Iranian Journal of Biosystem Engineering ISNN: 2423-7841
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Evaluating the environmental impacts of eggplant production in hydroponic greenhouse: implementing a circular bioeconomy approach through composting and biochar

Saeed Mofatteh[1] | Majid Khanali[2]✉ | Asadolah Akram[3] | Homa Hosseinzadeh-Bandbafha[4] | Maryam Afshar[5]

1 Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: saeed.mofatteh@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: khanali@ut.ac.ir
3. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: aakaram@ut.ac.ir
4. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: homa.hosseinzadeh@ut.ac.ir
5. Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: m.afshar@znu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 4, 2024

Revised: March. 13, 2024

Accepted: Apr. 6, 2024

Published online: Autumn 2023

Keywords:
Greenhouse vegetables,
Green-waste,
Waste management,
Organic products,
Life Cycle Assessment

ABSTRACT

Despite its merits, hydroponics faces a significant volume of plant residues, including branches, leaves, and stems, after harvesting the main crop. If not managed properly, these residues can provide a suitable substrate for microbial growth, contributing to the proliferation of harmful microorganisms. To address the waste challenge, this research proposes the conversion of residues into compost or biochar based on a circular bioeconomy approach and investigates its environmental sustainability. According to the results, the production of one kilogram of hydroponic eggplant imposes health damages of 1.6×10-6 DALY on humans. Furthermore, in the ecisystems domain, the damage caused by producing one kilogram of hydroponic eggplant is equivalent to 1.08×10-8 species per year while in terms of resources, the estimated damage is $0.261 per kilogram of eggplant. The production and consumption of natural gas in hydroponic eggplant production play a vital role in environmental damages. The circular bioeconomy approach, especially the compost production pathway, there is a 16.6% reduction in health damages. In the ecosystem realm, the compost production pathway contributes to biodiversity conservation with a 16% reduction compared to the biochar production pathway, demonstrating better performance. In the resource damage category, the compost production pathway from green eggplant residues leads to approximately a 16% reduction compared to conventional hydroponic eggplant production. The results highlight the successful performance of eggplant production under the circular bioeconomy approach, focusing on compost production from green residues for environmental improvement and reduction of environmental damages in eggplant production.

Cite this article: Mofatteh, S., Khanali, M., Akram, A., Hosseinzadeh Bandbafha, H., Afshar, M., (2024) Evaluating the environmental impacts of eggplant production in hydroponic greenhouse: implementing a circular bioeconomy approach through composting and biochar, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 54 (3), 95-115. https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.372147.665537

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/ 10.22059/ijswr.2022.336573.669170

مجله مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۵۴، شماره ۳ شاپا: ۷۸۴۱-۲۴۲۳
Homepage: http://ijbse.ut.ac.ir

ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید بادمجان در گلخانه آب‌کشت: اجرای یک رویکرد اقتصاد زیستی-دایره‌ای از طریق تولید کمپوست و ذغال‌زیستی

سعید مفتح[۱] | مجید خانعلی[۲]✉ | اسداله اکرم[۳] | هما حسین زاده بندبافها [۴] | مریم افشار[۵]

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: saeed.mofatteh@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: khanali@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: aakram@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: homa.hosseinzadeh@ut.ac.ir

۵. گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: m.afshar@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۱۸
تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:
صیفیجات گلخانه‌ای،
پسماند سبز،
مدیریت پسماند ،
محصولات زیستی،
ارزیابی چرخه زندگی

چکیده

علیرغم تمام مزایا، آبکشت با حجم زیادی از بقایای گیاهان شامل شاخه‌ها، برگ‌ها و ساقه‌ها پس از برداشت محصول اصلی مواجه است. این بقایا در صورت مدیریت نامناسب، بستری برای رشد میکروبی فراهم کرده و به تکثیر و رشد میکروارگانیسم‌های مضر کمک میکنند. برای مقابله با چالش پسماند، این پژوهش تبدیل ضایعات به کمپوست یا ذغال‌زیستی بر اساس یک رویکرد اقتصاد زیستی-دایره‌ای، پیشنهاد کرده و ازنظر پایداری زیستمحیطی موردبررسی قرار داده است. بر اساس نتایج، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت به‌سلامت انسان ۱۰-۶× ۶/۱۶ دالی خسارت میزند. همچنین در حوزه زیستبوم، خسارت تولید هر کیلوگرم بادمجان برابر با ۸-۱۰× ۱/۰۸ گونه در سال هست، درحالیکه در زمینه منابع، مقدار خسارت ۰/۲۶۱ دلار برای هر کیلوگرم بادمجان تخمین زده‌شده است. تولید و مصرف گاز طبیعی در تولید بادمجان تحت شرایط آب‌کشت، نقش حیاتی در خسارتهای زیست‌محیطی این فرآورده دارد. رویکرد اقتصاد زیستی-دایره‌ای، به‌ویژه مسیری که باهدف تولید کمپوست پیشنهادشده است، منجر به کاهش ۱۶/۶ درصدی در کاهش خسارت بر سلامت انسان می‌شود. در زمینه زیستبوم، مسیر منتهی به تولید کمپوست با کاهش ۱۶ درصدی، به حفظ تنوع زیستی کمک می‌کند و نسبت به مسیر منتهی به تولید ذغال‌زیستی عملکرد بهتری دارد. در رده خسارت منابع نیز، مسیر منتهی به تولید کمپوست از بقایای سبز بادمجان باعث تغییرات کاهشی حدود ۱۶ درصدی در مقابل تولید مرسوم بادمجان تحت شرایط آبکشت میشود. نتایج نشان‌دهنده عملکرد موفق تولید بادمجان تحت رویکرد اقتصاد زیستی-دایره‌ای با تمرکز بر تولید کمپوست از بقایای سبز در جهت بهبود محیط‌زیست و کاهش خسارت زیست‌محیطی تولید بادمجان است.

استناد: مفتح؛ سعید، خانعلی؛ مجید، اکرم؛ اسداله، حسین زاده بندبافها؛ هما، افشار؛ مریم، (۱۴۰۲) ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید بادمجان در گلخانه آب‌کشت: اجرای یک رویکرد اقتصاد زیستی‌دایره‌ای از طریق تولید کمپوست و ذغال‌زیستی، *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۴ (۳)، ۱۱۵-۹۵.
https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.372147.665537

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.372147.665537

مقدمه

مصرف میوه و سبزی‌های به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزا سبد غذایی، می‌تواند ویتامین‌ها، فیبر موردنیاز و مواد معدنی مختلفی را در اختیار بدن انسان بگذارد (Yahia et al., 2019). بااین‌وجود، دسترسی مداوم به میوه و سبزی‌های تازه یک چالش جدی است؛ زیرا تولید آن‌ها به‌شدت وابسته به شرایط محیطی است. در راستای این چالش، بشر همواره کوشیده است تا شرایط ایده‌آلی را به‌طور مصنوعی برای رشد و نمو میوه و سبزی‌های تازه فراهم آورد. کشت گلخانه‌ای به دلیل توانایی غلبه بر محدودیت‌های اقلیمی و ارائه محیطی کنترل‌شده در طول سال یکی از بهترین و عملی‌ترین گزینه‌ها برای تولید محصولات تازه است (Bisbis et al., 2018). با توجه به این حقیقت، این سامانه تولیدی محبوبیت منحصربه‌فردی را در سراسر جهان کسب کرده و اجرای آن در نواحی مختلف اقلیمی برای تولید متنوع محصولات کشاورزی به‌سرعت در حال گسترش است. آمارها نشان می‌دهند که تولید گلخانه‌ای میوه و سبزی سهمی معادل ۴۲/۰۴ میلیارد دلار را در سال ۲۰۲۳ به خود اختصاص داده است درحالی‌که پیش‌بینی می‌شود این رقم به ۵۶/۷۹ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۸ برسد (Mordor Intelligence, 2023).

کشت گلخانه‌ای مرسوم اگرچه مزایای مختلفی را به خود اختصاص داده است، نگرانی‌های جدی را به دنبال دارد که می‌تواند پایداری محصول تولیدشده را چالش‌برانگیز نماید. به‌طور مثال، سامانه‌های کشت گلخانه‌ای یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان سموم شیمیایی هستند (Daughtrey and Buitenhuis, 2020). به دلیل شرایط محیطی گلخانه حشرات و بیماری‌های مختلفی محصول را تهدید می‌کند؛ بدیهی است به‌منظور حفظ و نگهداری محصول، حجم عمده‌ای از سموم شیمیایی مورداستفاده قرار گیرد. این در حالی است که نگرانی‌های زیست‌محیطی مصرف سموم شیمیایی بارها و بارها توسط محققان گوشزد شده است. زندگی بسیاری از آفات و حشرات موجود در این سامانه‌ها وابسته به خاک گلخانه است، بنابراین حذف خاک از گلخانه می‌تواند زمینه حذف بسیاری از آفات را فراهم نماید. معرفی سامانه‌های آب‌کشت در گلخانه‌ها در مقابل با سامانه‌های مرسوم یک راه‌حل جذاب برای حذف بستر خاکی است (Wang et al., 2023). حذف خاک و جایگزینی آن با محیط کشت آبی بدون شک به رفع نگرانی‌های مرتبط با کشت در محیط خاکی کمک شایانی خواهد کرد. به عبارت بهتر، سامانه‌های آب‌کشت به‌نوبه خود منجر به کاهش کاربرد سموم شیمیایی و حتی کودهای شیمیایی می‌شود که در حال حاضر به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین عوامل گرمایش جهانی و سایر نگرانی‌های زیست‌محیطی شناخته‌شده‌اند. سامانه‌های آب‌کشت تمام مواد مغذی موردنیاز گیاهان را از طریق آب تأمین کرده و درنتیجه منجر به افزایش عملکرد محصول و همچنین کاهش مصرف کودهای مختلف می‌شود (Majid et al., 2021). علی‌رغم تمام شایستگی‌ها، آب‌کشت به دلیل مصرف مستقیم کودهای شیمیایی با حجم زیادی از بقایای گیاهان شامل شاخه‌ها، برگ‌ها و ساقه‌ها پس از برداشت محصول اصلی مواجه است. این بقایا در صورت مدیریت نامناسب، به‌نوبه خود بستری مناسب برای رشد میکروبی فراهم کرده و به تکثیر و رشد باکتری‌ها، قارچ‌ها و سایر میکروارگانیسم‌های مضر کمک می‌کنند (Patchaye et al., 2018). گرچه ممکن است در نگاه اول سوزاندن این بقایا و یا دفع آن‌ها اقدامی مؤثر در مدیریت این بقایا باشد، اجرای آن‌ها عاری از مشکلات جدی زیست‌محیطی نیست. در این راستا، پژوهشگران در تلاش‌اند تا رویکردهای امیدوارکننده‌ای برای مدیریت بقایای کشاورزی معرفی نمایند.

