



Economic-Environmental Assessment of Hazelnut Production in Gilan Province: Material Flow Cost Accounting (MFCA)

Hossein Rezaei ^{1✉} | Majid Dekamin ² | Ashkan Nabavi-Pelesaraei ³

1. Corresponding Author, Department of Water and Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. h.rezaei@malayeru.ac.ir

2. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. Dekamin@malayeru.ac.ir

3. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. a.nabavi@razi.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 8, 2025

Revised: Sep. 7, 2025

Accepted: Sep. 22, 2025

Published online: Summer 2025

Keywords:

*Economic productivity,
Environmental sustainability,
Negative environmental
Production outputs,
Hazelnut,
Efficiency*

ABSTRACT

This study evaluates the economic and environmental performance of hazelnut production in Gilan Province using the Material Flow Cost Accounting (MFCA) method. The research compares traditional cost accounting (TCA) with MFCA, emphasizing that MFCA offers a more comprehensive assessment by considering the economic value of negative environmental outputs. The main product yield was 450 kg ha⁻¹ of hazelnuts. However, negative outputs included ammonia (NH₃) and nitrous oxide (N₂O) emissions, water pollution caused by nitrate and phosphate runoff, and the release of pesticides into the soil, water, and air. Additionally, 22 kg ha⁻¹ of hazelnuts were lost due to inefficiencies in the production process. The total cost of input resources was estimated at 242 \$ ha⁻¹, while the net income from hazelnut sales was 3341 \$ ha⁻¹. The cost of negative outputs, including emissions, runoff, and product loss, was calculated at 207 \$ ha⁻¹. Under the MFCA method, which incorporates these negative outputs into the calculations, the gross value of production (GVP) reached 3583 \$ ha⁻¹, compared to 3376 \$ ha⁻¹ under TCA, highlighting MFCA's ability to reflect a more accurate economic value of production. Similarly, gross returns (GR) and the benefit-cost ratio (BCR) were higher under MFCA, primarily due to accounting for the 207 \$ value of negative products. The results indicate that MFCA is an effective tool for identifying and reducing resource waste and increasing profitability, while simultaneously enhancing economic productivity and environmental sustainability in hazelnut production.

Cite this article: Rezaei, H, Dekamin, M., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2025). Economic-Environmental Assessment of Hazelnut Production in Gilan Province: Material Flow Cost Accounting (MFCA)., *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 56 (2), 69-89. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.398197.665601>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.398197.665601>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Agriculture, as one of the oldest and most fundamental human activities, continues to play a vital role in fulfilling the food and economic needs of societies. However, it also significantly impacts the environment through the extensive use of inputs like chemical fertilizers, pesticides, and fossil fuels, leading to environmental challenges such as greenhouse gas emissions, soil degradation, and water pollution. These issues are particularly relevant to Iran, where agriculture contributes significantly to the economy. Hazelnuts (*Corylus avellana* L.), one of the most important horticultural products, have extensive applications in various industries, including food processing, pharmaceuticals, and oil production. Iran, with over 23,535 hectares of hazelnut cultivation, is among the leading producers, particularly in Guilan Province, which plays a key role in both domestic consumption and export. However, hazelnut farming in this region faces several economic and environmental challenges, including inefficient use of agricultural inputs and the excessive consumption of energy, posing a threat to the sustainability of the industry. The study explores how integrating environmental costs into economic evaluations can provide more accurate assessments of agricultural systems and contribute to sustainable farming practices.

Method

The study was conducted in Guilan Province, located in northern Iran, a major hazelnut-producing region. The geographic area of the study is situated between longitudes 48°53' E to 50°34' E and latitudes 36°34' N to 38°27' N. To collect data, Cochran's sampling method was used, selecting 180 hazelnut farms for analysis. Primary data was gathered in 2019 through field interviews and questionnaires, covering variables such as land area, agricultural inputs (fertilizers, pesticides, machinery usage), hazelnut yield (kg ha^{-1}), and energy consumption. Material Flow Cost Accounting (MFCA), a methodology outlined in ISO 14051:2011, was employed to analyze the material and energy flows throughout the production process. MFCA differs from traditional cost accounting (TCA) by integrating both economic and environmental costs. The methodology accounts for material losses, emissions, and other environmental impacts, providing a more comprehensive evaluation of resource efficiency and economic performance.

Results

The results of the study revealed a primary output of 450.2 kg ha^{-1} of hazelnuts. However, negative environmental outputs such as ammonia (NH_3) and nitrous oxide (N_2O) emissions from fertilizers, pesticide runoff, and water pollution due to nitrogen and phosphate leaching were observed. These negative outputs contributed to the overall inefficiency of the production system. Furthermore, a total of 22.5 kg ha^{-1} of hazelnuts were lost due to production inefficiencies, indicating that resource utilization could be optimized to reduce waste. The total input cost of production was estimated at $242.8 \$ \text{ ha}^{-1}$, with the net income from hazelnut sales amounting to $13341 \$ \text{ ha}^{-1}$. However, when environmental costs were accounted for, including emissions and runoff, the cost of negative outputs was calculated at $207.1 \$ \text{ ha}^{-1}$. By incorporating these environmental costs, the Gross Value of Production (GVP) was calculated at $3583.8 \$ \text{ ha}^{-1}$ using MFCA, compared to $3376.7 \$ \text{ ha}^{-1}$ using traditional cost accounting (TCA). This shows that MFCA provides a more accurate and comprehensive economic assessment by integrating the environmental costs associated with agricultural production.

The study highlights the importance of considering negative environmental outputs as part of the cost structure in agricultural systems. By using MFCA, farmers can identify inefficiencies in resource usage and environmental impact, enabling them to adopt practices that reduce waste, lower production costs, and improve environmental sustainability. Recommendations include the adoption of precision agricultural technologies to optimize fertilizer and water usage, the use of organic fertilizers with lower environmental footprints, and the incorporation of renewable energy sources into farming practices.

Conclusions

This study demonstrates that MFCA can be an effective tool for improving both the economic performance and environmental sustainability of hazelnut production in Guilan Province. By incorporating the economic value of negative environmental outputs into the cost analysis, MFCA offers a complete and more accurate picture of the true costs of production. The results indicate that integrating environmental costs can improve profitability while also reducing the ecological impact of hazelnut farming. The study suggests several strategies for enhancing sustainability, including better resource management, adoption of organic farming practices, and investment in renewable energy. By adopting these strategies, farmers can improve their

economic outcomes while minimizing their environmental footprint. The findings of this study underscore the potential of MFCA to drive a shift towards more sustainable and profitable farming practices, benefiting both farmers and the environment.

Author Contributions

Conceptualization, Majid Dekamin and Hosein Rezaei; methodology, Majid Dekamin and Hosein Rezaei; software, Hosein Rezaei; validation, Ashkan Nabavi-pelesaraei ; formal analysis, Majid Dekamin and Hosein Rezaei; investigation, Ashkan Nabavi-pelesaraei; resources, Ashkan Nabavi-pelesaraei; data curation, Ashkan Nabavi-pelesaraei; writing—original draft preparation, Hosein Rezaei; writing—review and editing, Majid Dekamin; visualization, Hosein Rezaei; supervision, Hosein Rezaei; project administration, Ashkan Nabavi-pelesaraei; funding acquisition, Majid Dekamin. 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 would like to express their gratitude to the farmers of Guilan Province farmer's for their participation in this study. Special thanks to the research team and all the individuals who contributed to the data collection and analysis.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی اقتصادی-زیست محیطی تولید فندق در استان گیلان: هزینه‌یابی جریان مواد

حسین رضایی^۱ | مجید دکامین^۲ | اشکان نبوی پله سرائی^۳^۱ نویسنده مسئول، گروه علوم آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: h.rezaei@malayeru.ac.ir^۲ گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: Dekamin@malayeru.ac.ir^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: a.nabavi@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	این پژوهش به ارزیابی عملکرد اقتصادی و محیط زیستی تولید فندق در استان گیلان با استفاده از روش هزینه‌یابی جریان مواد (MFCA) می‌پردازد. در این مطالعه، تفاوت‌های بین هزینه‌یابی سنتی (TCA) و MFCA بررسی شده و تأکید می‌شود که MFCA با لحاظ کردن ارزش اقتصادی خروجی‌های منفی محیط زیستی، ارزیابی جامع‌تری ارائه می‌دهد. محصول اصلی، تولید ۱۴۵۰ kg ha ⁻¹ فندق بود، اما خروجی‌های منفی شامل انتشار گازهای آمونیاک (NH ₃) و اکسید نیترو (N ₂ O)، آلودگی آب ناشی از رواناب نیترات و فسفات، و انتشار آفت‌کش‌ها به خاک، آب و هوا نیز مشاهده شد. علاوه بر این، ۲۲ kg ha ⁻¹ فندق به دلیل ناکارآمدی در فرآیند تولید از دست رفت. هزینه کل منابع ورودی \$ ۱۲۴۲ ha ⁻¹ برآورد شد. درآمد خالص حاصل از فروش فندق برابر با \$ ۱۳۳۴۱ ha ⁻¹ بود. اما هزینه خروجی‌های منفی مانند انتشارها، رواناب‌ها و هدررفت محصول معادل \$ ۲۰۷ ha ⁻¹ محاسبه شد. در روش MFCA که خروجی‌های منفی را در محاسبات لحاظ می‌کند، ارزش ناخالص تولید (GVP) برابر با \$ ۱۳۵۸۳ ha ⁻¹ به دست آمد، در حالی که این مقدار در روش TCA معادل \$ ۱۳۳۷۶ ha ⁻¹ بود که نتیجه حاصل از روش MFCA بازتاب جامع‌تری از ارزش واقعی اقتصادی تولید است. به‌طور مشابه، بازده ناخالص (GR) و نسبت سود به هزینه (BCR در MFCA) بالاتر است که این موضوع عمدتاً به دلیل لحاظ کردن محصولات منفی به ارزش ۲۰۷ دلار است. نتایج نشان داد که MFCA ابزار موثری برای شناسایی و کاهش هدررفت منابع و بهبود سودآوری است. که می‌تواند به‌طور هم‌زمان بهره‌وری اقتصادی و پایداری محیط زیستی را در تولید فندق بهبود بخشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۱۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۳۱	
تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: بهره‌وری اقتصادی، پایداری محیط زیستی، خروجی‌های منفی محیط زیستی، فندق، کارایی تولید	

استناد: رضایی، حسین؛ دکامین، مجید؛ و نبوی پله سرائی، اشکان (۱۴۰۴). ارزیابی اقتصادی-زیست محیطی تولید فندق در استان گیلان: هزینه‌یابی جریان مواد، مجله

مهندسی بیوسیستم ایران/ ایران، ۵۶ (۲)، ۸۹-۶۹ <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.398197.665601>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.398197.665601>

مقدمه

کشاورزی به عنوان یکی از اصلی‌ترین و قدیمی‌ترین فعالیت‌های انسانی، همواره در مسیر تأمین نیازهای غذایی و اقتصادی جوامع بشری نقش اساسی ایفا کرده است. این بخش از فعالیت‌های انسانی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تأثیرات گسترده‌ای بر محیط‌زیست دارد. در فرآیند تولید محصولات کشاورزی، استفاده از نهاده‌هایی نظیر کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، سوخت‌های فسیلی و سایر مواد شیمیایی منجر به بروز مشکلات محیط زیستی فراوانی می‌شود که شامل انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی خاک و منابع آبی، و کاهش تنوع زیستی است (Afshar & Dekamin, 2022; Soheili-Fard et al., 2014). این مشکلات نه تنها موجب تهدید محیط‌زیست می‌شوند، بلکه اثرات منفی بر سلامت انسان و دیگر موجودات زنده دارند. از این‌رو، به‌ویژه در دهه‌های اخیر که با افزایش تقاضا برای تولید مواد غذایی مواجه هستیم، این چالش‌ها به یکی از بحران‌های جهانی تبدیل شده‌اند.

فندق (*Corylus avellana* L.) یکی از محصولات مهم باغی است که به‌دلیل ویژگی‌های اقتصادی و کاربردهای گسترده در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، داروسازی و تولید روغن، اهمیت زیادی دارد (Del Rio et al., 2011; Rondanelli et al., 2023). ایران با سطح زیرکشت بیش از ۵۳۵/۲۳ هکتار فندق، در میان تولیدکنندگان بزرگ فندق در جهان قرار دارد و استان گیلان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مناطق تولید این محصول، نقش کلیدی در تأمین نیازهای داخلی و صادرات فندق دارد (FAO, 2015). این استان با شرایط اقلیمی مناسب و خاک‌های حاصلخیز، یکی از قطب‌های اصلی تولید فندق در ایران محسوب می‌شود (Hosseinpour et al., 2013; Nabavi-Pelesaraei et al., 2013). با این حال، تولید فندق در این منطقه با چالش‌های محیط زیستی و اقتصادی نیز همراه است. مشکلاتی نظیر استفاده نادرست از نهاده‌های کشاورزی، مصرف زیاد انرژی در فرآیندهای تولید، و انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌شدت بر تولید فندق تأثیرگذار بوده و تهدیدی جدی برای پایداری این محصول باغی به‌شمار می‌آید (Nabavi-Pelesaraei et al., 2013).

