Rafiee, S. (2018). Comparative energy, economic and environmental analyses of forage production systems for dairy farming. *Journal of Cleaner Production*, 182, 852-862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.073>
- Ghasemi-Mobtaker, H., Kaab, A., Rafiee, S., & Nabavi-Pelesarai, A. (2022). A comparative of modeling techniques and life cycle assessment for prediction of output energy, economic profit, and global warming potential for wheat farms. *Energy Reports*, 8, 4922-4934. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.184>
- Ghorbani, R., Mondani, F., Amirmoradi, S., Feizi, H., Khorramdel, S., Teimouri, M., ... & Aghel, H. (2011). A case study of energy use and economical analysis of irrigated and dryland wheat production systems. *Applied Energy*, 88(1), 283-288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.028>
- Harmanto, Salokhe, V. M., Babel, M. S., & Tantau, H. J. (2005). Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. *Agricultural Water Management*, 71(3), 225–242. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.003>
- Hatirli, S. A., Ozkan, B., & Fert, C. (2006). Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production. *Renewable Energy*, 31(4), 427–438. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.04.007>.
- Heidari, M. D., & Omid, M. (2011). Energy use patterns and econometric models of major greenhouse vegetable productions in Iran. *Energy*, 36(1), 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.048>
- Hercher-Pasteur, J., Loiseau, E., Sinfort, C., & Hélias, A. (2020). Energetic assessment of the agricultural production system. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00627-2>
- 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>
- IPCC (2006) Guidelines for national greenhouse gas inventories. In: ggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan. <<http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>>.
- IRIMO, 2024. *Iran Meteorological Organization*. www.irimo.ir
- ISO 14051, (2011). Environmental management -Material flow cost accounting - General framework. International Organization for Standardization, Geneva.
- Kamyab, H., SaberiKamarposhti, M., Hashim, H., & Yusuf, M. (2024). Carbon dynamics in agricultural greenhouse gas emissions and removals: a comprehensive review. *Carbon Letters*, 34(1), 265-289. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00647-4>
- Kuswardhani, N., Soni, P., & Shivakoti, G. P. (2013). Comparative energy input–output and financial analyses of greenhouse and open field vegetables production in West Java, Indonesia. *Energy*, 53, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.032>
- Ma, X., Yang, Y., Tan, Z., Cheng, Y., Wang, T., Yang, L., He, T., & Liang, S. (2024). Climate-Smart Drip Irrigation with Fertilizer Coupling Strategies to Improve Tomato Yield, Quality, Resources Use Efficiency and Mitigate Greenhouse Gases Emissions. *Land*, 13(11), 1872. <https://doi.org/10.3390/land13111872>
- MAJ, (2025). Ministry of Agriculture Jihad of Iran. Available from: www.maj.ir
- Manohar, B. H., Naik, B. K., Kulkarni, V. S., Kumar, B. N., & Venugopal, C. K. (2022). Estimation of Post-harvest Losses and their Management Strategies Adopted by the Vegetable Cultivators. 67(5), 703-709.
- Mobtaker, H. G., Akram, A., & Keyhani, A. (2012). Energy use and sensitivity analysis of energy inputs for alfalfa production in Iran. *Energy for sustainable development*, 16(1), 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.10.009>
- Moghaddam, P. R., Feizi, H., & Mondani, F. (2011). Evaluation of tomato production systems in terms of energy use efficiency and economical analysis in Iran. *Notulae Scientia Biologicae*, 3(4), 58-65.
- Mohammadshirazi, A., Akram, A., Rafiee, S., & Kalhor, E. B. (2015). On the study of energy and cost analyses



- of orange production in Mazandaran province. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 10, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.01.007>
- Nasirpour, S., Jahansouz, M. R., Moghadam, H., & Mohammadzadeh, A. (2023). Comparison of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Onion (*Allium cepa* L.) Production Systems in Terms of Energy and Economic Indicators, and Greenhouse Gas Emissions Potential (Case Study of Cities in Alborz Province). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(4), 137-153. (in Persian with English abstract)
- Ozkan, B., Ceylan, R. F., & Kizilay, H. (2011). Energy inputs and crop yield relationships in greenhouse winter crop tomato production. *Renewable energy*, 36(11), 3217-3221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.042>
- Pahlavan, R., Omid, M., & Akram, A. (2011). Energy use efficiency in greenhouse tomato production in Iran. *Energy*, 36(12), 6714-6719. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.038>
- Pandorf, M., Pourzahedi, L., Gilbertson, L., Lowry, G. V., Herckes, P., & Westerhoff, P. (2020). Graphite nanoparticle addition to fertilizers reduces nitrate leaching in growth of lettuce (*Lactuca sativa*). *Environmental Science: Nano*, 7(1), 127-138.
- Rodríguez, C. M., Rodas, C. F. R., Muñoz, J. C. C., & Casas, A. F. (2019). A multi-criteria approach for comparison of environmental assessment methods in the analysis of the energy efficiency in agricultural production systems. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1464-1471. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.388>
- Sheikhzeinoddin, A., Esmaeili, A. K., & Noshadi, M. (2016). Impact of irrigation and fertilization management strategies on nitrate leaching: using SWAT model. *Journal of Water and Soil Science*, 19(74), 141-156
- Singh, S., Singh, P., Singh, G., & Sandhu, A. (2024). Crop productivity and energy indices of tomato (*Solanum lycopersicum*) production under naturally-ventilated poly-house structures in north-western India. *Energy*, 134239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134239>
- Somnuek, S., Hong, Y., Kim, M., Lee, S., Baek, J., Kwak, K., ... & Lee, J. (2020). Assessment of water control model for tomato and paprika in the greenhouse using the Penman-Monteith model. *Journal of Bio-Environment Control*, 29(3), 209-218.
- Taki, M., Abdi, R., Akbarpour, M., & Mobtaker, H. G. (2013). Energy inputs-yield relationship and sensitivity analysis for tomato greenhouse production in Iran. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(1), 59-67.
- Tran, T. T., & Herzig, C. (2020). Material flow cost accounting in developing countries: A systematic review. *Sustainability*, 12(13), 5413. <https://doi.org/10.3390/su12135413>
- Unakıtan, G., & Aydın, B. (2018). A comparison of energy use efficiency and economic analysis of wheat and sunflower production in Turkey: A case study in Thrace Region. *Energy*, 149, 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.033>
- Yadav, R. K., Singh, R. P., Kumar, R., & Arya, R. (2024). Analysis of energy consumption in the maize fodder production system within the chosen Himalayan Tarai region. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(1S):146-149. <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i1Sc.353>
- Yelmen, B., Şahin, H. H., & Cakir, M. T. (2019). Energy efficiency and economic analysis in tomato production: a case study of Mersin province in the Mediterranean region. *Applied Ecology & Environmental Research*, 17(4), 7371-7379.
- Zangeneh, M., Omid, M., & Akram, A. (2010). A comparative study on energy use and cost analysis of potato production under different farming technologies in Hamadan province of Iran. *Energy*, 35(7), 2927-2933. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.024>