در میان رویکردهای پیشنهادی، اقتصاد زیستی–دایره‌ای رویکردی جذاب است که نوید استفاده مجدد، بازیافت و بازیابی پسماندهای زیستی را با شیوه‌ای پایدار می‌دهد (Kiehbadroudinezhad et al., 2023b). اقتصاد زیستی–دایره‌ای با تمرکز بر استفاده از منابع تجدید پذیر، ارزش‌گذاری پسماند، توسعه مواد و انرژی زیستی و تقویت توسعه محلی، مسئول رشد اقتصادی تولید سامانه‌های مختلف و درعین‌حال حفظ سلامت زیست‌بوم و انسان است (Salvador et al., 2021). گرچه به نظر می‌رسد سامانه‌های اقتصاد زیستی–دایره‌ای نسبت به سامانه‌های خطی به دلیل کاهش ضایعات، افزایش تولید محصولات زیستی و بهبود بهره‌وری منابع، مزایای زیست‌محیطی قابل‌توجهی را نشان دهند، اطمینان از سازگاری زیست‌محیطی هر سامانه‌ای قبل از اجرای در مقیاس تجاری بسیار مهم است (Khounani et al., 2021). روش‌های مختلفی برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی سامانه‌های مختلف ازجمله سامانه‌های اقتصاد زیستی–دایره ای وجود دارد که یکی از پرکاربردترین آن‌ها روش ارزیابی چرخه زندگی است. ارزیابی چرخه زندگی یک ابزار امیدوارکننده است که برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی یک محصول، فرآیند یا فعالیت در کل چرخه زندگی آن، از استخراج مواد خام تا دفع پسماند استفاده می‌شود (Parajuli et al., 2021). ازآنجایی‌که ارزیابی چرخه زندگی امکان مقایسه عادلانه و جامع در عملکرد زیست‌محیطی محصولات و فرآیندهای مختلف را فراهم می‌کند، استفاده از آن در پژوهش‌هایی مبتنی بر مقایسه بسیار کارآمد است. با توجه به این حقیقت، درزمینه انتقال سامانه‌های آب‌کشت بر اساس روش خطی به روش زیستی– دایره‌ای، این ابزار عملکرد قابل قبولی را ارائه می‌کند (Bayram and Greiff, 2023).

بنابراین پژوهش حاضر این رویکرد را در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تولید بادمجان تحت سامانه آب‌کشت از مسیر خطی و همچنین مسیر زیستی–دایره‌ای به‌منظور پیامدهای زیست‌محیطی این انتقال مورداستفاده قرار داده است.

به‌طورکلی، کشت بادمجان تحت سامانه‌های آب‌کشت به دلیل مزایای جذاب آن به‌سرعت در حال افزایش است. بر اساس پژوهش‌های موجود، پسماند حاصل از صیفی‌جات شامل شاخه و برگ پتانسیل ارزش‌گذاری به‌صورت محصولاتی زیستی باارزش مانند ذغال‌زیستی و کمپوست را دارد (Stylianou et al., 2023). این مهم اجرای سامانه‌های زیستی–دایره‌ای در تولید بادمجان تحت سامانه‌ای آب‌کشت امکان‌پذیر می‌کند. با توجه به گسترش تولید بادمجان آب‌کشت در کشور و همچنین مشکلات مربوط به مدیریت پسماند در این سامانه‌ها، پژوهش حاضر به امکان‌سنجی سامانه‌های زیستی–دایره‌ای در تولید بادمجان تحت شرایط آب‌کشت و بررسی عملکرد زیست‌محیطی آن با توجه به تولید ذغال‌زیستی و کمپوست از پسماند پرداخته است. مرور پژوهش‌ها نشان می‌دهد پژوهش حاضر، اولین بررسی موشکافانه در رابطه با اجرای سامانه پیشنهادی و ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی آن است. شایان‌ذکر است که استفاده از کودهای شیمیایی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در سامانه‌های کشاورزی است، درحالی‌که ذغال‌زیستی و کمپوست توانایی قابل‌توجهی در تأمین مواد مغذی موردنیاز گیاه داشته و می‌تواند به‌عنوان یک ماده جذاب در سامانه‌های کشاورزی مورداستفاده قرار گیرد.

پیشینهٔ پژوهش

پژوهش‌های بسیاری اجرای موفقیت‌آمیز سامانه‌های اقتصاد زیستی–دایره‌ای در بخش کشاورزی را نشان داده‌اند و اذعان کرده‌اند که این رویکرد می‌تواند ازنظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مؤثر و کارآمد باشد. به‌طور مثال، در پژوهشی اجرای یک سامانه اقتصاد زیستی–دایره‌ای به‌منظور حذف ویناس و تبدیل آن به انرژی و کود در بخش تولید قند و شکر هند پیشنهاد شده است(Balakrishnan, 2024) . نتایج این پژوهش تأکید کرده است که تولید انرژی از ویناس از طریق فرایند هضم بی‌هوازی نسبت به سایر منابع انرژی عملکرد امیدوارکننده‌ای را نشان می‌دهد. با استفاده از روش‌های تخمیر بی‌هوازی کارآمد و فناوری بیوگاز کنونی، می‌توان مقادیر قابل‌توجهی بیوگاز از ویناس حاصل از بخش شکر هند ایجاد کرد. این پسماند ارزشمند در راستای سامانه‌های اقتصاد زیستی–دایره‌ای می‌تواند به‌صورت کود مورداستفاده قرار گیرد، حاصلخیزی خاک را بهبود بخشد، در دسترس بودن مواد مغذی را افزایش دهد و وابستگی به کودهای شیمیایی را کاهش دهد. در پژوهشی دیگر عنوان‌شده است که رویه جهانی سوزاندن بقایای گیاهی، مانند زیست‌توده باغات، به‌سلامت انسان و محیط‌زیست آسیب می‌رساند (Nematian et al., 2021). ازاین‌رو، اجرای یک سامانه اقتصاد زیستی–دایره‌ای که زیست‌توده باغی را مورد مصرف قرار دهد ممکن است سوختن باز را کاهش داده، بازیابی مواد مغذی را تسهیل کند، سلامت خاک را بهبود بخشد و رشد اقتصادی را تقویت کند. در این پژوهش یک تجزیه‌وتحلیل فنی–اقتصادی برای تبدیل ضایعات باغی به ذغال‌زیستی ارائه‌شده است که نویدبخش بهبود سلامت خاک است. با توجه به پتانسیل گسترش تولید ذغال‌زیستی، این پژوهش چشم‌انداز جالبی را برای سیاست‌گذاران در سراسر جهان ایجاد کرده است زیرا شواهدی را ارائه می‌دهد که نشان می‌دهد تولید ذغال‌زیستی تحت سامانه‌های اقتصاد زیستی–دایره‌ای ازنظر اقتصادی امکان‌پذیر است درحالی‌که پتانسیل بهبود بیشتر شاخص‌های اقتصادی را نیز داراست. در پژوهشی مشابه عنوان‌شده است اگرچه کاربرد روش‌های پیشرفته در کشاورزی بهره‌وری را افزایش می‌دهند، اما حجم عظیمی از زباله‌های کشاورزی را نیز تولید می‌کنند (Srivastava et al., 2023). پژوهشگران عنوان کرده‌اند که ازآنجایی‌که سوزاندن مستقیم زباله‌ها باعث آلودگی هوا، آب‌وخاک می‌شود، استفاده صحیح از این ضایعات ارزان‌قیمت برای تولید محصولات و مواد شیمیایی با ارزش‌افزوده سامانه‌های اقتصاد زیستی–دایره‌ای، محیطی پاک و سالم را برای اجزای زیستی و غیرزنده ایجاد می‌کند. آن‌ها تأکید کرده‌اند که پالایشگاه‌های زیستی مبتنی بر استفاده از زباله‌های کشاورزی می‌توانند ستون بزرگی برای توسعه یک اقتصاد زیستی–دایره‌ای باشند. سیلوا[1] و همکاران با توجه به گسترش استقبال از رویکرد اقتصاد زیستی–دایره‌ای در کشاورزی، فرآیند پیرولیز را برای ارزش‌گذاری زیست‌توده باقیمانده دانه‌های قهوه معیوب بدون روغن ارائه‌شده توسط فرآیند استخراج مایع تحت‌فشار پس از بازیابی روغن قهوه پیشنهاد کردند (Silva et al., 2022). آن‌ها گزارش کردند که فرآیند پیرولیز را می‌توان برای افزودن ارزش به پسماندهای کشاورزی با تولید نفت زیستی، ذغال‌زیستی و گاز به کار گرفت و این محصولات را می‌توان مجدداً در زنجیره تولید وارد کرد و یک فرآیند جهانی پایدار با تولید زباله صفر را مطابق با اصول یک اقتصاد زیستی–دایره‌ای ترویج داد. مرور پژوهش‌ها نشان می‌دهد که سامانه‌های اقتصاد زیستی–دایره‌ای در بخش کشاورزی با سرعت چشم‌گیری در حال اجرا و توسعه است؛ این در حالی است که در راستای این رشد پژوهش‌های مختلفی به دنبال بهبود این سامانه‌ها ازنقطه‌نظر زیست‌محیطی هستند.

1 Silva

به‌عنوان‌مثال، یک پژوهش جالب باهدف ارزیابی مزایای زیست‌محیطی بالقوه اجرای هاضم‌های ارزان‌قیمت برای ارزش‌گذاری ضایعات کشاورزی و صنعتی در بخش قند نیشکر غیر گریز از مرکز انجام شد تحت یک رویکرد اقتصاد زیستی–دایره‌ای انجام شد (Mendieta et al., 2021) . پژوهش دو مسیر مختلف را برای مدیریت پسماند در نظر گرفت : ۱) مسیر فعلی که در آن پسماندهای آلی و فاضلاب به ترتیب در فضای باز سوزانده شده و به داخل آبی تخلیه می‌شوند و ۲) مسیر هضم بی‌هوازی، که در آن از هاضم‌های کم‌هزینه برای مدیریت پسماندهای آلی و تصفیه فاضلاب در محل. نتایج نشان داد سامانه‌های اقتصاد زیستی–دایره‌ای تحت مسیر هضم بی‌هوازی اختناق دریاچه‌ای را به‌شدت کاهش می‌دهد. این پژوهش تأکید کرد که با تصفیه ضایعات آلی و فاضلاب در محل در حین تولید محصولات زیستی (به‌عنوان‌مثال سوخت زیستی و کود زیستی)، هاضم‌های ارزان‌قیمت می‌توانند به تقویت اقتصاد زیستی–دایره‌ای در بخش تولید کشاورزی کمک کنند.