چالش‌هایی که کشاورزی با آن‌ها روبه‌رو است، تنها محدود به جنبه‌های محیط زیستی نمی‌شود، بلکه تأثیرات اقتصادی و اجتماعی آن نیز به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، مشهود است. در بسیاری از نقاط جهان، کشاورزی همچنان وابسته به نهاده‌های گران‌قیمت و غیرقابل تجدید است که علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، به‌طور جدی در معرض تهدید منابع طبیعی قرار دارند. بنابراین، پایداری کشاورزی به‌عنوان یکی از اولویت‌های جهانی مطرح شده است و کشورها باید به‌طور مؤثری برای دستیابی به شیوه‌های تولید پایدار در کشاورزی تلاش کنند. در این راستا، سازمان‌های بین‌المللی نظیر سازمان خواربار جهانی (FAO) تأکید دارند که توسعه کشاورزی پایدار باید شامل چندین جنبه از جمله حفاظت از منابع طبیعی، بهبود بهره‌وری، ارتقای وضعیت اشتغال و تقویت اکوسیستم‌ها باشد (Savini Nicci et al., 2024; Unicef, 2024).

در دهه‌های اخیر، بسیاری از محققان و متخصصان کشاورزی به دنبال توسعه ابزارهایی هستند که به‌کمک آن‌ها بتوانند تأثیرات محیط زیستی و اقتصادی کشاورزی را ارزیابی کرده و بهبود بخشند. یکی از این ابزارها، ارزیابی چرخه حیات (LCA) است که امکان تحلیل اثرات محیط زیستی محصولات کشاورزی را از مرحله تولید تا مصرف فراهم می‌آورد. این روش علمی نه تنها به ارزیابی میزان مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها کمک می‌کند، بلکه باعث شفافیت در فرآیندهای تولید و مصرف می‌شود.

با وجود مطالعات ارزشمندی که تاکنون با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات در نظام‌های کشاورزی انجام شده است، همچنان خلأهای مهمی وجود دارد. نخست آنکه، اکثر پژوهش‌های مبتنی بر LCA اثرات محیط زیستی را در مقیاس منطقه‌ای یا جهانی گزارش می‌کنند، در حالی که کشاورزان در سطح محلی درک روشنی از این ندارند که کاهش این اثرات چه پیامدهای اقتصادی مستقیمی برای آن‌ها دارد. دوم آنکه، مطالعات موجود در زمینه تولید فندق - به‌ویژه در ایران - محدود و پراکنده بوده و عمدتاً بر جنبه‌های محیط زیستی تمرکز داشته‌اند و هزینه‌های پنهان اقتصادی ناشی از ناکارآمدی در مصرف نهاده‌ها، رواناب مواد مغذی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و افت محصول را به‌طور جامع بررسی نکرده‌اند. علاوه بر این، به‌کارگیری روش هزینه‌یابی جریان مواد در بخش کشاورزی هنوز بسیار محدود است و تاکنون مطالعه‌ای جامع درخصوص تولید فندق استان گیلان با این رویکرد انجام نشده است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف پرکردن این شکاف دانشی، برای نخستین بار به‌کارگیری MFCA را در تولید فندق استان گیلان دنبال می‌کند تا علاوه بر شناسایی بارهای محیط زیستی، هزینه‌های اقتصادی مرتبط با آن‌ها نیز برآورد شود. تبدیل اثرات منفی زیست‌محیطی به ارزش پولی، می‌تواند بینشی عملی برای کشاورزان و سیاست‌گذاران فراهم آورد و نشان دهد که بهبود کارایی منابع نه تنها منجر به کاهش اثرات محیط زیستی می‌شود، بلکه سودآوری اقتصادی را نیز افزایش می‌دهد.

هزینه‌یابی جریان مواد (MFCA) به عنوان یک ابزار حیاتی در مدیریت محیط زیستی و بهینه‌سازی منابع شناخته شده است، به ویژه در زمینه تولید کشاورزی (ISO, 2011). این روش از آن جهت متمایز است که فراتر از شیوه‌های حسابداری سنتی عمل می‌کند و هزینه‌های محیط زیستی ناشی از هدررفت و انتشار گازها را در ساختار هزینه تولید ادغام می‌کند. برخلاف سیستم‌های حسابداری سنتی که معمولاً تنها بر هزینه‌های مالی مستقیم تمرکز دارند، MFCA علاوه بر این هزینه‌ها، هزینه‌های محیط زیستی مرتبط با مصرف منابع و تولید هدررفت را لحاظ می‌کند. با پیوند دادن تأثیرات مالی هدررفت به جریان‌های فیزیکی مواد، این روش دیدی جامع‌تر از ناکارآمدی‌های تولید و تأثیرات محیط زیستی ارائه می‌دهد.

یکی از دلایل اصلی انجام این مطالعه، نیاز فزاینده به شیوه‌های کشاورزی پایدار در برابر تخریب روزافزون محیط زیست و کاهش منابع است. کشاورزی یکی از بخش‌های اصلی است که به چالش‌های محیط زیستی جهانی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف آب و تخریب خاک کمک می‌کند. تولید فندق، مانند سایر محصولات کشاورزی، نیازمند ورودی‌های قابل توجهی از مواد و انرژی است که اغلب با تولید هدررفت زیاد همراه است. با این حال، این ناکارآمدی‌ها در شیوه‌های کشاورزی سنتی معمولاً نادیده گرفته می‌شوند یا به درستی تحلیل نمی‌شوند. بنابراین، اعمال MFCA در تولید فندق می‌تواند بینش‌های اساسی را در مورد هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم تأثیرات محیط زیستی فراهم آورد و به کشاورزان کمک کند تا تصمیمات بهتری در زمینه استفاده از منابع بگیرند.

اهمیت انجام این مطالعه تنها در توانایی آن برای ارتقاء پایداری محیط زیستی نیست، بلکه ظرفیت آن برای بهبود کارایی اقتصادی تولید فندق نیز حائز اهمیت است. با شناسایی نقاطی از هدررفت مواد و انرژی، کشاورزان می‌توانند استراتژی‌های هدفمندی را اتخاذ کنند که هزینه‌های ورودی را کاهش داده و در عین حال بهره‌وری را حفظ یا حتی بهبود بخشند. به عنوان مثال، MFCA می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا جایی که از کودها یا آب به طور بیش از حد استفاده می‌شود را شناسایی کنند که این خود می‌تواند منجر به انتشار غیرضروری آلاینده‌ها و ضررهای مالی شود. با تمرکز بر این "نقاط داغ" هدررفت، کشاورزان می‌توانند شیوه‌های خود را بهینه کرده و هم هزینه‌های مواد و هم ردپای محیط زیستی خود را کاهش دهند که برای ترویج پایداری بلندمدت ضروری است.

پیشینه پژوهش

استفاده از LCA در محصولات مختلف کشاورزی نظیر سیب‌زمینی (Pishgar-Komleh et al., 2012) زیتون (Espadas-Aldana et al., 2019) فندق (Temizyurek-Arslan, 2023) و گوجه‌فرنگی (Kumar et al., 2024) باعث شده است که این ابزار به عنوان یک روش شناخته شده در ارزیابی اثرات محیط زیستی کشاورزی در سطح جهانی مطرح شود. با این حال، مطالعات LCA در زمینه تولید فندق، به ویژه در ایران، هنوز به طور کامل توسعه نیافته و نیازمند تحقیقات بیشتری است. اما مهمترین ایرادی که این روش ارزیابی دارد این است که اثرات محیط زیستی را در سطح منطقه ای و جهانی گزارش می‌کند و تولید کننده تنها با مقدار اثرات محیط زیستی آشنا می‌شود، اما دقیقاً نمی‌داند که جلوگیری از این انتشارها چه نفع اقتصادی برای او در سطح محلی دارد.

در راستای این چالش‌ها و با توجه به اهمیت روزافزون کشاورزی پایدار، استفاده از روش‌های نوین برای بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و مدیریت منابع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از این روش‌ها، هزینه‌یابی جریان مواد و انرژی (MFCA) است که در استاندارد بین‌المللی ایزو ۱۴۰۵۱ تعریف شده است. این روش به طور خاص به شناسایی و کاهش هدررفت منابع در فرآیندهای تولید کمک می‌کند. MFCA نه تنها به کشاورزان این امکان را می‌دهد که منابع خود را به طور بهینه مصرف کنند، بلکه از نظر اقتصادی نیز می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کمک کند (ISO 14051, 2011). مطالعات متعدد در صنایع مختلف نشان داده‌اند که استفاده از MFCA می‌تواند به طور مؤثری به بهبود عملکرد محیط زیستی و اقتصادی کمک کند.

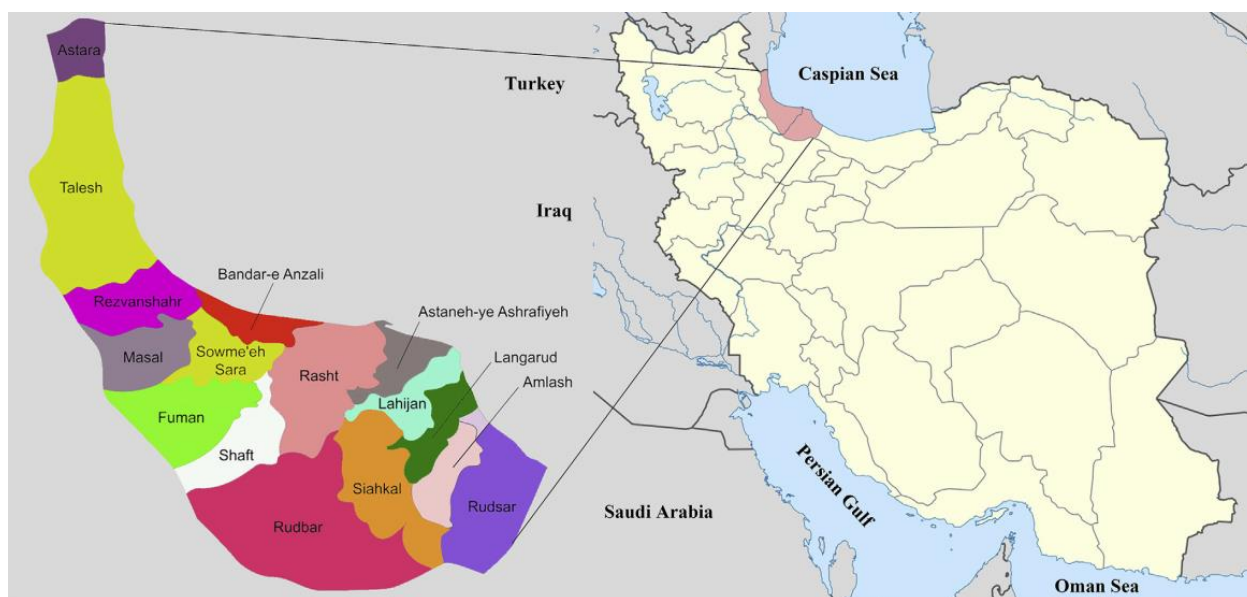
در کشاورزی، به ویژه در تولید محصولات استراتژیکی همچون فندق، استفاده از MFCA هنوز به طور گسترده در حال پیاده‌سازی نیست. با این حال، استفاده از این روش در کشاورزی محصولات دیگری نظیر کلزا (Dekamin, 2021)، چای (Dekamin et al., 2025)، چغندر (Yarahmadi et al., 2025)، سویا (Dekamin & Barmaki, 2019)، انگور (Dekamin & Kheiralipour, 2023)، ذرت (Dekamin et al., 2024) و محصولات گلخانه‌ای (Afshar & Dekamin, 2022) نشان داده است که این روش می‌تواند به طور مؤثری منابع را بهینه‌سازی کند و از هدررفت‌ها جلوگیری کند. با استفاده از MFCA، کشاورزان قادر خواهند بود که جریان‌های مواد و انرژی خود را شناسایی کرده و از روش‌های بهینه برای استفاده از این منابع بهره ببرند. به این ترتیب، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، اثرات محیط زیستی به طور قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

سطح زیر کشت فندق در ایران به‌طور مستمر در حال افزایش است و این محصول در کنار دیگر محصولات کشاورزی سهم قابل توجهی در اقتصاد این منطقه دارد. با توجه به اهمیت اقتصادی فندق، استفاده از MFCA در تولید آن می‌تواند به کاهش ناکارآمدی‌ها، بهینه‌سازی مصرف منابع و کاهش اثرات محیط زیستی کمک کند. این روش به‌عنوان یک ابزار کلیدی برای مدیریت منابع، می‌تواند به کشاورزان در جهت دستیابی به پایداری بلندمدت کمک کند و زمینه‌ساز بهبود بهره‌وری در تولید فندق شود.