در پژوهشی دیگر، ماسیرونی[1] و همکاران ادعا کردند که زیست‌توده پوسته دانه کدوتنبل پتانسیل زیادی برای ارزش‌گذاری ارائه می‌دهد که شامل محتوای بالای ترکیبات کربوهیدراتی است که توسط سلولز و همی سلولزهای مشتق از زایلوز نشان داده می‌شود که می‌تواند برای استخراج الیاف سلولزی برای کاربردهای مواد یا الیاف رژیمی در مورد کسر همی سلولز استفاده شود (Massironi et al., 2023). آن‌ها همچنین گزارش کردند که وجود ترکیبات فنولی در پوسته بذر نیز برای ارزش‌گذاری جذاب است زیرا استخراج به‌صورت آزاد و همچنین چسبیده به الیاف می‌تواند برای کاربردهای غذایی و آرایشی موردتوجه قرار گیرد . درنتیجه می‌تواند به اجرای یک رویکرد اقتصاد زیستی–دایره‌ای در تولید کدوتنبل کمک کند. ماسیرونی و همکاران با استفاده از ارزیابی چرخه زندگی، اهمیت زیست‌محیطی اجرای این رویکرد را با مقایسه شیوه‌های استخراج را در توسعه فناوری‌های تولید پاک‌تر نشان دادند. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت اصول اقتصاد زیستی– دایره‌ای برای تقویت اتخاذ رویکردهای پاک‌تر و پایدارتر در ارزش‌گذاری محصولات جانبی کشاورزی، همسو با نیاز جهانی برای مدیریت منابع پایدار و کاهش ضایعات تأکید می‌کند. در راستای موفقیت حاصل از کاربرد ارزیابی چرخه زندگی به‌منظور بهبود و ارتقا سامانه‌های اقتصاد زیستی– دایره‌ای در کشاورزی و مشکلات ناشی از بقایای آب‌کشت بادمجان پژوهش حاضر روی اجرای یک سامانه اقتصاد زیستی– دایره‌ای در آب‌کشت بادمجان متمرکزشده است. پژوهش‌های گذشته تولید ذغال‌زیستی و کمپوست از بقایای صیفی‌جاتی نظیر گوجه‌فرنگی را موفقیت‌آمیز دانسته‌اند. به‌عنوان‌مثال، دان لوپ[2] و همکاران تولید ذغال‌زیستی از پسماند سبز گوجه‌فرنگی را اجرا و پیشنهاد کرد (Dunlop et al., 2015). درحالی‌که چاکروارتی[3] و ماندواگان[4] به این نکته مهم اشاره کردند که بقایای گوجه‌فرنگی می‌تواند تبدیل به کمپوست شود (Chakravarty and Mandavgane, 2023). ازآنجاکه تجزیه‌وتحلیل مواد موجود در بقایای سبز بادمجان و گوجه‌فرنگی بسیار نزدیک به هم بودند، پژوهش حاضر دو مسیر تولید کمپوست و ذغال‌زیستی به‌منظور اجرای اقتصاد زیستی– دایره‌ای در بادمجان آب‌کشت پیشنهاد نموده است.

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر طی سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲ انجام‌شده است؛ داده‌های اولیه مورداستفاده در این پژوهش از یکی از گسترده‌ترین شبکه‌های تولید و توزیع صیفی‌جات ازجمله بادمجان، فلفل دلمه، گوجه‌فرنگی واقع در مجتمع گلخانه‌ای ارس در شمال غرب ایران که از طریق مصاحبه حضوری با کارشناسان جمع‌آوری‌شده است. شایان‌ذکر است که مجتمع گلخانه ۱۳۰ هکتاری آب‌کشت در منطقه آزاد ارس با ظرفیت تولید سالانه ۲۴ هزار و ۲۰۰ تن انواع محصولات گلخانه‌ای و ۲۰ میلیون واحد نشاء و گیاه توسعه‌یافته است. منطقه ارس در مناطق نیمه‌خشک و نیمه سرد (حدود ۵۰ روز در سال به‌عنوان روزهای سرد) با بارندگی تقریباً ۲۲۵ تا ۴۰۰ میلی‌لیتر در سال و میانگین دما حدود ۱۵ درجه سلسیوس قرار دارد. در راستای اقلیم سرد، مجتمع گلخانه‌ای شیشه‌ای (آب‌کشت) در زمینی به مساحت ۸۰ هکتار به‌عنوان بزرگ‌ترین پروژه کشت آب‌کشت در گلخانه‌های شیشه‌ای خاورمیانه در شهریور ۱۳۹۹ افتتاح شد و هم‌اکنون انواع سبزی در این مجتمع کشت و برداشت می‌شوند. اجرای این مجموعه گلخانه‌ای آب‌کشت با آماده‌سازی و راه‌اندازی گلخانه شامل انتخاب سامانه آب‌کشت (با توجه به فضا، مصرف آب و مصرف الکتریسیته)، راه‌اندازی گلخانه و نصب زیرساخت‌های لازم آغاز شد؛ به‌طور خاص، این پژوهش موردی مبتنی بر فولاد و شیشه است. سامانه‌های گرمایش مبتنی بر گاز طبیعی و سایر تجهیزات شامل آب‌رسانی و آبیاری و تهویه مبتنی بر

1 Massironi
2 Dunlop
3 Chakravarty
4 Mandavgane

الکتریسیته هستند. پس از ساخت گلخانه و زیرساخت‌های آن، بستر رشد مناسبی انتخاب و اجراشده است. محیط‌های آب‌کشت به‌طور مرسوم شامل محیط‌های آلی مانندکوکوپیت، پوست درخت کاج و زغال‌سنگ نارس و همچنین محیط‌های غیر آلی ازجمله سنگ رشد، پشم معدنی، ماسه، پرلیت هستند که برای کمک به حمایت از ریشه گیاهان و حفظ نسبت آب به اکسیژن مناسب مورداستفاده قرار می‌گیرند (Dunn et al., 2021)؛ در این پژوهش محیط بر پایه کوکوپیت است.

گرچه با استفاده از فناوری روز دنیا این مجتمع حداقل مصرف آب به خود اختصاص داده است، پسماند و ضایعات حاصل با توجه به وضعیت منطقه منجر به معضلات و پیامدهای زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری شده است. بنابراین، در شرایط حاضر نیاز به انتقال از تولید صیفی‌جات از مسیر خطی به مسیر زیستی–دایره‌ای ضروری است. در پژوهش حاضر تولید گیاه بادمجان در مجتمع گلخانه‌ای آب‌کشت ارس به‌عنوان یکی از محبوب‌ترین صیفی‌جات مصرفی در جهان موردبررسی قرارگرفته است. ذکر آن نکته خالی از لطف نیست که بادمجان (*Solanum melongena*) از خانواده *Solanaceae* است و ازنظر گیاه‌شناسی با گوجه‌فرنگی، فلفل و سیب‌زمینی مرتبط است. بادمجان بومی هند و چین است اما توسط بازرگانان عرب به اروپای جنوبی و منطقه مدیترانه معرفی‌شده است. این محصول دارای ارزش غذایی قابل‌توجهی است زیرا سرشار از ویتامین‌ها، به‌ویژه ویتامین ث، و همچنین مواد معدنی مانند مس، منیزیوم و پتاسیم است (Rosa-Martínez et al., 2021).

یکی از محدودیت‌های کشت بادمجان نیاز به هوای گرم است. درواقع، این محصول تنها در دماهایی که به‌طور مداوم بالاتر از یک آستانه مشخص است رشد می‌کند. با توجه به این حقیقت، کشت گلخانه‌ای بادمجان در سراسر جهان شهرت دارد. کشت گلخانه‌ای مبتنی بر آب‌کشت با کنترل مداوم محیط و بهینه‌سازی شرایط، مانند دما، رطوبت و نور می‌تواند رشد و نمو بادمجان را بهبود بخشد. علاوه بر این، از طریق یک محلول آب متعادل، مواد مغذی را به‌طور مستقیم به ریشه‌های بادمجان رسانده و رشد سالم و قوی را آن را تقویت کند. مهم‌تر از آن، کشت بادمجان در سامانه‌های آب‌کشت محیط کشت خاکی را از حذف کرده و خطر بیماری‌های مرتبط با خاک را کاهش می‌دهد. این سامانه‌ها همچنین اغلب منجر به عملکرد بالاتر و رشد سریع‌تر بادمجان در مقایسه با کشت مبتنی بر خاک می‌شوند. درنتیجه، تولید بادمجان در سامانه‌های گلخانه‌ای آب‌کشت یک‌راه حل امیدوارکننده برای اجرای کشاورزی پایدار و دست‌یابی به امنیت غذایی است. با توجه به موارد مطرح‌شده، در منطقه شمال غرب ایران شامل استان‌هایی مانند آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل و زنجان که الگوهای آب و هوایی و نوسانات دمایی مختلفی را تجربه می‌کنند، تولید بادمجان در گلخانه آب‌کشت راه‌حلی امیدوارکننده برای بهینه‌سازی کشت و تولید بادمجان است. زیرا الگوهای متغیر آب و هوایی و نوسانات دمایی در این منطقه منجر به چالش‌هایی برای کشاورزی سنتی در فضای باز می‌شود. علاوه بر این، کمبود آب و خشک‌سالی سال‌ها است که کشاورزان ایران را تهدید می‌کند درحالی‌که آب‌کشت امکان استفاده بهینه از آب و مواد مغذی را فراهم می‌کند. در این راستا، شمال غرب ایران برای اطمینان از عرضه مداوم بادمجان تازه و ترویج شیوه‌های کشاورزی پایدار و با منابع کارآمد، اقدام به تولید بادمجان تحت سامانه‌های آب‌کشت کرده است.

مراحل کشت بادمجان تحت سامانه‌های آب‌کشت

در این بخش، سامانه‌های آب‌کشت بادمجان مرتبط با پژوهش موردی مذکور در منطقه ارس در آذربایجان شرقی به‌طور خلاصه موردبررسی قرارگرفته است. پس از آماده‌سازی بستر، نهال‌ها به بستر منتقل می‌شود؛ بستر منجر به تضمین رشد رویشی گیاه شده و همچنین رشد زایشی را پس از مدتی با استفاده از مواد غذایی ارتقا می‌بخشد. پتاسیم دی هیدروژن فسفات منیزیم سولفات ۷ هیدراته، پتاسیم سولفات، کلسیم نیترات و غیره کودهایی هستند که برای رشد و نمو نهال‌های بادمجان در منطقه موردپژوهش استفاده می‌شوند. قابل‌ذکر است که سطح pH و EC محیط کشت قبل از انتقال نهال به محیط و همچنین در طول فصل رشد به دلیل وجود کودهای شیمیایی به‌طور مداوم کنترل می‌شود. بهترین pH برای بادمجان باید بین ۶/۵ تا ۷ باشد درحالی‌که سطح EC برای بادمجان بین ۱/۸ تا ۲/۲ باشد. در غیاب گرده‌افشان‌های طبیعی، گلدهی و گرده‌افشانی نیز از طریق روش‌های کنترل‌شده انجام می‌شود.

نظارت و برداشت بادمجان رسیده در مرحله مناسب نیز یک عامل مهم در سامانه آب‌کشت است که در این پژوهش موردی توسط کارگران بررسی و اعلام‌شده است. در پایان فصل رشد، بادمجان رسیده با دست برداشت و بسته‌بندی می‌شود. مراقبت‌های پس از برداشت شامل حذف مواد گیاهی، پاک‌سازی و ضدعفونی اجزای سامانه آب‌کشت انجام می‌شود که برای کشت بعدی بسیار مهم هستند. جدول ۱ فهرستی از مواد مورداستفاده در تولید بادمجان آب‌کشت را ارائه کرده است.

جدول ۱. فهرست موجودی تولید هر تن بادمجان در سامانه‌های آب‌کشت

مقدار	واحد	عامل‌ها
	الف ورودی ها	
۸۳۳	ساعت	نیروی کار
۹/۳	لیتر	دیزل سوخت
۶۳۳	مترمکعب	گاز شهری
۲۰	کیلووات ساعت	الکتریسیته
۰/۸۵	کیلوگرم	پتاسیم دی هیدروژن فسفات
۲/۴۲	کیلوگرم	منیزیم سولفات ۷ هیدراته
۱/۵	کیلوگرم	پتاسیم سولفات
۴/۷	کیلوگرم	کلسیم نیترات
۰/۰۰۸	کیلوگرم	منگنز سولفات مونو هیدراته
۰/۰۰۶۸	کیلوگرم	بوریک اسید
۰/۰۰۷۲	کیلوگرم	روی سولفات ۷ هیدراته
۴۹۵۰	لیتر	آب
۱۶/۷	کیلوگرم	کوکوپیت
۰/۱۵	کیلوگرم	حشره‌کش
۰/۲۹	کیلوگرم	قارچ‌کش
۰/۹	کیلوگرم	پلاستیک بستر
۱۳/۶	مترمربع	شیشه سازه گلخانه
۱۹۸/۶	کیلوگرم	فلز سازه گلخانه
۱۳/۴	کیلوگرم	ماشین‌آلات و تجهیزات
۶۰	کیلوگرم	مقوا و کارتن بسته‌بندی
۲۰	کیلوگرم	پلاستیک بسته‌بندی
	ب (خروجی‌ها	
۲۰۹	کیلوگرم	بقایای خشک گیاه
۱۷/۶	کیلوگرم	بستر (کوکوپیت+پلاستیک)
۱	تن	محصول تولیدی (بادمجان)
۱۶۷	کیلوگرم	آب

تولید بادمجان تحت سامانه زیستی-دایره‌ای

مسیر اول: تولید کمپوست

تولید بادمجان تحت سامانه‌های آب‌کشت مقادیر قابل‌توجهی از ضایعات آلی ازجمله بقایای گیاهی و میوه‌های دور ریخته شده را به دنبال دارد که مدیریت نادرست آن‌ها پیامدهای نگران‌کننده‌ای را به خود اختصاص داده است. مقاله حاضر یک رویکرد اقتصاد زیستی-دایره‌ای را برای ارزش‌گذاری ضایعات سبز بادمجان به کمپوست غنی از مواد مغذی پیشنهاد می‌کند؛ این رویکرد حلقه بین تولید زباله و بازسازی منابع را می‌بندد. کشاورزان می‌توانند نیاز به نهاده‌های خارجی را کاهش دهند و یک سامانه کشاورزی پایدارتر را با مدیریت مؤثر زباله از طریق کمپوست ایجاد کنند. به‌طور خلاصه، بقایای سبز گیاه بادمجان، میوه‌های دور ریخته شده و سایر ضایعات آلی از منطقه کشت جمع‌آوری و جداسازی می‌شوند. باید اطمینان حاصل شود که ناخالصی‌ها مانند پلاستیک یا مواد غیرآلی حذف‌شده باشند. تولید کمپوست با لایه‌بندی ضایعات بادمجان مانند کاه و برگ به‌صورت توده ایجاد می‌شود. توده‌ها باید به‌طور منظم چرخانده و هوادهی شوند تا تجزیه کامل صورت گرفته و از ایجاد بو جلوگیری شود. فعالیت میکروبی باید با حفظ سطوح رطوبت مناسب و متعادل کردن نسبت کربن به نیتروژن بهینه شود. توده‌های کمپوست طی چند ماه به مرحله بلوغ رسیده و آماده بهره‌برداری می‌شوند. درنهایت، پس از تجزیه کامل، کمپوست غربالگری می‌شود تا مواد بزرگ یا فرآوری نشده حذف شود و درنتیجه محصولی ریز و متراکم از مواد مغذی به دست می‌آید. جدول ۲ فهرستی از مواد مورداستفاده در تولید کمپوست از بقایای سبز بادمجان را نشان می‌دهد.

جدول ۲. فهرست موجودی تولید کمپوست به ازای هر تن از ضایعات سبز بادمجان (وزن خشک) در سامانه‌های آب‌کشت

مقدار	واحد	عامل‌ها
	ورودی (الف	
۴	کیلوگرم	ماشین‌آلات و تجهیزات
۴۰۰	کیلوگرم	آب
۰/۵	کیلوگرم	باکتری
۱	تن	ضایعات سبز بادمجان
۱۰	لیتر	دیزل سوخت
۶	کیلووات ساعت	الکتریسیته
۱	کیلوگرم	نیتروژن معدنی
	خروجی (ب	
۹۵۰	کیلوگرم	کمپوست
	عناصر موجود در کمپوست	
۷/۹۸	کیلوگرم	N
۴/۱۸	کیلوگرم	P
۱۷/۸۶	کیلوگرم	K
۳/۷	کیلوگرم	Cl
۱/۸	کیلوگرم	Na
۱۷/۲۹	کیلوگرم	Ca
۹/۳۱	کیلوگرم	Mg
۲/۵۴	گرم	Ni
۰/۵	گرم	Pb
۵۲۶/۷	لیتر	آب

مسیر دوم: تولید ذغال‌زیستی

ذغال‌زیستی یک ماده غنی از کربن است که در احتراق زیست‌توده از طریق پیرولیز تولید می‌شود که کاربردهای مختلفی در کشاورزی، صنعت، ساخت‌وساز و سایر موارد دارد. بنابراین، استفاده از ذغال‌زیستی مشتق شده از ضایعات سبز محصولات گلخانه‌ای به‌عنوان محیطی برای کشت گیاهان آب‌کشت، رویکردی مقرون‌به‌صرفه و سازگاربامحیط‌زیست برای مدیریت پسماندهای سبز به کشاورزان ارائه می‌کند و درعین‌حال به‌عنوان بستر، کود و منبع انرژی نیز عمل می‌کند. در این راستا، ضایعات سبز بادمجان برای تولید ذغال‌زیستی استفاده‌شده است. دستورالعمل‌های بین‌المللی پیشنهاد می‌کنند که خوراک ذغال‌زیستی باید کمتر از ۲ درصد ناخالصی داشته باشد (Dunlop et al., 2015). به‌منظور رفع این مشکل، زباله‌های اضافی مانند پلاستیک جمع‌آوری می‌شود تا محتوای ناخالصی را به زیر ۲ درصد کاهش یابد. پس‌ازآن، ضایعات بادمجان خشک‌شده با استفاده از یک کوره آزمایشگاهی در معرض پیرولیز (فرایند تجزیه حرارتی) قرارگرفته‌اند. پیرولیز در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس انجام شد درحالی‌که نرخ حرارت کنترل‌شده ۶ درجه سلسیوس در دقیقه و زمان‌ماند ۱ ساعت و ۳۰ دقیقه در طول پیرولیز حفظ شد (Dunlop et al., 2015). برای کنترل شرایط، از گاز نیتروژن با سرعت ۵۰ لیتر استفاده شد. درنهایت، ذغال‌زیستی حاصل از یک الک ۸ میلی‌متری عبور داده شد. فهرستی از تمام مواد مورداستفاده در تولید ذغال‌زیستی از ضایعات سبز بادمجان در جدول ۳ ارائه‌شده است.

ذکر این نکته ضروری است که بقایای کشاورزی در ایران به طور معمول سوزانده یا دفع می‌شوند؛ در نگاه اول این روش‌ها از نظر هزینه‌ای مقرون به صرفه به نظر می‌رسند. این در حالی است که سوزاندن منجر به نشر عظیمی از گازهای مخرب به محیط شده و سلامت انسان را تهدید می‌کند، مضاف بر این‌که سوزاندن بقایا در منطقه ارس به دلیل ملاحظات سیاسی در عمل ممکن نیست. به علاوه لندفیل‌های موجود در منطقه ارس درحال‌حاضر ظرفیت کافی برای پذیرش حجم گسترده بقایای سبز را ندارند. براساس فهرست موجودی ارائه شده در پژوهش حاضر، فناوری تولید کمپوست و همچنین ذغال‌زیستی بسیار ساده و قابل اجراست. همچنین نیاز به تجهیزات پرهزینه‌ای ندارد و مهم‌تر از همه بازیابی مواد با ارزش افزوده‌ای همچون کمپوست و ذغال‌زیستی برخلاف گزینه‌های مرسوم دفع بقایا، منجر به درآمد قابل توجهی خواهد شد. درحال‌حاضر به دلیل افزایش آگاهی‌های زیست‌محیطی در مورد مصرف کودهای شیمیایی، علاقه زیادی به مصرف کودهای زیستی مانند کمپوست و ذغال‌زیستی وجود دارد که می‌تواند زمینه را برای بازاریابی موفق این محصولات فراهم کند. براساس

پیگیری های نویسندگان مقاله در حال حاضر قیمت هر کیلو ذغال‌زیستی در بازار ایران بیش از ۳۰۰ هزار ریال و هر کیلو کمپوست در حدود ۲۰ هزار ریال است که به نظر می‌رسد گزینه‌های جذابی برای تولید باشند.