هدف اصلی این مطالعه، به‌کارگیری MFCA برای اولین بار در تولید فندق استان گیلان است. این تحقیق به‌دنبال شناسایی هدررفت مواد و انرژی در فرآیند تولید فندق و ارائه روش‌هایی برای کاهش این هدررفت‌ها است. نوآوری اصلی این تحقیق، تمرکز بر هدررفت‌هایی است که کشاورزان قادر به کنترل آن‌ها هستند. با شفاف‌سازی ارزش اقتصادی این هدررفت‌ها، این مطالعه به‌دنبال ترغیب کشاورزان به اتخاذ اقداماتی برای کاهش هدررفت است که در نهایت موجب بهبود بهره‌وری و افزایش درآمد آن‌ها می‌شود. این تحقیق نه‌تنها به‌دنبال بهبود عملکرد اقتصادی کشاورزان است، بلکه با ارائه یک رویکرد عملی و مؤثر در بهبود پایداری تولید فندق، هدف نهایی خود را بر پایه کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری کشاورزان بنا نهاده است.

روش‌شناسی پژوهش

برای این مطالعه، استان گیلان در شمال ایران به‌عنوان منطقه جمع‌آوری داده‌ها انتخاب گردید. این استان در موقعیت جغرافیایی بین طول‌های جغرافیایی $48^{\circ} 53' E$ و $50^{\circ} 34' E$ و عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ} 34' N$ و $38^{\circ} 27' N$ واقع شده است (Nabavi-Pelesaraei et al., 2017). موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شمال ایران

برای تعیین حجم نمونه مناسب، از روش کوکران استفاده شد (Cochran, 1977). حجم نمونه برای فندق در جدول ۱ نشان داده شده است. داده‌های اولیه از طریق نمونه‌گیری تصادفی جمع‌آوری شد که شامل اطلاعاتی در مورد مساحت زمین استفاده‌شده توسط کشاورزان، متغیرهای ورودی کشاورزی (مانند مقادیر کود شیمیایی، آفت‌کش‌ها و غیره)، عملکرد فندق و همچنین داده‌هایی در مورد ماشین‌ها و تجهیزات مورد استفاده بود. داده‌ها در سال ۲۰۱۹ از طریق مصاحبه‌های حضوری و پرسشنامه‌ها جمع‌آوری شدند که اطمینان حاصل شد تا پاسخ‌های دقیق و جزئی بدست آید. این روش کمک کرد تا اطلاعات معتبر و دقیقی در مورد شیوه‌های کشاورزی و استفاده از ورودی‌ها برای تحلیل جمع‌آوری شود.

جدول ۱. جزئیات محاسبه حجم نمونه

محصول	تعداد جامعه آماری	حجم نمونه محاسبه شده توسط روش کوکران	تعداد واحدهای بررسی شده
فندق	۳۱۰	۱۷۱/۸	۱۸۰

هزینه‌یابی جریان مواد^۱

در این تحقیق، دو گام اصلی برای دستیابی به این اهداف برداشته شد. گام اول شامل بررسی دقیق فرآیند تولید فندق موجود، ارزیابی هدررفت مواد و مالی بود. این ارزیابی جامع هدفش کمی‌سنجی جریان‌های مواد، از جمله ورودی‌هایی مانند آب، کودها و انرژی و شناسایی مکان‌هایی بود که ناکارآمدی در آن‌ها رخ می‌دهد. با درک دامنه هدررفت مواد و تولید هدررفت در هر مرحله از فرآیند تولید، از کاشت تا برداشت، کشاورزان می‌توانند نقاطی را برای بهبود شناسایی کنند. به عنوان مثال، استفاده بیش از حد از کودها یا شیوه‌های آبیاری ناکارآمد می‌تواند به عنوان عوامل اصلی تولید هدررفت، هم از نظر تأثیرات محیط زیستی و هم از نظر هزینه‌های مالی شناسایی شود.

گام دوم این مطالعه بر شناسایی نقاط داغ مواد و انرژی در سیستم تولید فندق متمرکز بود. این نقاط داغ به مراحل یا شیوه‌هایی در فرآیند تولید اشاره دارند که در آن‌ها استفاده از منابع به طور غیرمتناسب با محصول تولیدی انجام می‌شود. با شناسایی این نقاط داغ، این مطالعه هدف دارد تا مؤثرترین و عملی‌ترین بهبودها را پیشنهاد دهد که می‌تواند به کاهش هدررفت مواد، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها کمک کند. به عنوان مثال، بهبود کارایی آبیاری، بهینه‌سازی کاربرد کودها، یا استفاده از منابع انرژی جایگزین برای ماشین‌ها کشاورزی می‌تواند استراتژی‌های بالقوه‌ای برای کاهش این نقاط داغ باشد. این بهبودها نه تنها ردپای محیط زیستی کشت فندق را کاهش می‌دهند بلکه منجر به صرفه‌جویی‌های مالی نیز می‌شوند و انگیزه اقتصادی برای کشاورزان ایجاد می‌کند تا شیوه‌های پایدارتری را اتخاذ کنند.

علاوه بر مزایای محیط زیستی، کاهش هدررفت و انتشار آلاینده‌ها از طریق MFCA می‌تواند مزایای مالی قابل توجهی نیز داشته باشد. با بهینه‌سازی جریان‌های مواد و کاهش هدررفت، کشاورزان می‌توانند هزینه‌های ورودی خود را کاهش دهند، بهره‌وری را افزایش دهند و در نهایت سودآوری عملیات خود را بهبود بخشند. این دو منفعت از پایداری محیط زیستی و کارایی اقتصادی، MFCA را به ابزاری ارزشمند برای شیوه‌های کشاورزی مدرن، به ویژه در مناطقی مانند شمال ایران که تولید فندق نقش حیاتی در اقتصاد محلی دارد، تبدیل می‌کند.

در نتیجه، پذیرش MFCA در تولید فندق می‌تواند به پر کردن شکاف بین پایداری محیط زیستی و سودآوری اقتصادی کمک کند. با شناسایی نقاط داغ مواد و انرژی و ارائه گزینه‌های بهبود هدفمند، این مطالعه هدف دارد تا به هدف گسترده‌تری از کشاورزی پایدار کمک کند که هم کشاورزان و هم محیط زیست از آن بهره‌مند شوند. ادغام هزینه‌های محیط زیستی در فرآیند تولید نه تنها به کاهش ردپای کربن و نیتروژن کمک می‌کند بلکه از تلاش‌های جهانی برای شیوه‌های کشاورزی پایدارتر و کارآمدتر منابع پشتیبانی می‌کند.

مقایسه بین هزینه‌یابی جریان مواد (MFCA) و حسابداری سنتی هزینه‌ها (TCA)

درک تفاوت‌های بین سیستم‌های MFCA و TCA چند جنبه کلیدی را آشکار می‌کند که تأثیرات زیادی بر تصمیم‌گیری، بهینه‌سازی منابع و پایداری در یک سازمان دارند. در این بخش، تفاوت‌های اصلی این دو سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد و خلاصه‌ای از این تفاوت‌ها در جدول ۲ ارائه شده است (ISO, 2011).

جدول ۲. مقایسه بین هزینه‌یابی جریان مواد (MFCA) و حسابداری سنتی هزینه‌ها (TCA) (ISO, 2011).

هزینه‌یابی جریان مواد (MFCA)	حسابداری سنتی هزینه‌ها (TCA)	
هدررفت به عنوان یک شیء هزینه جداگانه در نظر گرفته می‌شود.	هدررفت به عنوان بخشی از هزینه‌های عمومی در نظر گرفته می‌شوند.	مدیریت هدررفت‌ها
هزینه‌ها به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: هزینه‌های مواد، هزینه‌های انرژی و هزینه‌های سیستم.	هزینه‌ها به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: مواد مستقیم، نیروی کار مستقیم و هزینه‌های عمومی.	طبقه‌بندی هزینه‌ها
هزینه‌های محیط زیستی به‌طور جداگانه شناسایی و گزارش می‌شوند.	هزینه‌های محیط زیستی در هزینه‌های عمومی مخفی و شفافیت ندارند.	رویکرد هزینه‌های محیط زیستی
تأکید قوی بر کاهش هدررفت و بهینه‌سازی منابع دارد.	تمرکز کمتری بر کاهش هدررفت و بهینه‌سازی منابع دارد.	تأکید بر بهینه‌سازی منابع و کاهش هدررفت
اطلاعات دقیق‌تری در مورد هدررفت و جریان‌های مواد ارائه می‌شود.	هدررفت و استفاده از منابع به‌طور غیرمستقیم در هزینه‌های عمومی گزارش می‌شود.	شفافیت و گزارش‌دهی
تمرکز بر شناسایی و مدیریت هدررفت برای بهبود کارایی است.	تمرکز اصلی بر تعیین هزینه محصولات و تصمیمات اقتصادی است.	مدیریت هزینه‌ها و تصمیم‌گیری
تمرکز بر پایداری و کارایی که به بهبود فرآیندهای تولید کمک می‌کند.	تمرکز کمتری بر پایداری؛ عمدتاً به جنبه‌های مالی توجه دارد.	تأثیر بر پایداری و کارایی

مراحل اجرای هزینه یابی جریان مواد

طبق استانداردهای ISO 14051، محصولات به دو گروه مجزا تقسیم می‌شوند: محصولات مثبت و منفی. محصولات مثبت به آن دسته از محصولاتی اطلاق می‌شود که قرار است از طریق فرآیند تولید شوند و هدف اصلی فعالیت تولید را برآورده کنند. در مقابل، محصولات منفی به هدررفت و انتشاراتی اطلاق می‌شود که به عنوان محصولات جانبی از فرآیند تولید به وجود می‌آیند. این محصولات منفی ارزشی به تولید اضافه نمی‌کنند و می‌توانند تأثیرات منفی بر محیط زیست داشته باشند، از جمله آلودگی و تخریب منابع طبیعی. تفکیک محصولات به دسته‌های مثبت و منفی برای شناسایی ناکارآمدی‌ها و بارهای محیط زیستی در سیستم تولید بسیار ضروری است (ISO, 2011).

روش MFCA به کشاورزان کمک می‌کند تا رابطه بین این دو دسته از محصولات را بهتر درک کنند، از طریق پیگیری جریان مواد و انرژی در تمام فرآیند تولید. این روش کمک می‌کند تا نه تنها هزینه‌های مرتبط با محصولات مثبت بلکه هزینه‌های مرتبط با محصولات منفی مانند هدررفت و انتشار گازها نیز محاسبه شود. با شناسایی و محاسبه این هزینه‌های محیط زیستی، MFCA تصویری واضح از مکان‌های ناکارآمدی ارائه می‌دهد و نحوه رسیدگی به آن‌ها را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، کاهش هدررفت و انتشار آلاینده‌ها به طور مستقیم هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و پایداری کلی فرآیند را بهبود می‌بخشد. بنابراین، دسته‌بندی محصولات مثبت و منفی برای مدیریت مؤثر جریان مواد و کاهش تأثیرات محیط زیستی بسیار حیاتی است (Dekamin et al., 2025).

فرآیند MFCA خود به چندین مرحله تقسیم می‌شود که در هر یک از مراحل چرخه بهبود مستمر برنامه‌ریزی-انجام-بررسی-عمل (PDCA) اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌دهد (شکل ۲). چرخه PDCA به عنوان چارچوبی شناخته شده برای هدایت بهبود مستمر در فرآیندهای عملیاتی مختلف، از جمله مدیریت محیط زیستی، مطرح است. با هم‌راستاسازی فرآیند MFCA با چرخه PDCA، کشاورزان می‌توانند سیستم‌های تولید خود را به طور سیستماتیک ارزیابی کرده و بهبود بخشند. هر فاز از این چرخه هدف خاصی را دنبال می‌کند: برنامه‌ریزی: در فاز برنامه‌ریزی، جریان‌های مواد ترسیم شده و تحلیل دقیقی از فرآیند تولید موجود انجام می‌شود. این مرحله به شناسایی ورودی‌های اصلی مواد، محصولات تولید شده و هدررفت کمک می‌کند و پایه‌ای برای درک ساختار هزینه محصولات مثبت و منفی فراهم می‌آورد تا اهداف هدفمند در مراحل بعدی چرخه تعیین شوند.

انجام: در فاز "انجام"، بهبودهای شناسایی شده پیاده‌سازی می‌شوند. این ممکن است شامل بهینه‌سازی مصرف منابع، بهبود فرآیندهای تولید یا پذیرش فناوری‌های جدید برای کاهش هدررفت و انتشار گازها باشد. به عنوان مثال، کشاورزان ممکن است سیستم‌های آبیاری کارآمدتری را پیاده‌سازی کنند یا از کودهای کم‌خطرتر استفاده کنند که منجر به کاهش محصولات منفی (هدررفت و گازهای گلخانه‌ای) می‌شود.