جدول ۳. فهرست موجودی تولید ذغال‌زیستی به ازای هر تن از ضایعات سبز بادمجان (وزن خشک) در سامانه‌های آب‌کشت

مقدار	واحد	عامل‌ها
	ورودی (الف	
۳۳۰	لیتر	آب
۱۰	مترمکعب	گاز شهری
۱	تن	ضایعات سبز بادمجان
۱	کیلووات ساعت	الکتریسیته
	خروجی (ب	
۸۰/۳	کیلوگرم	ذغال‌زیستی
		گاز
۱۹۰/۹	کیلوگرم	هیدروژن
۲۰/۰۶	کیلوگرم	متان
۱۰۰	لیتر	آب

ارزیابی زیست‌محیطی مسیرهای پیشنهادی بر اساس رویکرد ارزیابی چرخه زندگی

در پژوهش حاضر از روش ارزیابی چرخه زندگی برای ارزیابی زیست‌محیطی تولید بادمجان تحت سامانه خطی و زیستی-دایره‌ای استفاده‌شده است. این رویکرد، راه‌کاری امیدوارکننده برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی یک محصول، فرآیند یا خدمات در طول چرخه زندگی آن، یعنی از استخراج مواد خام، استفاده از آن‌ها برای تولید تا دفع یا بازیافت آن در پایان زندگی محصول است (ISO, 2006). این رویکرد که با توجه به دستورالعمل‌های سازمان بین‌المللی استاندارد تدوین‌شده است، چشم‌اندازی جامع از اثرات زیست‌محیطی یک محصول، فرآیند یا خدمات ارائه می‌دهد و درنتیجه به انتخاب آگاهانه برای به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی و ترویج شیوه‌های پایدار کمک می‌کند. به‌طورکلی، ارزیابی چرخه زندگی شامل تعریف هدف و دامنه، تدوین داده‌های موجودی، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و تفسیر نتایج است. جنبه‌های کلیدی تعریف هدف و دامنه به‌عنوان گام نخست یک پژوهش ارزیابی چرخه زندگی عبارت‌اند از:

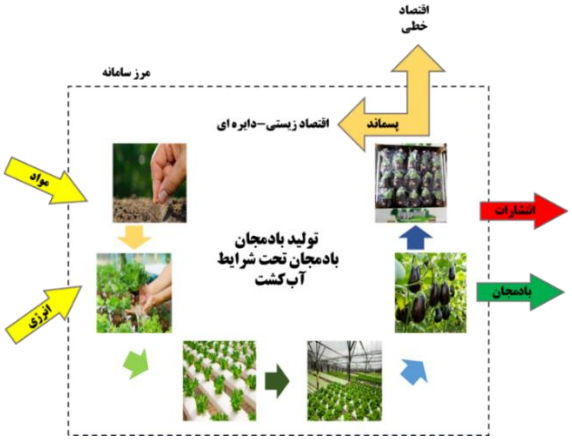
هدف: این جنبه مشخص می‌کند که چرا ارزیابی انجام می‌شود. آیا این ارزیابی برای طراحی زیست‌محیطی، سیاست‌گذاری، ادعاهای بازاریابی یا آگاهی عمومی از حفظ محیط‌زیست است؟ در این راستا، هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثرات زیست‌محیطی تولید بادمجان تحت سامانه آب‌کشت با گذر از اقتصاد خطی به سمت اقتصاد زیستی-دایره‌ای تحت دو مسیر کمپوست و زغال زیستی به شناسایی نقاط ضعف و قوت این انتقال است.

واحد عملکردی: این جنبه می‌تواند مقداری از یک محصول، یک خدمت یا یک عملکرد کاربردی باشد. به‌طورمعمول، در سامانه‌های کشاورزی، واحد عملکردی بر اساس عملکرد محصول یا سطح زیر کشت آن تعریف می‌شود. ازاین‌رو، پژوهش جاری یک کیلوگرم بادمجان تولیدشده را تحت سامانه‌های خطی و زیستی-دایره ای به‌عنوان واحد عملکردی انتخاب کرده است.

مرزهای سامانه: این جنبه مشخص می‌کند که پژوهش چه مراحلی از چرخه زندگی را شامل می‌شود. مرز سامانه در پژوهش حاضر محدود به تولید بادمجان با ورود نهاده‌ها به گلخانه تا خروج بادمجان‌های بسته‌بندی‌شده برای سامانه خطی است. درحالی‌که همچنین شامل ارزش‌گذاری زباله به‌عنوان کمپوست و ذغال‌زیستی تحت سامانه‌های زیستی- دایره‌ای است (شکل ۱).

لازم به ذکر است که در سامانه‌های تولیدی با محصولات متعدد، اثرات زیست‌محیطی بین محصولات مشترک مختلف تخصیص داده می‌شود. تخصیص مفهومی است که در رویکرد ارزیابی چرخه زندگی به‌منظور توزیع اثرات و بارهای زیست‌محیطی بین محصولات مورداستفاده قرار می‌گیرد (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2020). به عبارت بهتر، تخصیص مسئول نسبت دادن بارهای زیست‌محیطی به هر محصول مشترک به‌طور منصفانه و شفاف است. تخصیص بر اساس روش‌های مختلفی انجام می‌شود که انتخاب آن به عواملی مانند ماهیت فرآیند، اهداف پژوهش و در دسترس بودن داده‌ها بستگی دارد. تخصیص به‌طورکلی بر اساس یک پارامتر فیزیکی مانند جرم یا انرژی و یا ارزش اقتصادی است. ازآنجاکه انتخاب روش تخصیص بر نتایج یک پژوهش تأثیر می‌گذارد، شفافیت درروش انتخاب‌شده برای اعتبار ارزیابی بسیار مهم است. در این راستا، یک روش تخصیص مبتنی بر جرم برای تخصیص اثرات زیست‌محیطی

تولید بادمجان تحت یک رویکرد اقتصاد زیستی–دایره‌ای انتخاب‌شده است. براساس استاندارد ایزو، در مواردی که رابطه فیزیکی (یعنی کیلوگرم، متر مربع، مترمکعب، و غیره) را نمی‌توان ایجاد کرد یا به عنوان مبنایی برای تخصیص استفاده کرد، داده‌های ورودی و خروجی محیطی ممکن است بین محصولات مشترک به نسبت ارزش اقتصادی محصولات تخصیص داده شود. از سوی دیگر، تخصیص اقتصادی باعث می‌شود که تأثیر یک محصول در حالی که تولید ثابت است، با قیمت آن تغییر کند. بنابراین، تخصیص انبوه ترجیح داده می‌شود (Michiels et al., 2021)



شکل ۱. مرز سامانه تولید بادمجان در سامانه‌های آب‌کشت بر اساس رویکرد خطی و رویکرد اقتصاد زیستی–دایره‌ای

فهرست موجودی یا سیاهه به‌عنوان گام دوم یک پژوهش ارزیابی چرخه زندگی، یک مفهوم مهم در علم محیط‌زیست و پایداری است. هدف از تدوین فهرست موجودی ارائه تصویری واضح از جریان‌های ورودی و خروجی مرتبط با یک فعالیت خاص است. این مرحله یک مرحله زمان‌بر و پرهزینه در یک پژوهش ارزیابی چرخه زندگی است که به جمع‌آوری و ارزیابی جامع داده‌های مرتبط با کل چرخه زندگی یک محصول، فرآیند یا خدمات اشاره دارد. به عبارت بهتر، فهرست موجودی شامل کمی کردن و مستندسازی جریان‌های از ورودی محیط به سامانه و جریان‌های خروجی به محیط شامل هوا، آب‌وخاک در هر مرحله از چرخه زندگی بر اساس واحد عملکردی سامانه ارزیابی‌شده است (Suh and Huppes, 2005). دو مجموعه داده شامل داده‌های پیش‌زمینه[1] و پس‌زمینه[2] وجود دارد که در تحلیل سیاهه باید فهرست شوند. داده‌های پس‌زمینه با اثرات زیست‌محیطی تولید و حمل‌ونقل مواد و انرژی مورداستفاده در سامانه مرتبط است (جدول ۱ تا ۳) که معمولاً از پایگاه‌های داده معتبر استخراج می‌شود. این پژوهش داده‌های پس‌زمینه را از پایگاه‌های داده اکواینونت[3]، اگری فوت پرینت[4]، و یواس ال سی ای[5] استخراج کرده است. داده‌های پیش‌زمینه نیز به نوع و مقدار ورودی‌ها و خروجی‌ها به/از سامانه، ازجمله مواد و انرژی مورداستفاده و همچنین محصولات اصلی، محصولات مشترک، پسماندها و همچنین انتشارات به هوا، آب‌وخاک مربوط می‌شود. لازم به ذکر است که انتشارات مربوط به احتراق دیزل و گاز طبیعی از پایگاه داده یواس ال سی‌ای موجود در نرم‌افزار سیماپرو مشتق شده است. به‌منظور محاسبه انتشار حاصل از کاربرد کودهای شیمیایی در سامانه‌های آب‌کشت، از عوامل انتشار ارائه‌شده توسط یانگ[6] و کیم[7] استفاده‌شده است (Yang and Kim, 2020). به‌طورکلی، در آب‌کشت، ۷۸–۶۹ درصد از نیتروژن از طریق نیتروژن زدایی و ۱۵–۷ درصد از طریق فاضلاب از دست می‌رود، درحالی‌که ۷۴–۵۲ درصد فسفر از طریق فاضلاب و ۲۷–۱۵ درصد از طریق بارش‌ها از دسترس خارج می‌شود. اطلاعات مربوط به عوامل انتشار برای کاربرد حشره‌کش و قارچ‌کش از پژوهش خوشنویسان و همکاران به‌دست‌آمده است (Khoshnevisan et al., 2017).