بررسی: در فاز "بررسی"، نتایج بهبودهای اعمال شده پیگیری و ارزیابی می‌شوند. اثر بخشی این اقدامات با مقایسه عملکرد واقعی با اهداف تعیین شده سنجیده می‌شود. این شامل پیگیری تغییرات در کاهش هدررفت، مصرف انرژی و کارایی مواد است. در این مرحله داده‌ها در مورد کاهش محصولات منفی (مانند انتشار گازها یا هدررفت) با مقایسه با اندازه‌گیری‌های پایه از فاز برنامه‌ریزی بررسی می‌شود. عمل: در فاز "عمل"، تصمیم‌گیری‌ها بر اساس نتایج فاز "بررسی" انجام می‌شود. اگر بهبودها به نتایج مطلوب منجر شده باشند، این تغییرات استاندارد شده و جزئی از عملیات روزمره می‌شوند. اگر هنوز شکاف‌ها یا ناکارآمدی‌هایی وجود داشته باشد که باید به آن‌ها رسیدگی شود، تنظیمات بیشتری انجام می‌شود و چرخه دوباره آغاز می‌شود.

چارچوب کلی برای پیاده‌سازی MFCA که با چرخه PDCA هم‌راستا است، به عنوان یک فرآیند پویا و تکراری عمل می‌کند که به بهبود مستمر و بهینه‌سازی سیستم تولید تشویق می‌کند. با تجزیه و تحلیل مستمر جریان‌های مواد، ارزیابی هزینه‌ها و بهبود شیوه‌ها، متدولوژی MFCA فرهنگ مسئولیت‌پذیری محیط زیستی و کارایی منابع را تقویت می‌کند (ISO, 2011).

شکل ۲ چارچوبی را ترسیم می‌کند که چگونگی پیوند هر مرحله از MFCA به مرحله بعدی و ایجاد چرخه‌ای از بهبود مستمر را نشان می‌دهد. این هم‌راستاسازی با چرخه PDCA نه تنها اطمینان حاصل می‌کند که تأثیرات محیط زیستی به طور منظم ارزیابی می‌شوند، بلکه از ادغام شیوه‌های مقرون به صرفه و پایدار در فرآیند تولید نیز پشتیبانی می‌کند. استفاده منظم از این فرآیند به کشاورزان و تولیدکنندگان کمک می‌کند تا هم ردپای محیط زیستی و هم هزینه‌های عملیاتی خود را کاهش دهند و در عین حال بهره‌وری خود را بهبود بخشند. فرآیند MFCA، هنگامی که با چرخه PDCA هم‌راستا شود، رویکردی ساختاریافته و مؤثر برای شناسایی ناکارآمدی‌ها در محصولات مثبت و منفی فراهم می‌آورد. با تأکید بر کاهش هدررفت و انتشار گازهای گلخانه‌ای، این متدولوژی از شیوه‌های کشاورزی پایدار حمایت می‌کند و به سازمان‌ها این امکان را می‌دهد که عملکرد محیط زیستی و کارایی هزینه‌ای خود را بهبود بخشند. این رویکرد به ویژه در کشاورزی

اهمیت دارد، جایی که استفاده از منابع و تأثیرات محیط زیستی می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر نتایج اقتصادی و پایداری محیط زیستی تأثیر بگذارد.



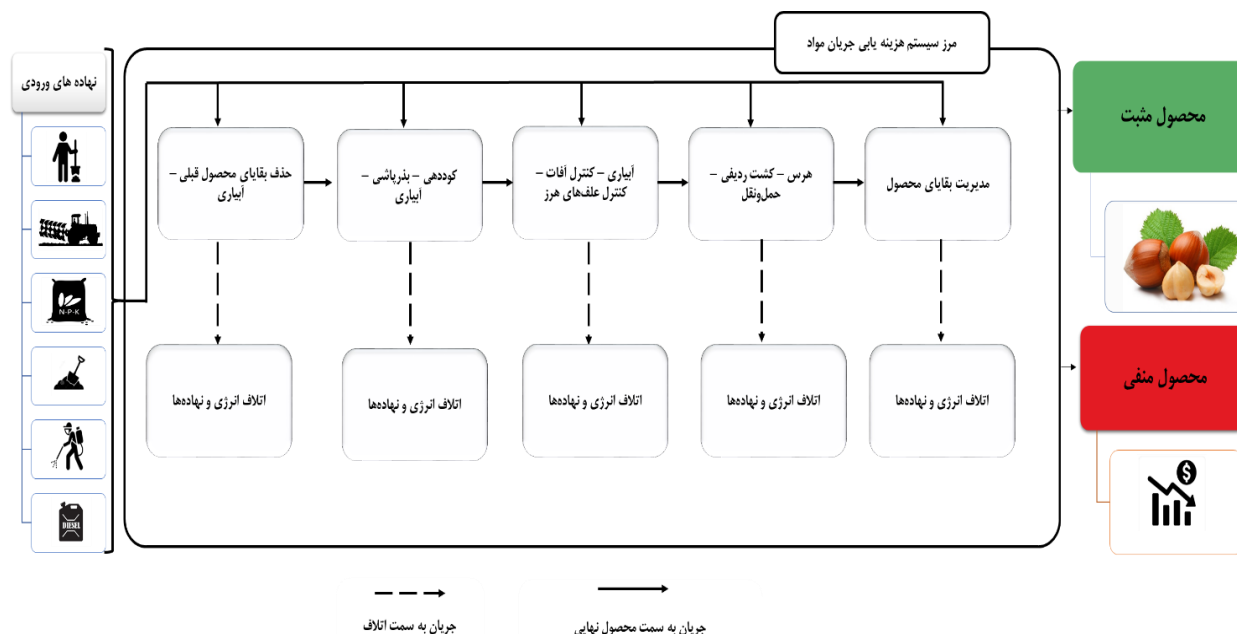
شکل ۲. چرخه برنامه‌ریزی-انجام-بررسی-عمل (PDCA) برای هزینه‌یابی جریان مواد MFCA

مرکز کمی و مرز سیستم

در این تحقیق، مرکز کمی (QC) به عنوان یک بخش مجزا از فرآیند تولید تعریف شد که در آن ورودی‌ها و خروجی‌ها، از جمله مواد، انرژی و هزینه‌های مرتبط با آن‌ها، به صورت فیزیکی و مالی اندازه‌گیری می‌شوند (ISO, 2011). مفهوم QC برای روش‌شناسی MFCA حائز اهمیت است زیرا پایه‌گذار ساختاری برای جمع‌آوری و تحلیل سیستماتیک داده‌ها در چارچوب جریان‌های مواد و انرژی است. QC به عنوان واحد تحلیل عمل می‌کند که به جداسازی و ارزیابی مصرف منابع، انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید هدررفت و خروجی محصولات در مراحل خاص از فرآیند تولید کمک می‌کند. این رویکرد امکان درک روشن‌تری از چگونگی استفاده از منابع را فراهم می‌کند و به شناسایی نواقص و نقاط قابل بهبود می‌پردازد. هر QC نمایانگر یک مرحله یا گام در فرآیند تولید است که در آن ورودی‌های مواد و انرژی به خروجی‌هایی تبدیل می‌شوند. دلیل شناسایی این مراحل به عنوان QC ها، تسهیل در بررسی دقیق ورودی‌ها و خروجی‌های خاص مرتبط با هر مرحله از تولید فندق است. با اندازه‌گیری این عوامل به صورت فیزیکی و مالی، امکان تحلیل جامع هزینه‌ها و تأثیرات محیط زیستی در هر مرحله وجود دارد که برای بهینه‌سازی سیستم تولید کلی حائز اهمیت است.

در این مطالعه، ویژگی قابل توجه این بود که محصولات میانه‌ای مشخصی بین مراحل مختلف تولید فندق وجود نداشت. همچنین، مرزهای بین مراحل تولید از نظر خروجی‌های محصول به وضوح تعریف نشده بودند. بنابراین، فرآیند تولید فندق به‌طور کلی به عنوان یک QC در نظر گرفته شد که تمام مراحل از پیش‌کاشت تا برداشت را در بر می‌گرفت. این رویکرد تحلیل را ساده‌تر می‌کند و امکان مشاهده جامع‌تری از سیستم تولید کل را فراهم می‌آورد. به جای تمرکز بر مراحل جداگانه به صورت ایزوله، این مدل یکپارچه QC اطمینان حاصل می‌کند که به هم‌پیوندگی مراحل مختلف در نظر گرفته شده و تأثیرات تجمعی مصرف مواد و انرژی، و همچنین تولید هدررفت به صورت یکپارچه ارزیابی شود.

در مرزهای سیستم MFCA، ورودی‌ها و خروجی‌ها برای QC به وضوح شناسایی شدند (شکل ۳). ورودی‌ها شامل انواع منابع کشاورزی و انرژی مانند آب، کودها، آفت‌کش‌ها، نیروی کار و سوخت برای ماشین‌ها بودند. خروجی‌ها شامل محصول اصلی (فندق)، همراه با انتشار گازهای گلخانه‌ای، هدررفت و محصولات جانبی تولید شده در طول فرآیند تولید بودند.



شکل ۳. مرز سیستم MFCA برای تولید فندق

شناسایی ورودی‌ها و خروجی‌ها و کمی‌سازی جریان مواد

مقدار ورودی‌ها و خروجی‌ها برای تولید فندق به واحدهای فیزیکی مانند لیتر آب، کیلوگرم کود یا کیلووات ساعت انرژی اندازه‌گیری شد که امکان تفکیک دقیق جریان‌های مواد و انرژی در سیستم را فراهم کرد. پس از تعیین مقادیر فیزیکی ورودی‌ها و خروجی‌ها، گام بعدی تحلیل هزینه‌های مرتبط با آن‌ها بود. واحدهای فیزیکی هر ورودی و خروجی به یک واحد هزینه‌ای تبدیل شدند، مانند ارزش پولی یا هزینه به ازای هر واحد تولید. این تبدیل اهمیت زیادی دارد زیرا امکان مقایسه روشن‌تری از ارزش ورودی‌ها (مانند هزینه آب، کود، نیروی کار) در مقابل ارزش خروجی‌ها (مانند قیمت فندق‌ها و هزینه‌های انتشار یا دفع هدررفت) را فراهم می‌کند. با محاسبه تعادل هزینه برای QC، اطمینان حاصل شد که ارزش کل خروجی‌ها، با در نظر گرفتن تغییرات انرژی در داخل QC، معادل ورودی‌های مصرفی است. این تعادل هزینه برای چارچوب MFCA اساسی است زیرا به ارزیابی کارایی هر مرحله از تولید کمک می‌کند و نقاطی را که می‌توان با بهینه‌سازی جریان‌های مواد یا کاهش هدررفت هزینه‌ها را کاهش داد، برجسته می‌کند.

اجرای این روش‌شناسی به‌ویژه در تولید فندق اهمیت دارد، زیرا ناکارآمدی‌ها در استفاده از منابع و تولید هدررفت می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر نتایج اقتصادی و محیط زیستی داشته باشند. تولید فندق نیازمند ورودی‌های قابل توجهی است، مانند آب برای آبیاری، کود برای بهبود خاک و انرژی برای ماشین‌ها. با این حال، این منابع اغلب منجر به تولید محصولات منفی قابل توجهی می‌شوند که شامل هدررفت و انتشار گازهای گلخانه‌ای است که به تخریب محیط‌زیست کمک می‌کنند. با تحلیل جریان‌های مواد و انرژی در QC، این مطالعه فرصت شناسایی مراحل فرآیند را که بیشترین هدررفت یا بیشترین منابع را مصرف می‌کنند، فراهم می‌آورد. این بینش می‌تواند منجر به بهبودهای هدفمند مانند بهینه‌سازی روش‌های آبیاری برای کاهش مصرف آب یا اتخاذ شیوه‌های پایدارتر برای کوددهی و کنترل آفات شود.

تصمیم به در نظر گرفتن کل فرآیند تولید به عنوان یک QC بر اساس ماهیت تولید فندق اتخاذ شد، جایی که ورودی‌ها و خروجی‌های منابع به طور مداوم در طول چرخه جریان دارند بدون جدایی‌های واضح بین مراحل. این رویکرد، بازتاب دقیق‌تری از دینامیک‌های کلی مواد و انرژی در کشاورزی فندق فراهم می‌کند و به اطمینان از این که تأثیرات محیط زیستی و هزینه‌ای کل فرآیند مورد توجه قرار می‌گیرد، کمک می‌کند. با ارزیابی کل سیستم تولید به عنوان یک QC، این مطالعه درک جامع‌تری از جریان‌های مواد و هزینه‌های مرتبط ارائه می‌دهد و به استراتژی‌های بهبود کارایی و کاهش اثرات محیط زیستی تولید فندق کمک می‌کند.