ارزیابی اثرات چرخه زندگی به‌عنوان گام سوم یک پژوهش ارزیابی چرخه زندگی، فرآیند ارزیابی اثرات زیست‌محیطی بالقوه تولید یک محصول، فرآیند یا فعالیت در کل چرخه زندگی آن بر اساس فهرست موجودی را شامل می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، این مرحله شامل

---

1 Background data
2 Foreground data
3 Ecoinvent
4 Agri footprint
5 US LCA
6Yang
7 Kim

کمی‌سازی و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی شناسایی‌شده در مرحله فهرست موجودی است. روش‌های مختلفی برای ارزیابی اثرات چرخه زندگی وجود دارد که می‌توان آن‌ها را بر اساس اهداف پروژه انتخاب کرد. روش رسیپی[1] یک روش شناخته‌شده برای ارزیابی اثرات چرخه زندگی که به‌طور گسترده مورداستفاده قرار می‌گیرد، به‌منظور ارزیابی اثرات چرخه زندگی در این پژوهش انتخاب‌شده است. این روش چارچوبی ساختاریافته برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های مختلف ارائه داده و ارزیابی جامعی از اثرات زیست‌محیطی متعدد ارائه می‌دهد. این روش اثرات زیست‌محیطی را در دو سطح نقطه میانی و نقطه پایانی نشان می‌دهد. اثرات نقطه میانی شاخص‌های میانی هستند که مسائل زیست‌محیطی خاص را نشان می‌دهند. آن‌ها برای اتصال انتشار و استفاده از منابع شناسایی‌شده در مرحله فهرست موجود به اثرات بالقوه زیست‌محیطی استفاده می‌شوند. اثرات نقطه پایانی قابل‌درک‌تر هستند زیرا شاخص‌های نقطه میانی را به اثرات کلی بر سلامت انسان، زیست‌بوم و منابع تبدیل می‌کنند. این شاخص‌ها معمولاً برای ارائه یک دید جامع از عملکرد زیست‌محیطی یک محصول یا فعالیت می‌توانند وزن دهی نیز شوند. وزن دهی فرآیندی است که اهمیت یا اولویت نسبی را به دسته‌های مختلف اثر اختصاص می‌دهد و امکان مقایسه ساده عملکرد محیطی کلی محصولات، فرآیندها یا فعالیت‌های مختلف را فراهم می‌کند (Kiehbadroudinezhad et al., 2023a) . قابل‌ذکر است که ارزیابی اثرات زیست‌محیطی در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو انجام‌شده است.

یافته‌های پژوهش

جدول ۴ اثرات زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت را تحت رده‌های اثر میانی نمایش می‌دهد. بر اساس داده‌های مندرج در جدول ۴، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت به گرمایش جهانی به‌اندازه ۲/۳۷ کیلوگرم کربن دی‌اکسید معادل افزوده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که حدود ۶۹ درصد از این انتشار مربوط به تولید و مصرف گاز طبیعی است (شکل ۲). این آمار نشان می‌دهد که با کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و افزایش بهره‌وری می‌توان در کاهش اثرات منفی بر آینده زیست‌محیطی مؤثر بود. داده‌های جدول ۴ همچنین نشان می‌دهد که تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت باعث افزایش $۴/۳۱ \times ۱۰^{-۷}$ کیلوگرم تری‌کلروفلوئورومتان معادل، که به تخریب لایه ازن استراتوسفر منجر می‌شود، می‌شود. از این مقدار، ۲۸ درصد به تولید کود کلسیم نیترات مصرفی بازمی‌گردد. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی مصرف کودها، انتخاب جایگزین‌های طبیعی و آلی برای کودهای شیمیایی و افزایش بهره‌وری در فرآیند تولید می‌باشد. تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت باعث افزایش میزان ۰/۰۲۲ کیلوبکرل (معادل کبالت-۶۰) به تابش یونیزه کننده می‌شود. از این مقدار، ۲۹ درصد مربوط به تولید استیل مصرفی در سازه گلخانه است. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از استیل در ساختارهای گلخانه برتابش یونیزه کننده در زمان تولید بادمجان تأثیر قابل‌توجهی دارد و برای کاهش این اثر، می‌توان از مواد جایگزین خود پایدارتر و با کمترین تأثیر زیست‌محیطی، بهبود فناوری‌های ساخت گلخانه و اجرای استانداردهای محیطی در تولید سازه‌ها استفاده کرد. با توجه به آمار جدول ۴، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت باعث افزایش میزان ۰/۰۰۲۹ کیلوگرم اکسیدهای نیتروژن معادل می‌شود که در تشکیل ازن و اثر آن بر سلامت انسان دخیل است. از این مقدار، ۴۳ درصد مربوط به تولید و مصرف گاز طبیعی است. برای مقابله با این اثر منفی، همان‌طور که ذکر شد تغییر به منابع انرژی پاک‌تر، بهره‌وری بیشتر در فرآیند تولید، و اعتماد به فناوری‌های محیط‌زیستی می‌تواند گام‌های مؤثری باشد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت باعث افزایش مقدار ۰/۰۰۳کیلوگرم اکسیدهای نیتروژن معادل می‌شود که در تشکیل ازن و اثر آن بر زیست‌بوم‌های خاکی تأثیرگذار است. از این مقدار، ۴۲ درصد یا حدود ۰/۰۰۱۳کیلوگرم معادل به تولید و مصرف گاز طبیعی اختصاص دارد. اثر افزایش این گازبر زیست‌بوم‌های خاکی که در حفظ تعادل زیست‌بوم نقش بسزایی دارند، نشان‌دهنده ضرورت اتخاذ سیاست‌های حمایتی از کشاورزی پایدار و مدیریت مناسب منابع طبیعی است.

با توجه به آمار جدول ۴، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت به افزایش میزان ۰/۰۰۴۸کیلوگرم ذرات معلق (۲,۵) معادل می‌شود که ۷۶ درصد یا تقریباً ۰/۰۰۳۷ کیلوگرم از این میزان به تولید و مصرف گاز طبیعی تعلق دارد. تأثیرات افزایش ذرات معلق در هوابر کیفیت هوای محیط‌زیست و بهداشت عمومی نه‌تنها بر افراد محلی بلکه در مقیاس گسترده‌تر نیز اثرات دارد. برای کاهش این تأثیرات آلودگی هوا، نیاز به استفاده هوشمندانه از منابع انرژی، افزایش بهره‌وری در تولید، و ترویج فناوری‌های پاک و پایدار است تا همگان بتوانند از آثار زیان‌بار موجود در تولید بادمجان بهره‌مند شوند. بر اساس داده‌های آورده شده در جدول ۴، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت باعث افزایش میزان ۰/۰۱۵ کیلوگرم سولفور دی‌اکسید معادل می‌شود که در اسیدی شدن خاک تأثیرگذار است. از این

1 ReCiPe 2016

مقدار، ۸۶ درصد یا تقریباً ۰/۰۱۲۹کیلوگرم معادل به تولید و مصرف گاز طبیعی اختصاص دارد. داده‌های گزارش‌شده در جدول ۴ نشان می‌دهند که تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت به افزایش میزان ۰/۰۰۰۴۱ کیلوگرم فسفر معادل در محیط می‌شود. این افزایش فسفر به اختناق دریاچه‌ای آب سطحی انجامیده که از این مقدار، ۴۱ درصد به تولید استیل مصرفی در سازه‌های گلخانه اختصاص دارد. این نشان‌دهنده محدود کردن استفاده از استیل در سازه‌های گلخانه است تا اثرات منفی بر آب‌های سطحی کاهش یابد. تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت منجر به افزایش ۰/۰۰۰۰۸ کیلوگرم نیتروژن معادل در محیط می‌شود که به اختناق دریاچه‌ای آب آزاد منتهی می‌شود. بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جدول ۴، از این مقدار، ۳۵ درصد به تولید کارتن بسته‌بندی مصرفی اختصاص دارد. این نتیجه نشان‌دهنده اهمیت اقدامات کاهش مصرف کارتن در بسته‌بندی محصولات کشاورزی است. ازجمله راهکارهای مؤثر در این زمینه می‌توان به افزایش استفاده از مواد بسته‌بندی بازیافتی و مدیریت پایدار در زنجیره تولید و بسته‌بندی اشاره نمود. این اقدامات نه‌تنها می‌توانند به کاهش اثرات منفی اختناق دریاچه‌ای آب آزاد کمک کنند بلکه همچنین به حفظ توازن زیست‌محیطی و حفظ منابع طبیعی کمک خواهند کرد.