در خلاصه، رویکرد QC در چارچوب MFCA یک روش تحلیلی دقیق و ساختاری برای بررسی مصرف منابع، تولید هدررفت و هزینه‌های مرتبط با تولید فندق فراهم می‌کند. با در نظر گرفتن کل فرآیند تولید به عنوان یک QC، این مطالعه هدف دارد تا تحلیلی یکپارچه از جریان‌های مواد و انرژی ارائه دهد و نقاط ناکارآمدی و فرصت‌های بهبود را شناسایی کند. این رویکرد نه تنها به کاهش هدررفت

و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، بلکه به شیوه‌های کشاورزی پایدارتر که می‌توانند هزینه‌ها را کاهش دهند و کارایی کلی تولید را بهبود بخشند، نیز کمک می‌کند.

موجودی برای تولید فندق

تحلیل موجودی نقش حیاتی در درک تأثیرات محیط زیستی فرایندهای کشاورزی دارد. این فرآیند شامل ایجاد یک موجودی جریان برای یک محصول است که به طور سیستماتیک تمام ورودی‌های انرژی، مواد خام و انتشار گازها به هوا، آب و خاک در طول فرآیند تولید را حساب می‌کند. در زمینه تولید فندق، تحلیل موجودی برای ردیابی حرکت منابع و انتشار گازهای محیط زیستی مرتبط از نقطه ورودی تا خروجی‌های سیستم استفاده می‌شود. این مدل جریان با جمع‌آوری داده‌های مرتبط با ورودی‌ها و خروجی‌ها در داخل مرزهای سیستم تعریف شده ساخته می‌شود که شامل تمام فعالیت‌های مربوط به تولید فندق است (Bianco & Blengini, 2019).

برای تحلیل جامع، مرزهای سیستم به وضوح تعریف می‌شوند که این امکان را فراهم می‌آورد تا تفاوت بین انتشار گازهایی که به طور مستقیم به فرآیند تولید در مزرعه مربوط می‌شوند (انتشارهای داخل مزرعه) و گازهایی که به فعالیت‌ها یا ورودی‌های خارجی مرتبط هستند (انتشارهای خارج مزرعه) مشخص شود.

انتشارهای داخل مزرعه به تأثیرات محیط زیستی مستقیم فعالیت‌هایی اشاره دارد که در مرزهای باغ تولید فندق انجام می‌شود. این انتشارها شامل گازهای منتشر شده از ماشین‌ها کشاورزی، کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها هستند. انتشارهای داخل مزرعه بخش مهمی از تأثیرات محیط زیستی کلی هستند و بر اساس عوامل انتشار که به فعالیت‌های خاص کشاورزی مرتبط هستند، محاسبه و طبقه‌بندی می‌شوند.

کودهای شیمیایی یک منبع اصلی انتشارهای داخل مزرعه هستند. این کودها گازهایی مانند اکسید نیتروز (N_2O)، یک گاز گلخانه‌ای قدرتمند، را به هوا و آلاینده‌هایی را به آب و خاک وارد می‌کنند. عوامل انتشار برای کودها بستگی به نوع و مقدار کود مصرفی دارند و این عوامل با ضرب کردن مقدار کود مصرفی در عوامل انتشار مربوطه محاسبه می‌شوند. مشابه آن، استفاده از آفت‌کش‌ها که شامل سموم دفع آفات و علف‌کش‌ها می‌شود، نیز منجر به انتشار گازهایی به هوا، آب و خاک می‌شود. این انتشارها می‌توانند به محیط زیست اطراف، به‌ویژه به اکوسیستم‌های آبی و سلامت خاک آسیب برسانند. عوامل انتشار برای آفت‌کش‌ها در این مطالعه با استفاده از مدل PestLCI 2.0 (Dijkman et al., 2012) محاسبه شده‌اند که به‌طور خاص برای کاربردهای کشاورزی طراحی شده و امکان برآورد دقیق انتشارها مرتبط با استفاده از آفت‌کش‌ها در تولید فندق را فراهم می‌آورد (Renaud-Gentié et al., 2015). عوامل انتشار برای کودها و آفت‌کش‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است، که ضرایب مربوطه امکان محاسبه انتشارها بر اساس مقادیر ورودی را فراهم می‌کنند.

جدول ۳. ضرایب تخمین آلاینده‌های باغی در سیستم‌های تولید فندق

منابع	ضریب (نتیجه انتشار)	مشخصه
انتشار کودهای شیمیایی		
IPCC (2006)		
	(to air) $\cdot 10^{-1}$	۱ $\left[\frac{kg \ N_2O - Nitrogen}{kg \ Nitrogen_{in \ fertilizer \ applied}} \right]$
	(to air) $\cdot 10^{-1}$	۲ $\left[\frac{kg \ NH_3 - Nitrogen}{kg \ Nitrogen_{in \ fertilizer \ applied}} \right]$
	(to air) $\cdot 10^{-1}$	۳ $\left[\frac{kg \ N_2O - Nitrogen}{kg \ Nitrogen_{in \ atmpospheric \ deposition}} \right]$
	(to water) $\cdot 10^{-1}$	۴ $\left[\frac{kg \ NO_3^- - Nitrogen}{kg \ Nitrogen_{in \ fertilizer \ applied}} \right]$
	(to water) $\cdot 10^{-1}$	۵ $\left[\frac{kg \ Phosphate \ emission}{kg \ Phosphate_{in \ fertilizer \ applied}} \right]$
	(to air) $\cdot 10^{-1}$	۶ $\left[\frac{kg \ NO_x}{kg \ N_2O_{from \ fertilizer \ and \ soil}} \right]$

تبدیل انتشار گازهای گلخانه ای		
۱	Conversion from kg CO ₂ - Carbon to kg CO ₂	$\left(\frac{44}{12}\right)$
۲	Conversion from kg N ₂ O - Nitrogen to kg N ₂ O	$\left(\frac{44}{28}\right)$
۳	Conversion from kg NH ₃ - Nitrogen to kg CO ₂	$\left(\frac{17}{14}\right)$
۴	Conversion from kg Nitrate (NO ₃) - Nitrogen to kg CO ₂	$\left(\frac{62}{14}\right)$
۵	Conversion from kg P ₂ O ₅ to kg Phosphorous	$\left(\frac{62}{164}\right)$
انتشار آفت کش ها		
۱	$\left[\frac{\text{kg effective material}}{\text{kg biocides}} \right]$	(to soil) • γ
۲	$\left[\frac{\text{kg effective material}}{\text{kg biocides}} \right]$	Based on PestLCI 2.0 (to air) (Dijkman et al., 2012)
۳	$\left[\frac{\text{kg effective material}}{\text{kg biocides}} \right]$	Based on PestLCI 2.0 (to water) (Dijkman et al., 2012)

تصمیم‌گیری برای تولید محصولات زراعی مستلزم ملاحظات مالی است. از این‌رو، برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌ها، داده‌های جریان مواد بایستی به واحدهای پولی تبدیل شود. برای رسیدن به این مهم، همه هزینه‌های ایجادشده به‌وسیله جریان‌های مواد و یا همراه با آنچه وارد مرکز کمی می‌شوند و آنجا را ترک می‌کنند، بایستی کمی و به جریان‌های مواد مذکور تخصیص داده شود. بر اساس استاندارد ایزو ۱۴۰۵۱، مجموع ورودی انرژی/مواد ($M_{pi,wi(in)}$)، مقدار محصولات مثبت ($M_{pi(in)}$) و منفی ($M_{wi(in)}$) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Dekamin & Barmaki, 2019).

$$\sum M_{pi,wi(in)} = \sum_{i=1}^p M_{pi(in)} + \sum_{i=1}^w M_{wi(in)} \quad \text{رابطه ۱}$$

سهام انرژی و مواد در مرکز کمی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$Cost_i^{sp} = Cost_i^M + Cost_i^{ENGY} + Cost_i^{SYS} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه ۲، عبارت $Cost_i^{sp}$ کل هزینه/انرژی تولید فندق در فرایند i است. در این رابطه، عبارت $Cost_i^M$ هزینه/انرژی ماده m که در فرایند i موردنیاز است می‌باشد که بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد:

$$Cost_i^{MAT} = \sum_{m=1}^M Cost_{i,m} M_{i,m} \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳، عبارت $Cost_{i,m}$ واحد هزینه/انرژی ماده m ، عبارت $M_{i,m}$ مقدار موردنیاز از ماده m در فرایند i است. به همین ترتیب عبارت $Cost_i^{ENGY}$ با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$Cost_i^{Energy} = \sum_{e=1}^E Cost_{i,e} E_{i,e} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه ۴، عبارت $Cost_{i,e}$ واحد هزینه/انرژی نوع e و پارامتر $E_{i,e}$ مقدار انرژی نوع e که در فرایند i نیاز است. هزینه نیروی انسانی که در رابطه ۲ با $Cost_i^{SYS}$ نشان داده شده است با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$Cost_i^{SYS} = \sum_{l=1}^L Cost_{i,l} L_{i,l} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این رابطه، پارامتر $Cost_{i,l}$ هزینه واحد نیروی انسانی و پارامتر $L_{i,l}$ نیروی انسانی موردنیاز در فرایند i است. معادله انتشار آمونیاک از کودهای دامی مایع با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد (Nemecek et al., 2016):

$$NH_{3s} = 17/14 \times (-9.5 + 19.4 \times TAN + 1.1 \times SD_m) \times (0.0214 \times S + .358) A_s \quad \text{رابطه ۶}$$

NH_3 در اینجا انتشار آمونیاک از کود دامی مایع برحسب کیلوگرم آمونیاک در هکتار است. TAN کل آمونیوم در کود دامی برحسب کیلوگرم در هکتار، S کمیت کود دامی منتشرشده در هکتار برحسب مترمکعب در هکتار، SD_m کسری اشباع در ماده m و A_s نسبت کل سطح پاشش به سطح مزرعه برحسب درصد است. لازم به ذکر است که وزن ویژه کود دامی یک تن در مترمکعب در نظر گرفته شد (Nemecek et al., 2016).

انتشار کود دامی جامد با استفاده از رابطه ۷ معادله محاسبه شد (Nemecek et al., 2016):

$$NH_{3m} = 17/14 \times (0.787 \times TAN \times M + 0.757) \times 0.75 \times A_m \quad \text{(رابطه ۷)}$$

در اینجا NH_{3m} انتشار آمونیاک از کود دامی جامد، TAN کل محتوای آمونیوم در کود دامی برحسب کیلوگرم (Kg NH_4-N/t)، M میزان کود دامی پخش شده (تن در هکتار از سطح پاشش) و A_m کسر کل منطقه پاشش برحسب درصد. انتشار کودهای آمونیوم نیترات (۲ درصد)، آمونیوم سولفات (۸ درصد)، اوره (۱۵ درصد) و کودهای NPK (۴ درصد) محاسبه شد. آبشویی فسفات بر اساس رابطه ۸ محاسبه شد (Nemecek et al., 2016):

$$P_{gw} = P_{gwl} \times F_{gw} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

P_{gw} میزان فسفر آبشویی شده به آب زیرزمینی ($kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$)، P_{gwl} میانگین کمی فسفات آبشویی شده به منابع آب است که برای زمین‌های زراعی این عدد $0.7\ a^{-1}\ P\ ha^{-1}$ است. F_{gw} فاکتور تصحیح برای کودهای مایع است که بر اساس رابطه ۹ محاسبه می‌شود (Nemecek et al., 2016):

$$F_{gw} = 1 + \frac{0.2}{80} \times P_{2O_{5s1}} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

در این رابطه $P_{2O_{5sl}}$ میزان P_{2O_5} موجود در کودهای دامی مایع ($kg\ ha^{-1}$) است. مقادیر محتوای P_{2O_5} کودهای دامی از نمک و همکاران استخراج شد (Nemecek et al., 2007).

میزان مصرف سوخت ماشین‌ها مورد استفاده برای هر فرایند کاری با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه شد (Nemecek et al., 2011):

$$FC \left(\frac{kg}{WU} \right) = mFC \left(\frac{l}{h} \right) \times operation\ time \times \sigma_{diesel} \left(\frac{kg}{l} \right) \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

در معادله فوق FC مصرف سوخت، و σ_{diesel} وزن ویژه سوخت دیزل $kg\ L^{-1}$ ۰/۸۴ است. میزان هدر رفت بذر ۴/۵ درصد در نظر گرفته شد.