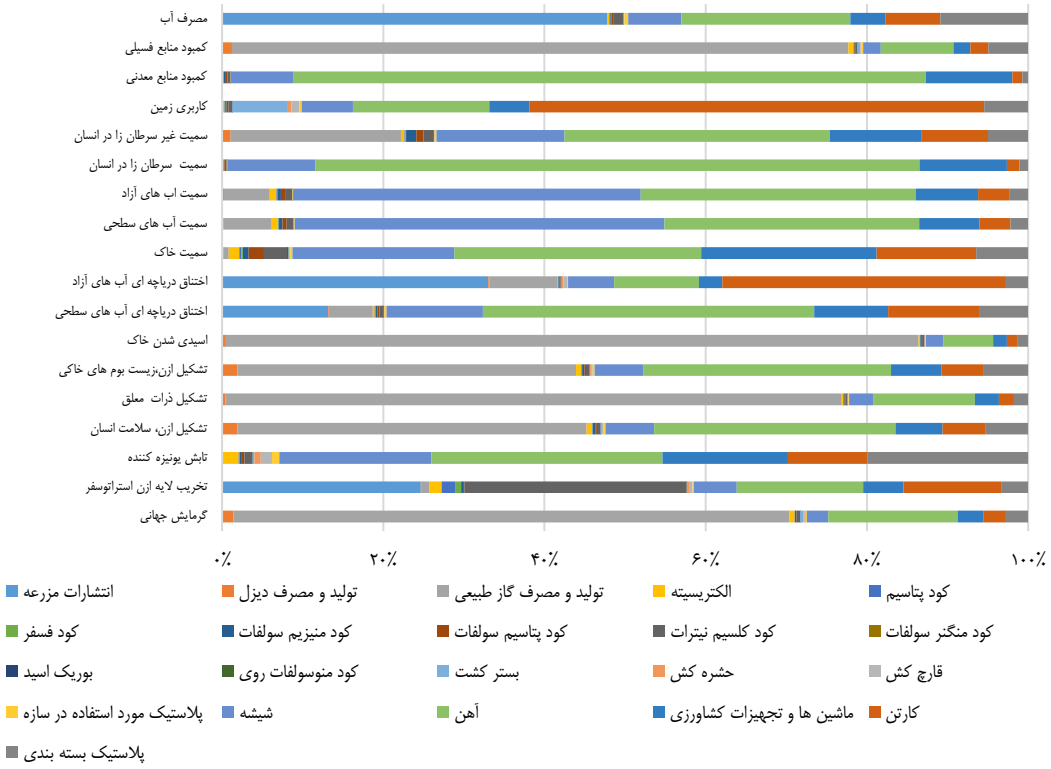
بر اساس ارقام گزارش‌شده در جدول ۴، تولید هر کیلوگرم بادمجان باعث افزایش ۲/۱۱ کیلوگرم دی کلروبنزن معادل در محیط خاک می‌شود. از این مقدار، ۳۱ درصد یا تقریباً ۰/۰۶۴۵ کیلوگرم به تولید استیل مصرفی در سازه‌های گلخانه اختصاص دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که مصرف استیل در ساختارهای گلخانه می‌تواند به میزان قابل‌توجهی به سمیت خاک افزوده شود. برای کاهش این تأثیر منفی، پیشنهاد می‌شود که از مواد بازیافتی در ساخت گلخانه‌ها استفاده شود و همچنین از روش‌های مدیریت استیل بازیافتی در فرآیند تولید بهره گرفته شود. این اقدامات می‌تواند به حفظ سلامت خاک و کاهش اثرات منفی سمیت در محیط‌زیست کمک کنند. تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت باعث افزایش ۰/۰۷۴۶ کیلوگرم دی کلروبنزن معادل در آب‌های سطحی می‌شود. از این مقدار، ۴۶ درصد به تولید شیشه مصرفی در سازه گلخانه اختصاص دارد. بر اساس داده‌های ارائه‌شده، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت ۰/۰۹۶۸ کیلوگرم دی کلروبنزن معادل می‌شود. از این مقدار، ۴۳ درصد به تولید شیشه مصرفی در سازه‌های گلخانه اختصاص دارد. برای کاهش این تأثیر منفی، اتخاذ راهکارهایی همچون استفاده از شیشه‌های کم‌سمیت و توسعه روش‌های بازیافت و استفاده مجدد از شیشه می‌تواند به محیط‌زیست کمک کند. این اقدامات می‌توانند به حفظ سلامت آب‌های سطحی و آزاد و کاهش تأثیرات منفی در آن‌ها کمک نمایند. بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جدول ۴، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت باعث افزایش۰/۲۴۷ کیلوگرم دی کلروبنزن معادل برای شاخص سمیت سرطان‌زایی در انسان است. از این مقدار، ۷۵ درصد به تولید استیل مصرفی در سازه‌های گلخانه اختصاص دارد. به‌منظور کاهش این تأثیر منفی، می‌توان از جایگزین‌های پایدارتر و همچنین از استیل بازیافتی استفاده کرد تا به حفظ سلامت انسان و کاهش اثرات منفی در این زمینه کمک شود. بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جدول ۴، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت باعث افزایش ۰/۸۲۸ دی کلروبنزن معادل سمیت غیر سرطان‌زا در انسان است. از این مقدار، ۳۳ درصد به تولید استیل مصرفی در سازه‌های گلخانه اختصاص دارد. با تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت، مقدار ۰/۰۳۶۶مترمربع سالانه از زمین‌های کشاورزی موردنیاز است. از این میزان، ۵۶ درصد به تولید کارتن مصرفی در بسته‌بندی اختصاص دارد. در این راستا، استفاده از مواد جایگزین به‌ویژه مواد بازیافت پذیر و همچنین مواد بسته‌بندی بازیافتی می‌تواند به تحقق اهداف پایداری درزمینه کاربری زمین کمک کند.

بر اساس داده‌های ارائه‌شده، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت به افزایش ۰/۰۱۵۷ تن مس معادل منجر می‌شود. از این میزان، ۷۹ درصد به تولید استیل در سازه‌های گلخانه اختصاص دارد. همان‌طور که ذکر شد، استفاده از استیل بازیافتی و مواد جایگزین می‌تواند در کاهش اثرات منفی کمبود منابع معدنی کمک کند. این اقدامات می‌توانند به افزایش بازیافت مواد و استفاده بهینه از منابع طبیعی منجر شده و همچنین کمک به حفظ محیط‌زیست و کاهش اثرات منفی در حوزه کمبود منابع معدنی نمایند. با توجه به اطلاعات ارائه‌شده، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت منجر به حذف ۰/۷۶۹ تن نفت خام معادل، به‌ویژه گاز طبیعی، می‌شود. به عبارت بهتر، از این مقدار، ۷۶ درصد به تولید و مصرف گاز طبیعی اختصاص دارد. همان‌طور که ذکر شد، استفاده از منابع انرژی پاک‌تر و فناوری‌های کم‌مصرف به‌عنوان راهکارهای ممکن برای کاهش وابستگی به گاز طبیعی و دیگر منابع فسیلی در تولید بادمجان تحت شرایط آب‌کشت مطرح می‌شود.با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در جدول ۴، مصرف آب برای تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت با ۰/۰۱۰۴ مترمکعب محاسبه‌شده است. از این مقدار، ۴۸ درصد به مصرف مستقیم آب در گلخانه‌ها برمی‌گردد. برای بهبود بهره‌وری و کاهش مصرف آب در آب‌کشت، انجام تغییرات و اعتماد به راهکارها و فن‌های مدرن ضروری است. ازجمله این راهکارها می‌توان به استفاده از مواد جاذب نوین که بهبود در نگه‌داری آب را داشته باشند و استفاده از سنسورها و کنترل‌گرهای هوشمند برای مدیریت دقیق میزان آب اشاره کرد.

همچنین، از سامانه‌های خنک‌کننده برای کاهش تبخیر آب و جلوگیری از افت تبادل گازهای گیاهی استفاده کرد.

جدول ۴. اثرات زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت بر اساس رده‌های اثر میانی

رده اثر	واحد	مقدار
گرمایش جهانی	kg CO_2 eq	۳۰/۲
تخریب لایه ازن استراتوسفر	kg CFC11eq	۴/۱۳ ×۱۰$^{-۷}$
تابش یونیزه کننده	kBq Co-60 eq	۲/۲۱ ×۱۰$^{-۲}$
تشکیل ازن، سلامت انسان	kg NOx eq	۲/۹۱ ×۱۰$^{-۳}$
تشکیل ذرات معلق	kg PM2.5eq	۴/۷۹ ×۱۰$^{-۳}$
تشکیل ازن، زیست‌بوم‌های خاکی	kg NO_x eq	۳/۰۲ ×۱۰$^{-۳}$
اسیدی شدن خاک	kg SO_2 eq	۱/۴۷ ×۱۰$^{-۲}$
اختناق دریاچه‌ای آب‌های سطحی	kg P eq	۴/۱۰ ×۱۰$^{-۴}$
اختناق دریاچه‌ای آب‌های آزاد	kg N eq	۷/۹۲×۱۰$^{-۵}$
سمیت خاک	kg 1,4 DCB	۱۱/۲
سمیت آب‌های سطحی	kg 1,4 DCB	۷/۴۶ ×۱۰$^{-۲}$
سمیت آب‌های آزاد	kg 1,4 DCB	۹/۶۸ ×۱۰$^{-۲}$
سمیت سرطان‌زا در انسان	kg 1,4 DCB	۲/۴۸ ×۱۰$^{-۱}$
سمیت غیر سرطان‌زا در انسان	kg 1,4 DCB	۱/۲۸ ×۱۰$^{-۱}$
کاربری زمین	m^2a crop eq	۳/۶۶ ×۱۰$^{-۲}$
کمبود منابع معدنی	kg Cu eq	۱/۵۷ ×۱۰$^{-۲}$
کمبود منابع فسیلی	kg oil eq	۱/۶۹ ×۱۰$^{-۱}$
مصرف آب	m^3	۱/۰۴ ×۱۰$^{-۲}$



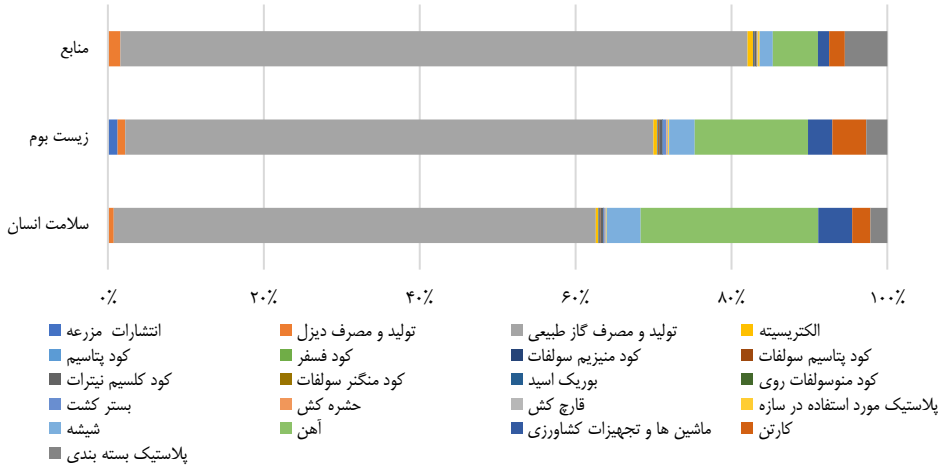
شکل ۲. سهم نهاده‌ها در اثرات زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت بر اساس رده‌های اثر میانی

جدول ۵ اثرات زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت را تحت رده‌های خسارت پایانی نمایش می‌دهد. بر اساس داده‌های مندرج در جدول ۵، تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت به‌سلامت انسان به‌اندازه ۶/۱۶ ×۱۰$^{-۶}$ دالی خسارت می‌زند که ۶۲ درصد این خسارت ناشی از تولید و مصرف گاز طبیعی است (شکل ۳). همچنین، در حوزه زیست‌بوم، خسارت تولید هر

کیلوگرم بادمجان برابر با $۱/۰۸ \times ۱۰^{-۸}$ گونه در سال هست درحالی‌که ۶۸ درصد این خسارت مربوط به تولید و مصرف گاز طبیعی است. در زمینه منابع، مقدار کل خسارت ۰/۲۶۱ دلار تخمین زده‌شده است. در این میان، گاز طبیعی با مقدار ۰/۲۱ دلار به‌عنوان مهم‌ترین عامل شناخته‌شده است. بر اساس تحلیل اثرات زیست‌محیطی در جدول ۵، گاز طبیعی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل در تولید بادمجان تحت شرایط آب‌کشت، نقش حیاتی در خسارت‌های زیست‌محیطی این فرآورده دارد. ازآنجایی‌که گاز طبیعی برای گرمایش گلخانه‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد، برای کاهش این خسارت منفی و بهبود مدیریت زیست‌محیطی، اقداماتی نظیر استفاده از منابع انرژی پایدار مانند خورشید یا باد، بهینه‌سازی کار آیی سامانه‌های گرمایش گلخانه‌ها، بهره‌مندی از فناوری‌های جدید برای تولید و مصرف انرژی در گلخانه‌ها، و ارائه آموزش‌های لازم به کشاورزان می‌تواند اقدامات مؤثری باشند. اتخاذ راهکارهای مناسب برای جلوگیری از اثرات منفی تولید و مصرف گاز طبیعی ، اهمیت زیادی در جهت حفظ محیطزیست و کاهش خسارات زیست‌محیطی ایفا می‌کند. همچنین، همکاری بین صنعت، دولت، و کشاورزان در اجرای این راهکارها می‌تواند به تحقق اهداف مدیریت پایدار منابع و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند.