کمی سازی جریان مواد در واحدهای فیزیکی

در چارچوب MFCA، کمی سازی جریان مواد در واحدهای فیزیکی برای درک کارایی سیستم تولید ضروری است. این مرحله شامل پیگیری جریان مواد، انرژی و منابع به صورت ملموس در هر مرحله از فرآیند تولید است. برای تولید فندق، ورودی‌های اصلی شامل آب، کودها، آفت‌کش‌ها، سوخت ماشین‌ها و انرژی مورد استفاده برای آبیاری، کاشت و برداشت هستند. موادی مانند کودها به واحد کیلوگرم اندازه‌گیری می‌شوند و انرژی نیز به واحد کیلووات‌ساعت محاسبه می‌شود. داده‌های جمع‌آوری شده از طریق کمی سازی فیزیکی امکان درک جامع‌تری از مصرف منابع را فراهم می‌آورد. با پیگیری این مواد به واحدهای فیزیکی، ناکارآمدی‌ها مانند استفاده بیش از حد یا ضایعات در هر مرحله قابل شناسایی است. این فرآیند پایه‌گذار محاسبه ضایعات مواد و تأثیرات محیط زیستی حاصل از آن‌ها است که منجر به فرآیند تولید کارآمدتر و پایدارتر می‌شود.

کمی سازی جریان مواد در واحدهای پولی

کمی سازی جریان مواد در واحدهای پولی گام حیاتی بعدی در روش‌شناسی MFCA است، زیرا دیدگاه مالی از استفاده از منابع و تولید ضایعات را فراهم می‌آورد. این فرآیند شامل تبدیل مقادیر فیزیکی ورودی‌ها و خروجی‌ها به مقادیر پولی است تا کارایی هزینه‌ای فرآیند تولید ارزیابی شود.

برای تولید فندق، به هر ورودی (مانند برق، کودها، آفت‌کش‌ها و انرژی) هزینه‌ای مطابق با ارزش بازار یا هزینه به ازای هر واحد

اختصاص داده می‌شود. برای مثال، هزینه برق ممکن است بر اساس قیمت هر کیلووات ساعت محاسبه شود، در حالی که کودها طبق قیمت خرید هر کیلوگرم ارزیابی می‌شوند. به‌طور مشابه، هزینه‌های عملیاتی مرتبط با ماشین‌ها و نیروی کار محاسبه شده و در هزینه‌های کل ورودی‌ها لحاظ می‌شوند.

کمّی سازی پولی همچنین شامل هزینه‌های مرتبط با تأثیرات محیط زیستی، مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و مدیریت ضایعات است. این هزینه‌های محیط زیستی با برآورد هزینه‌های کاهش یا جبران آسیب‌های محیط زیستی ناشی از ضایعات و انتشار گازها محاسبه می‌شوند که معمولاً به عواملی مانند مصرف انرژی یا استفاده از مواد شیمیایی مضر مربوط می‌شوند. آخرین مرحله در کمّی سازی جریان پولی، تعادل هزینه است که هزینه کل ورودی‌ها را با ارزش کل خروجی‌ها مقایسه می‌کند. این کمک می‌کند تا زمینه‌هایی که می‌توان در آن‌ها صرفه‌جویی هزینه با کاهش ضایعات یا بهبود کارایی منابع ایجاد کرد، شناسایی شود.

شاخص‌های اقتصادی

در این مطالعه، شاخص‌های اقتصادی مختلفی برای تولید فندق با استفاده از هر دو روش حسابداری سنتی و MFCA محاسبه و مقایسه شده‌اند (جدول ۴). این شاخص‌ها شامل "ارزش ناخالص تولید (GVP)" که درآمد کل از تولید فندق را نشان می‌دهد و همچنین "بازگشت ناخالص (GR)" که درآمد خالص پس از کسر هزینه‌های متغیر را محاسبه می‌کند می‌باشند. علاوه بر این، "نسبت فایده به هزینه (CBR)" که سود نسبت به هزینه‌های کل تولید را ارزیابی می‌کند و "بازده اقتصادی (EP)" که تولید را نسبت به هزینه‌های متغیر محاسبه می‌کند، به عنوان ابزارهایی برای ارزیابی کارایی اقتصادی استفاده می‌شوند. این شاخص‌ها با استفاده از هر دو روش حسابداری محاسبه می‌شوند و می‌توانند تفاوت‌ها در مدیریت هزینه‌ها و کارایی بین دو روش را نشان دهند.

جدول ۴. شاخص‌های اقتصادی در تولید فندق (Afshar and Dekamin, 2022)

فرمول‌های محاسبه*	واحد	شاخص‌های اقتصادی
$GVP = Y(kg\ ha^{-1}) \times P(\$ kg^{-1})$	$\$ ha^{-1}$	ارزش ناخالص تولید (GVP)
$GR = GVP (\$ ha^{-1}) - VC (\$ ha^{-1})$	$\$ ha^{-1}$	بازگشت ناخالص (GR)
$CBR = GVP (\$ ha^{-1}) / TC (\$ ha^{-1})$	Ratio	نسبت فایده به هزینه (CBR)
$EP = Y(kg) / Variable\ Costs (\$)$	$kg \$^{-1}$	بازده اقتصادی (EP)

*Y is hazelnut yield ($kg\ ha^{-1}$), P is hazelnut price ($\$ kg^{-1}$), VC stands for variable costs ($\$ ha^{-1}$), and TC is total costs ($\$ ha^{-1}$)

یافته‌های پژوهش

خلاصه و تفسیر داده‌های MFCA

روش‌شناسی MFCA تحلیل دقیقی از جریان‌های فیزیکی و مالی مواد و انرژی در کل فرایند تولید فندق ارائه می‌دهد. مقادیر نهاده‌های مختلف مورد نیاز برای تولید فندق در سطح یک هکتار در جدول ۵ ارائه شده است. این ورودی‌ها شامل منابع مختلفی مانند برق برای آبیاری، کودهای شیمیایی برای غنی‌سازی خاک، آفت‌کش‌ها برای کنترل آفات و بیماری‌ها، انرژی برای ماشین‌ها و هزینه‌های نیروی کار مرتبط با کشت هستند. هر یک از این ورودی‌ها نقش حیاتی در فرآیند تولید ایفا می‌کنند و به‌طور هم‌زمان بر تولید فیزیکی و اثرات محیط زیستی کشت فندق تأثیر می‌گذارند.

نیروی انسانی به میزان ۱۷۵ ساعت محاسبه شد که یک منبع حیاتی در فرآیند تولید است. این رقم بیانگر آن است که تولید فندق در استان گیلان همچنان وابستگی بالایی به کار دستی دارد و سطح مکانیزاسیون پایین است. چنین اتکایی به نیروی انسانی اگرچه می‌تواند موجب اشتغال‌زایی در مناطق روستایی شود، اما از منظر بهره‌وری اقتصادی و کاهش هزینه‌ها چالش‌برانگیز است. مطالعات مشابه در مورد محصولات باغی دیگر نیز نشان داده‌اند که مکانیزاسیون می‌تواند به کاهش ساعات کارگری و در عین حال افزایش بازدهی محصول کمک کند (Dekamin & Kheiralipour, 2023). بنابراین، ارتقای سطح مکانیزاسیون در باغ‌های فندق می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های نیروی کار و در عین حال بهبود بهره‌وری کل مزرعه شود. از سوی دیگر، وابستگی به نیروی انسانی در شرایط تغییرات اقلیمی و مهاجرت روستاییان، پایداری تولید را تهدید می‌کند. به همین دلیل، ترکیب مدیریت کارگری با فناوری‌های نوین می‌تواند یک راهبرد کلیدی باشد. برای مثال،

استفاده از ماشین آلات کوچک مقیاس متناسب با شرایط توپوگرافی باغ‌های گیلان می‌تواند فشار نیروی کار را کاهش داده و بهره‌وری را افزایش دهد.

ماشین‌ها کشاورزی، که برای وظایفی مانند کاشت و برداشت استفاده می‌شوند، به میزان ۹/۴ کیلوگرم اندازه‌گیری شد و اهمیت کم مکانیزاسیون در تولید فندق را نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که سطح مکانیزاسیون در باغ‌های فندق استان گیلان پایین است و بسیاری از عملیات همچنان به صورت دستی انجام می‌شود. اگرچه این وضعیت موجب ایجاد اشتغال محلی می‌شود، اما در مقایسه با استانداردهای جهانی تولید فندق، یک ضعف ساختاری محسوب می‌شود. پایین بودن استفاده از ماشین آلات می‌تواند به کاهش بهره‌وری منجر شود، زیرا انجام دستی عملیات‌هایی مانند برداشت یا عملیات خاک‌ورزی باعث افزایش زمان، هزینه‌های پنهان و حتی افت محصول می‌شود. تحقیقات مشابه بر روی انگور و ذرت (Afshar & Dekamin, 2022; Dekamin & Kheiralipour, 2023) نشان داده‌اند که ارتقای مکانیزاسیون می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های مستقیم، اثرات محیط زیستی ناشی از هدررفت نهاده‌ها را نیز کاهش دهد. کودهای شیمیایی مانند نیتروژن، فسفات و پتاسیم به ترتیب به میزان ۱۵ کیلوگرم، ۱۹ کیلوگرم و ۲۶ کیلوگرم به کار رفتند. این نهاده‌ها برای بهبود حاصل‌خیزی خاک و تضمین رشد گیاهان فندق ضروری هستند. علاوه بر این، ۳۸۴ کیلوگرم کود دامی (FYM) برای غنی‌سازی خاک با مواد مغذی آلی استفاده شد. سموم دفع آفات (۳/۹ کیلوگرم) و قارچ‌کش‌ها (۴/۵ کیلوگرم) برای کنترل آفات و بیماری‌ها استفاده شدند و اهمیت حفاظت از محصول برای حفظ بازدهی سالم را برجسته می‌سازند. مصرف انرژی به شکل سوخت دیزل (۸/۲ کیلوگرم)، به ویژه برای عملکرد ماشین‌ها قابل توجه بود. این ورودی‌های انرژی برای اطمینان از عملکرد روان عملیات کشاورزی و تکمیل به موقع وظایفی مانند آبیاری، کاشت و برداشت حیاتی هستند.

جدول ۵. جریان ورودی - خروجی تولید فندق

جریان ورودی - خروجی	واحد	قیمت هر واحد	مقدار در هکتار	هزینه‌ها در هکتار
ورودی‌ها				
نیروی کار	h	۱	۱۷۴/۸	۱۷۴/۸۱
ماشین‌ها کشاورزی	kg	۱/۲	۹/۴	۱۱/۳۳
نیتروژن	kg	۰/۱۴	۱۴/۸	۲/۰۷
فسفات	kg	۰/۳	۱۸/۹	۵/۶۸
پتاسیم	kg	۰/۴۳	۲۵/۹	۱۱/۱۵
کود دامی	kg	۰/۰۰۱	۳۸۴/۵	۰/۳۸
آفت‌کش‌ها	kg	۴/۴	۳/۹	۱۷/۳۴
قارچ‌کش‌ها	kg	۴/۴	۴/۵	۱۹/۸۹
سوخت دیزل	kg	۰/۰۲	۸/۲	۰/۱۶
خروجی‌های منفی				
انتشار آمونیاک (NH_3) از کود دامی به هوا	kg	۰/۱۴	۲/۱	۰/۳
انتشار آمونیاک (NH_3) از کودهای شیمیایی به هوا	kg	۰/۱۴	۱/۸	۰/۲۵
انتشار اکسید نیترو به هوا	kg	۰/۱۴	۰/۴	۰/۰۵
نشت نیترات به آب	kg	۰/۱۴	۳/۱	۰/۴۴
نشت فسفات به آب	kg	۰/۳	۰/۵	۰/۱۴
انتشار آفت‌کش‌ها به هوا	kg	۴/۴	۰/۹	۳/۷۴
انتشار آفت‌کش‌ها به آب	kg	۴/۴	۰/۴	۱/۸۵
انتشار آفت‌کش‌ها به خاک	kg	۴/۴	۷/۲	۳۱/۵۵
افت محصول	kg	۷/۵	۲۲/۵	۱۶۸/۸۳
خروجی مثبت				
عملکرد	kg	۷/۵	۴۵۰/۲	۳۳۷۶/۶۵

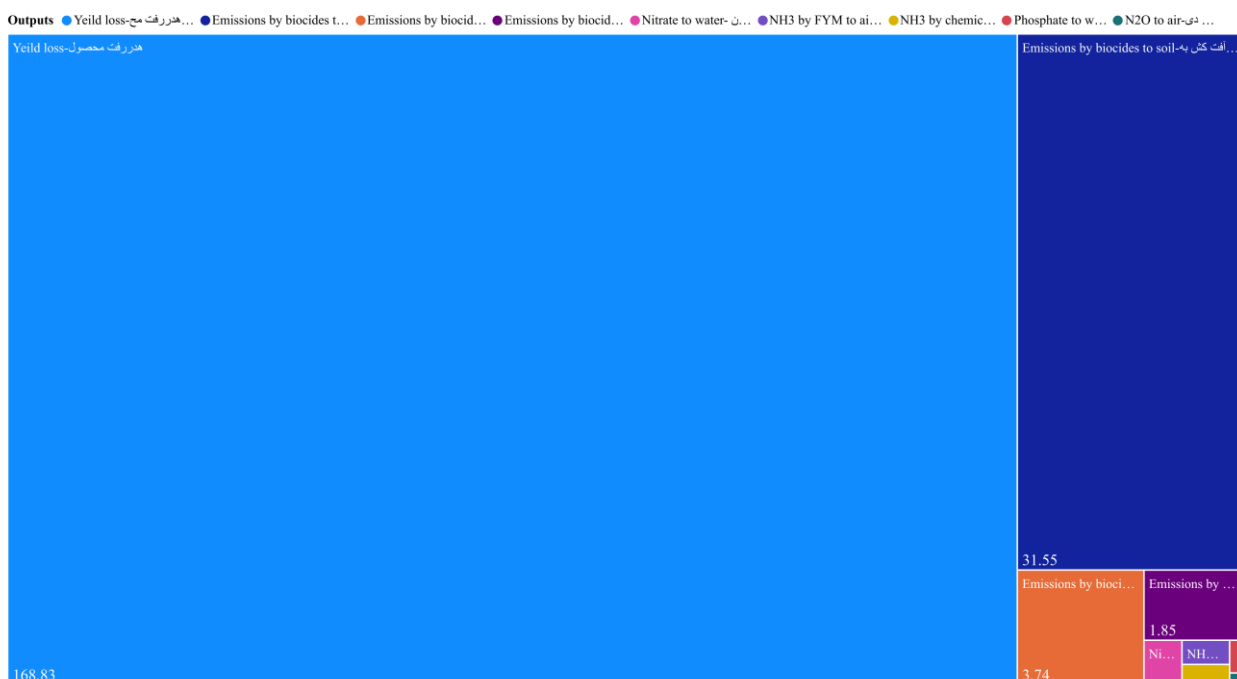
خروجی مثبت اصلی فرایند تولید، محصول فندق بود که به میزان 450 kg ha^{-1} برداشت شد. این محصول نهایی نشان‌دهنده موفقیت عملیات کشاورزی از نظر مقدار تولید شده است. با این حال، فرایند تولید چندین خروجی منفی با پیامدهای محیط زیستی نیز ایجاد کرد. یکی از مهم‌ترین انتشارها، آمونیاک (NH_3) بود که از کود دامی و کودهای شیمیایی به هوا منتقل شد. انتشار NH_3 از کود دامی kg ha^{-1}

۲/۱ و از کودهای شیمیایی $1/8 \text{ kg ha}^{-1}$ بود که به آلودگی هوا و تأثیر احتمالی بر کیفیت هوا منجر شد. علاوه بر این، انتشار اکسید نیترو (N_2O) به میزان $0/4 \text{ kg ha}^{-1}$ ، به عنوان یک گاز گلخانه‌ای تأثیرگذار در تغییرات اقلیمی نقش داشت. آلودگی آب یکی دیگر از خروجی‌های منفی مهم بود که شامل $3/1 \text{ kg ha}^{-1}$ نیترات و $0/5 \text{ kg ha}^{-1}$ فسفات بود که به آب نشت کردند. این آلاینده‌ها می‌توانند کیفیت آب را تحت تأثیر قرار داده و به غنی‌سازی بیش از حد مواد مغذی (یوتریفیکاسیون) و آسیب به اکوسیستم‌های آبی منجر شوند. علاوه بر این، استفاده از آفت‌کش‌ها (سموم دفع آفات و قارچ‌کش‌ها) منجر به انتشار آنها به محیط زیست می‌شود. انتشار آفت‌کش‌ها به هوا $0/9 \text{ kg ha}^{-1}$ ، به آب $0/4 \text{ kg ha}^{-1}$ و به خاک $7/2 \text{ kg ha}^{-1}$ بود. این انتشارها برای اکوسیستم‌های اطراف نگران‌کننده هستند، زیرا می‌توانند خاک، آب و هوا را آلوده کرده و به موجودات غیرهدف و تنوع زیستی کشاورزی آسیب برسانند. نشت نیترات و فسفات به آب می‌تواند به پدیده یوتریفیکاسیون و کاهش کیفیت آب منجر شود. این مسأله در گیلان که منابع آبی برای کشاورزی و آشامیدنی اهمیت زیادی دارند، بحرانی‌تر است. بنابراین، نتایج تحقیق نشان می‌دهد که مدیریت کود و آبیاری باید اولویت سیاست‌گذاری محلی باشد. در نهایت، فرآیند تولید با افت محصول مواجه شد و $22/5 \text{ kg ha}^{-1}$ فندق از بین رفت، که نشان‌دهنده کاهش کلی بهره‌وری سیستم تولید است. افت محصول می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند آسیب آفات، بیماری‌ها یا شرایط نامساعد جوی باشد و ناکارآمدی در استفاده از منابع را منعکس می‌کند. این پدیده در مطالعات مشابه بر روی فندق در ترکیه (Temizyurek-Arslan, 2023) و همچنین محصولات باغی دیگر مانند گوجه (Saeidi et al., 2025) نیز گزارش شده است. این میزان افت عملکرد، علاوه بر کاهش مستقیم درآمد کشاورز، بیانگر هدررفت منابع ورودی همچون کود، آب و نیروی انسانی نیز هست؛ زیرا نهاده‌هایی که صرف تولید محصول از دست‌رفته شده‌اند، در واقع بدون بازده اقتصادی و با بار محیط زیستی باقی مانده‌اند. از منظر محیط زیستی، هدررفت محصول نه تنها به معنای کاهش بازده اقتصادی است بلکه افزایش «شدت اثرات محیط زیستی به ازای واحد محصول قابل مصرف» را نیز در پی دارد. به عبارت دیگر، وقتی محصول نهایی کاهش می‌یابد، شاخص‌هایی نظیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی آب به ازای هر کیلوگرم فندق افزایش پیدا می‌کنند، زیرا همان میزان نهاده و انتشار برای محصول کمتری صرف شده است. کاهش این هدررفت می‌تواند به عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها برای بهبود هم‌زمان بهره‌وری اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی مطرح شود. استفاده از روش‌های مدیریت تلفیقی آفات (IPM)، توسعه سیستم‌های برداشت مکانیزه متناسب با شرایط گیلان، و ارتقای دانش فنی کشاورزان از جمله اقداماتی است که می‌تواند در کاهش افت عملکرد نقش آفرین باشد. این رویکردها نه تنها بازده اقتصادی کشاورزان را بهبود می‌بخشند، بلکه موجب کاهش هدررفت منابع و کاهش فشار بر محیط‌زیست نیز می‌شوند.

کل هزینه پولی نهاده‌های مورد نیاز برای تولید فندق برابر با ۲۴۲ دلار است که شامل هزینه‌های مستقیم نیروی کار، ماشین‌ها، کودها، آفت‌کش‌ها، سوخت و انرژی می‌شود (شکل ۴). خروجی مثبت اصلی، محصول فندق است که ارزش آن برابر با ۳۳۷۶ دلار تخمین زده شده است. این مبلغ نشان‌دهنده درآمد حاصل از فروش فندق‌های برداشت‌شده است. از سوی دیگر، خروجی‌های منفی مرتبط با تولید، مانند انتشارهای محیط زیستی N_2O ، NH_3 ، انتشار فسفات و غیره و افت محصول، در مجموع برابر با ۲۰۷ دلار برآورد شده‌اند. تقریباً به اندازه هزینه تولید، هدررفت در فرایند تولید وجود دارد. با بهینه‌سازی این هدررفت‌ها می‌توان انتظار داشت که ناکارآمدی اقتصادی و محیط زیستی این سیستم کاهش یابد. این خروجی‌های منفی هزینه محیط زیستی و ناکارآمدی‌های منابع در طی فرایند تولید را نشان می‌دهند (شکل ۵).

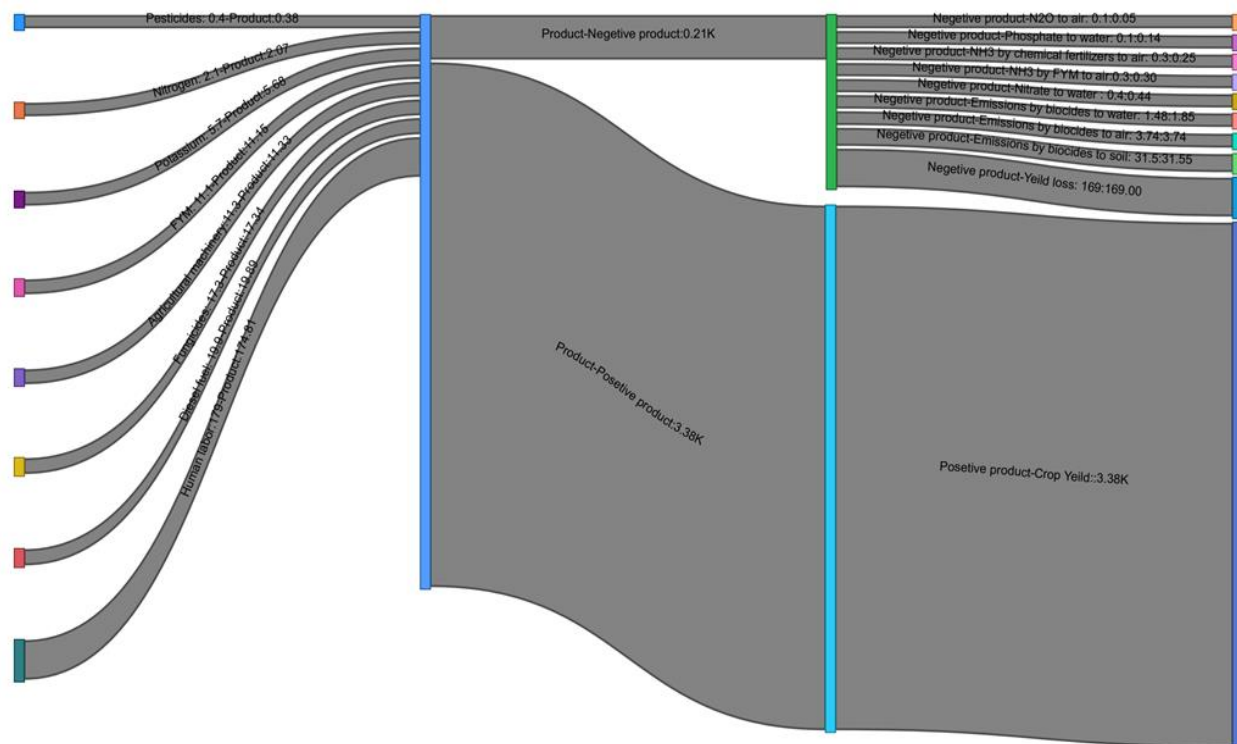


شکل ۴. هزینه معادل نهاده‌های مختلف در تولید فندق



شکل ۵. هزینه معادل خروجی های منفی در تولید فندق

این پیامدهای منفی ناشی از عواملی مانند انتشار NH_3 از کودها، انتشار N_2O ، فسفات و استفاده از آفت کش ها است. اثرات محیط زیستی، از جمله آلودگی و کاهش منابع، نمایانگر هزینه های پنهان تولید فندق هستند که در درآمد مزرعه منعکس نمی شوند (شکل ۶).



شکل ۶. تحلیل جریان هزینه در تولید فندق

نتایج شاخص های اقتصادی کلیدی برای تولید فندق با استفاده از روش MFCA و روش حسابداری سنتی هزینه ها (TCA) در جدول ارائه شده است. این نتایج تفاوت بین دو روش را برجسته می کنند، به ویژه در MFCA که اثرات محیط زیستی مرتبط با تولید را در نظر

می‌گیرد و تأثیر آن بر شاخص های اقتصادی تولید را مشخص می‌کند.

جدول ۶. شاخص های عملکرد اقتصادی برای تولید فندق با استفاده از MFCA و حسابداری سنتی (TCA)

شاخص	واحد	هزینه یابی جریان مواد (MFCA)	حسابداری سنتی هزینه ها (TCA)
عملکرد یا خروجی مثبت	kg ha ⁻¹	۴۵۰/۲	۴۵۰/۲
قیمت فروش	\$kg ⁻¹	۷/۵	۷/۵
هزینه تولید	\$	۲۴۲/۸	۲۴۲/۸
ارزش ناخالص تولید	\$	۳۵۸۳/۸	۳۳۷۶/۷
محصولات منفی	\$	۲۰۷/۱	۰
بازده ناخالص	\$	۳۳۴۱	۳۱۳۳/۸
نسبت سود به هزینه		۱۴/۸	۱۳/۹
بازده اقتصادی	kg \$	۱/۹	۱/۹

تفاوت اصلی بین MFCA و TCA

یکی از تفاوت های اصلی بین MFCA و TCA سنتی این است که در MFCA ارزش اقتصادی محصولات منفی مانند انتشارها و پسماندها نیز لحاظ می‌شود. این گنجاندن، منجر به افزایش ارزش کلی شاخص های کلیدی در MFCA در مقایسه با TCA می‌شود. به عنوان مثال، ارزش ناخالص تولید (GVP) در MFCA برابر با ۳۵۸۳ دلار است، در حالی که در TCA برابر با ۳۳۷۶ دلار می‌باشد، که نتیجه MFCA بازتاب جامع تری از ارزش واقعی اقتصادی تولید است. به طور مشابه، بازده ناخالص (GR) و نسبت سود به هزینه (BCR) در MFCA بالاتر است که این موضوع عمدتاً به دلیل لحاظ کردن محصولات منفی به ارزش ۲۰۷ دلار است. این رویکرد، نمایی جامع تر از عملکرد اقتصادی و محیط زیستی فرآیند تولید ارائه می‌دهد.

گنجاندن محصولات منفی در MFCA به این معناست که هزینه اقتصادی اثرات محیط زیستی، مانند رواناب مواد مغذی، انتشارهای هوا و پسماند، در نظر گرفته می‌شود. این محصولات منفی نمایانگر زیان ها و ناکارآمدی های احتمالی سیستم هستند، اما در عین حال نقاطی را نشان می‌دهند که می‌توان بهبودهایی ایجاد کرد. با شناسایی این عوامل، MFCA به کشاورزان امکان می‌دهد که رابطه بین شیوه های محیط زیستی و نتایج اقتصادی خود را بهتر درک کنند. در نتیجه، کشاورز ترغیب می‌شود تا پسماندها و انتشارها را کاهش دهد تا بازده بیشتری به دست آورد. با این کار، آن ها نه تنها وضعیت مالی خود را بهبود می‌بخشند بلکه ردپای محیط زیستی خود را نیز کاهش می‌دهند.

این ویژگی MFCA را به ابزاری منحصر به فرد برای کشاورزان تبدیل می‌کند، زیرا سناریویی برد-برد را ارائه می‌دهد. برخلاف ابزارهای سنتی مدیریت محیط زیستی که صرفاً بر کاهش اثرات محیط زیستی تمرکز می‌کنند و اغلب ماهیتی محدودکننده و دلسردکننده دارند، MFCA بهبود محیط زیستی را مستقیماً به منافع مالی مرتبط می‌کند. کشاورزان می‌توانند ببینند که با کاهش زیان های محیط زیستی مانند انتشارها و هدررفت منابع، می‌توانند هم پایداری تولید و هم سودآوری خود را بهبود دهند. این ارتباط مستقیم بین اقدامات محیط زیستی و بازده اقتصادی، رویکردی عملی تر و انگیزه بخش تر به کشاورزی پایدار ارائه می‌دهد، زیرا کارایی محیط زیستی به عنوان راهی برای ارتقای هر دو نتیجه محیط زیستی و اقتصادی معرفی می‌شود.

در نتیجه، گنجاندن محصولات منفی در MFCA عامل تمایز کلیدی این روش از TCA و ابزارهای مدیریت محیط زیستی است. این روش به کشاورزان نشان می‌دهد که کاهش اثرات محیط زیستی و بهبود کارایی استفاده از منابع می‌تواند به طور هم زمان درآمد را افزایش داده و به تولیدی پایدارتر و دوستدار محیط زیست دست یافت. این رویکرد، MFCA را به ابزاری قدرتمند برای کشاورزان تبدیل می‌کند تا اهداف اقتصادی و محیط زیستی خود را هماهنگ کرده و به سوی آینده ای سودآورتر و پایدارتر حرکت کنند.

نتیجه گیری و پیشنهادها

شناسایی و ارزیابی فرصت های بهبود

این مطالعه که در زمینه تولید فندق در استان گیلان انجام شد، مزایای قابل توجه استفاده از MFCA نسبت به TCA را در ارزیابی عملکرد اقتصادی و محیط زیستی شیوه های کشاورزی برجسته می‌کند. یکی از تمایزات کلیدی MFCA، در نظر گرفتن ارزش اقتصادی محصولات

منفی، مانند انتشارها، پسماندها و رواناب مواد مغذی است که معمولاً در روش‌های TCA حذف می‌شوند. این رویکرد جامع، امکان ارزیابی دقیق‌تر از تعاملات بین نتایج محیط زیستی و اقتصادی را فراهم می‌کند و بینش‌های ارزشمندی برای کشاورزان ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که MFCA ارزش ناخالص تولید، بازده ناخالص و نسبت سود به هزینه بالاتری را در مقایسه با TCA ارائه می‌دهد. این امر نشان‌دهنده این است که MFCA چارچوب جامع‌تری برای درک چگونگی کاهش زیان‌های محیط زیستی، مانند پسماندها و انتشارها، و افزایش بازده مالی به طور هم‌زمان ارائه می‌دهد. گنجاندن محصولات منفی در MFCA به کشاورزان این امکان را می‌دهد که کاهش انتشارها و پسماندها را به‌عنوان فرصت‌هایی برای بهبود سودآوری و نه تنها به‌عنوان بارهای محیط زیستی مشاهده کنند. این موضوع در تضاد با ابزارهای سنتی مدیریت محیط زیستی است که اغلب حفاظت محیط زیستی را به‌عنوان هزینه اضافی مطرح می‌کنند. برای بهینه‌سازی تولید فندق و کاهش انتشارها، می‌توان چندین استراتژی را اجرا کرد. اولاً، بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری برای به حداقل رساندن هدررفت آب می‌تواند هزینه‌ها را به طور قابل توجهی کاهش داده و رواناب آب را کاهش دهد. فناوری‌های کشاورزی دقیق، مانند حسگرهای خاک و سیستم‌های پیشرفته مدیریت مواد مغذی، می‌توانند مصرف کودها را بهینه کرده و رواناب نیتروژن، فسفر و پتاسیم را به منابع آبی کاهش دهند.

علاوه بر این، استفاده از کودهای آلی و آفت‌کش‌هایی با اثرات محیط زیستی کمتر می‌تواند انتشارهای مضر به هوا، آب و خاک را کاهش دهد. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای آبیاری و ماشین‌ها کشاورزی نیز می‌تواند وابستگی به سوخت دیزل را کاهش داده و انتشارها را کم کند. همچنین، بازگشت بقایای گیاه فندق مانند شاخه‌ها و برگ‌ها به خاک می‌تواند کیفیت و پایداری خاک را در طولانی‌مدت با بهبود محتوای مواد آلی و حاصل‌خیزی خاک افزایش دهد.

استفاده از تناوب کشت و شیوه‌های کشاورزی پایدار می‌تواند وابستگی به نهاده‌های شیمیایی را کاهش داده و از سلامت طولانی‌مدت خاک و تنوع زیستی حمایت کند. این استراتژی‌ها نه تنها اثرات محیط زیستی را کاهش می‌دهند، بلکه به کشاورزان کمک می‌کنند تا مقاومت خاک را افزایش داده و سیستم‌های تولید پایدارتری ایجاد کنند.

در نهایت، MFCA به کشاورزان کمک می‌کند تا درک کنند که کاهش زیان‌های محیط زیستی می‌تواند به سود بالاتر منجر شود و شیوه‌های سازگار با محیط می‌توانند با افزایش بهره‌وری همگام باشند. با تغییر دیدگاه از حفاظت زیست‌محیطی به‌عنوان هزینه اضافی به درک آن به‌عنوان یک عامل مؤثر در بهبود کارایی و سودآوری، MFCA کشاورزان را قادر می‌سازد تا شیوه‌های پایدارتر و سودآورتری را اتخاذ کنند. یافته‌های این مطالعه پتانسیل MFCA را برای ترویج پایداری محیط زیستی و اقتصادی در تولید فندق در استان گیلان نشان می‌دهد و نقشه راهی برای کشاورزان فراهم می‌کند تا سودآوری خود را افزایش داده و در عین حال اثرات محیط زیستی خود را کاهش دهند.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

وزارت جهاد کشاورزی ایران (۱۳۹۱). آمارنامه کشاورزی سالانه. از <http://www.maj.ir>

REFERENCES

- FAO (Food and Agriculture Organization), 2011. www.fao.org
- Ministry of Jihad-e-Agriculture of Iran, 2013. Annual Agricultural Statistics. <http://www.maj.ir>, [in Persian].
- IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 2, Inst. Glob. Environ. Strateg. Hayama, Japan (2006).
- Afshar, R. K., & Dekamin, M. (2022). Sustainability assessment of corn production in conventional and conservation tillage systems. *Journal of cleaner Production*, 351, 131508 .
- Cochran, W. G. (1977). The estimation of sample size. *Sampling techniques*, 3(1), (72-90)
- Dekamin, M., & Barmaki, M. (2019). Implementation of material flow cost accounting (MFCA) in soybean production. *Journal of cleaner Production*, 210, 459-465 .
- 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 .
- Dekamin, M. (2021). 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.
- 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 .
- Dekamin, M., Nabavi-Pelesaraei, A., & Rezaei, H. (2025). Economic and environmental dynamics of tea production through material flow cost accounting (MFCA). *Cleaner Engineering and Technology*, 26, 100971.
- Del Rio, D., Calani, L., Dall'Asta, M., & Brighenti, F. (2011). Polyphenolic composition of hazelnut skin. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(18), 9935-9941 .
- Dijkman, T. J., Birkved, M., & Hauschild, M. Z. (2012). PestLCI 2.0: a second generation model for estimating emissions of pesticides from arable land in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17, 973-986 .
- Espadas-Aldana, G., Vialle, C., Belaud, J.-P., Vaca-Garcia, C., & Sablayrolles, C. (2019). Analysis and trends for Life Cycle Assessment of olive oil production. *Sustainable Production and Consumption*, 19, 216-230 .
- Hosseinpour, A., Seifi, E., Javadi, D., Ramezanpour, S. S., & Molnar, T. J. .Nut and kernel characteristics of twelve hazelnut cultivars grown in Iran. *Scientia Horticulturae*, 150, 410-413 .
- ISO. (2011). Environmental management-material flow cost accounting-general framework. ISO .
- Kumar, R., Bhardwaj, A., Singh, L. P ., Singh, G., Kumar, A., & Pattnayak, K. C. (2024). Comparative life cycle assessment of environmental impacts and economic feasibility of tomato cultivation systems in northern plains of India. *Scientific Reports*, 14(1), 7084 .
- Nabavi-Pelesaraei, A., Sadeghzadeh, A., Payman, M. H., & Mobtaker, H. G. (2013). An analysis of energy use, CO2 emissions and relation between energy inputs and yield of hazelnut production in Guilan province of Iran. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(12), 1601-1613 .
- Nemecek, T., Huguenin-Elie, O., Dubois, D., Gaillard, G., Schaller, B., & Chervet, A. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: II. Extensive and intensive production. *Agricultural systems*, 104(3), 233-245 .
- Nemecek ,T., Schnetzer, J., & Reinhard, J. (2016). Updated and harmonised greenhouse gas emissions for crop inventories. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1361-1378 .
- Pishgar-Komleh, S., Ghahderijani, M., & Sefeedpari, P. (2012). Energy consumption and CO2 emissions analysis of potato production based on different farm size levels in Iran. *Journal of cleaner Production*, 33, 183-191 .
- Renaud-Gentié, C., Dijkman, T. J., Bjørn, A., & Birkved, M. (2015). Pesticide emission modelling and freshwater ecotoxicity assessment for Grapevine LCA: adaptation of PestLCI 2.0 to viticulture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20, 1528-1543 .
- Rondanelli, M., Nichetti, M., Martin, V., Barrile, G. C., Riva, A., Petrangolini, G., Gasparri, C., Perna, S., & Giacosa, A. (2023). Phytoextracts for human health from raw and roasted hazelnuts and from hazelnut skin and oil: A narrative review. *Nutrients*, 15(11), 2421 .
- Savini Nicci, M., di Candia, S., & Khalil, C. (2024). The FAO methodology to measure progress towards the achievement of SDG targets and goals .
- Soheili-Fard, F., Ghassemzadeh, H. R., & Salvatian, S. B. (2014). An investigation of relation between CO2 emissions and yield of tea production in Guilan province of Iran .
- Temizyurek-Arslan ,M. (2023). Evaluation of hazelnut production in Türkiye in environment, energy and economy using life cycle assessment approach. *Science of the Total Environment*, 892, 164468 .
- Unicef. (2024). The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 .
- YarAhmadi, R., Fateh, E., Dekamin, M., & Hasanvandi, M. S. (2025). Material and Energy Flow Cost Accounting of Sugar Beet Production in Iran: Enhancing Sustainability and Economic Viability. *Agrotechniques in Industrial Crops*. Volume 5, Issue 3, July 2025, Pages 200-217
- 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 Biosystems Engineering*, 55(4), 45-62.