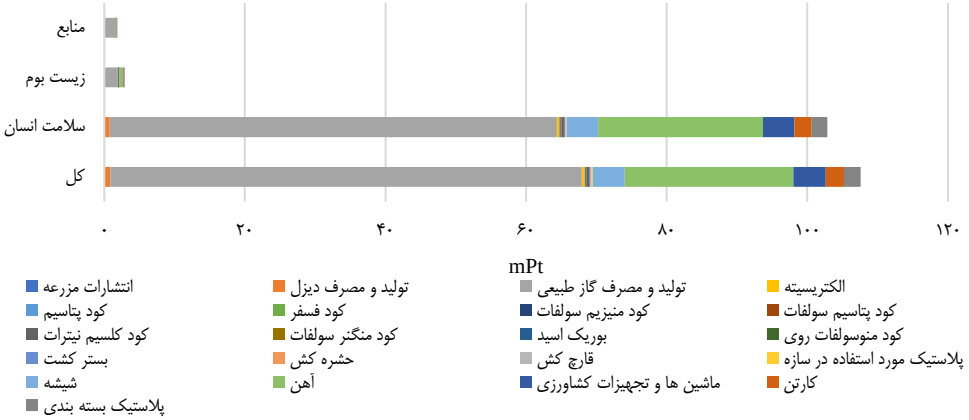
جدول ۵. اثرات زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت بر اساس رده‌های خسارت پایانی

رده خسارت	واحد	کل
سلامت انسان	DALY	$۶/۱۶ \times ۱۰^{-۶}$
زیست‌بوم	species/yr	$۱/۰۸ \times ۱۰^{-۸}$
منابع	USD2013	۰/۲۶۱



شکل۳. سهم نهاده‌ها در اثرات زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت بر اساس رده‌های خسارت پایانی

شکل ۴ نتایج وزن دهی زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت را نشان می‌دهد. درمجموع، خسارت به‌سلامت انسان با سهمی برابر ۹۵ درصد بسیار بالاتر از سایر رده خسارت‌هاست و نقش اصلی را در خسارت کل ایفا می‌کند. در این رده خسارت، تولید و مصرف گاز طبیعی و همچنین تولید استیل مصرفی در بازده گلخانه به‌عنوان مهم‌ترین عامل تعیین‌شده است. برای حل این مسئله، اتخاذ راهکارهایی نظیر استفاده از منابع پایدار و بهینه‌سازی فرآیندها می‌تواند به بهبود وضعیت کمک کند.



شکل ۴. سهم نهاده‌ها در اثرات زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت بر اساس رده‌های خسارت پایانی وزن‌دار شده

جدول۶ درصد تغییرات گذر از تولید خطی بادمجان به سمت تولید بر اساس رویکرد زیستی–دایره ای را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تولید کمپوست از بقایای سبز بادمجان تأثیرات قابل‌توجهی براثرات زیست‌محیطی دارد. در رده‌ی "گرمایش جهانی"، مسیر کمپوست باعث کاهش ۱۶/۵۱ درصدی در انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، که نشان از توانمندی این روش در کاهش گرمای جهانی است. همچنین، در رده "تخریب لایه ازن استراتوسفر"، تأثیر کمپوست با کاهش ۱۵/۲۷ درصدی نشانگر حفظ لایه ازن و کاهش اثرات مخرب آن است، درحالی‌که در مقایسه با مسیر ذغال‌زیستی، کمپوست بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد. در رابطه با "تابش یونیزه کننده" نیز، تأثیرات کمپوست با کاهش ۱۵/۹۹ درصدی در مقایسه با مسیر ذغال‌زیستی (۵/۷۸ درصد کاهش) به تقویت سلامت محیط‌زیست و انسان کمک می‌کند. در رده "تشکیل ازن، سلامت انسان"، مسیر کمپوست با کاهش ۱۶/۲۳ درصدی در اثرات منفی آن بر سلامت انسان نسبت به مسیر ذغال‌زیستی (۵/۶۶ درصدی) اثرگذارتر است. علاوه بر این، کمپوست در دسته "تشکیل ذرات معلق " باعث کاهش ۱۶/۷۲ درصدی در تولید ذرات معلق می‌شود، که نشان از تأثیر مثبت آن در بهبود کیفیت هواست. همچنین، در "تشکیل ازن، زیست‌بوم‌های خاکی"، کمپوست با کاهش ۱۶/۲۱ درصدی در تأثیرات منفی بر زیست‌بوم‌های خاکی نسبت به مسیر ذغال‌زیستی اثرگذارتر است. در "اسیدی شدن خاک"، کمپوست باعث کاهش ۱۶/۷۸ درصدی در اسیدی شدن خاک می‌شود و در مقایسه با مسیر ذغال‌زیستی، نشان از ارزش‌افزوده این روش در بهبود کیفیت خاک دارد. همچنین، در "اختناق دریاچه‌ای آب‌های سطحی" و "اختناق دریاچه‌ای آب‌های آزاد" نیز، کمپوست با کاهش ۱۶/۴۱ درصدی و ۱۶/۷۴ درصدی به بهبود کیفیت آب‌ها کمک می‌کند. در رده "سمیت خاک"، تولید از کمپوست باعث کاهش ۱۵/۴۵ درصدی در سمیت خاک می‌شود، که نشان از تأثیر مثبت آن بر محیط‌زیست خاکی است. در ادامه، در رده‌های "سمیت آب‌های سطحی" و "سمیت آب‌های آزاد" نیز کمپوست با کاهش به ترتیب ۱۶/۴۴ درصدی و ۱۶/۴۲ درصدی در سمیت آب‌ها به بهبود کیفیت آب‌ها کمک می‌کند. تغییرات در سایر اثرات نیز با الگوی مشابهی دیده می‌شود. به‌طورکلی، مسیر کمپوست در بیشتر دسته‌ها تأثیرگذارتر به نظر می‌رسد . این تحلیل نشان می‌دهد که کمپوست به‌عنوان یک روش کشاورزی پایدار، تأثیرات مثبت گسترده‌ای در تولید بادمجان دارد

جدول ۶. درصد تغییر اثرات زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت از مسیر خطی به سمت مسیر زیستی–دایره‌ای بر اساس رده‌های اثر میانی

رده اثر	مسیر کمپوست	مسیر ذغال‌زیستی
گرمایش جهانی	۱۶/۵۱	۵/۵۸
تخریب لایه ازن استراتوسفر	۱۵/۲۷	۵/۷۸
تابش یونیزه کننده	۱۵/۹۹	۵/۷۸
تشکیل ازن، سلامت انسان	۱۶/۲۳	۵/۶۶
تشکیل ذرات معلق	۱۶/۷۲	۵/۵۶
تشکیل ازن،زیست‌بوم‌های خاکی	۱۶/۲۱	۵/۶۶
اسیدی شدن خاک	۱۶/۷۸	۵/۵۳
اختناق دریاچه‌ای آب‌های سطحی	۱۶/۴۱	۵/۷۸
اختناق دریاچه‌ای آب‌های آزاد	۱۶/۷۴	۵/۷۷
سمیت خاک	۱۵/۴۵	۵/۷۸
سمیت آب‌های سطحی	۱۶/۴۴	۵/۷۷
سمیت آب‌های آزاد	۱۶/۴۲	۵/۷۷
سمیت سرطان‌زا در انسان	۱۶/۴۱	۵/۸۰
سمیت غیر سرطان‌زا در انسان	۱۶/۰۱	۵/۷۳
کاربری زمین	۱۶/۶۴	۵/۸۰
کمبود منابع معدنی	۱۶/۳۴	۵/۸۰
کمبود منابع فسیلی	۱۶/۵۹	۵/۵۶
مصرف آب	۱۵/۸۵	۵/۱۸

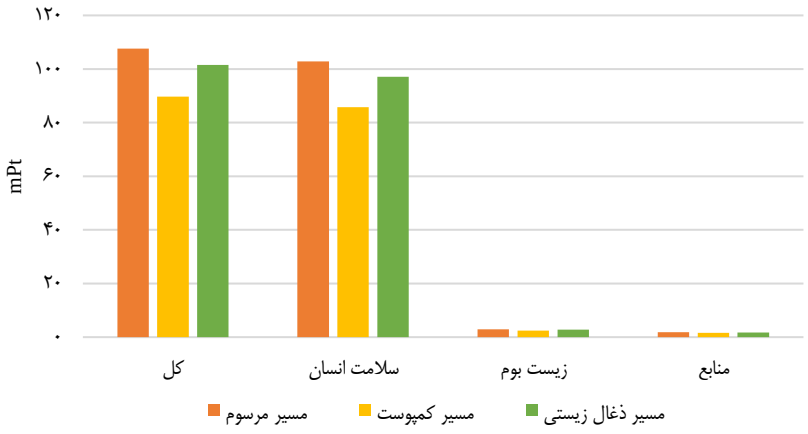
در جدول ۷، تأثیرات گذر از تولید خطی بادمجان به سمت تولید تحت رویکرد اقتصاد زیستی–دایره‌ای از دو مسیر مختلف، یعنی کمپوست و ذغال‌زیستی در سه رده خسارت مختلف، شامل سلامت انسان، زیست‌بوم، و منابع، موردبررسی قرارگرفته است. در رابطه با خسارت به"سلامت انسان"، داده‌ها نشان می‌دهند که مسیر کمپوست با تغییرات کاهشی حدود ۱۶/۶ درصد نسبت به مسیر ذغال‌زیستی با

تغییرات کاهشی ۵/۶ درصد، به نسبت بیشتری در جهت کاهش تأثیرات منفی تولید بادمجان بر سلامت انسان مؤثر است. در رده خسارت "زیست‌بوم" نیز، کمپوست با تغییرات کاهشی حدود ۱۶/۶ درصد نسبت به ذغال‌زیستی با تغییرات کاهشی ۵/۶ درصدی، نشانگر کاهش اثرات منفی تولید بادمجان بر زیست‌بوم و حفظ تنوع زیستی بیشتر است. همچنین، در رده خسارت "منابع"، استفاده از مسیر کمپوست باعث تغییرات کاهشی حدود ۱۶/۶ درصد شده و نسبت به مسیر ذغال‌زیستی با تغییرات منفی ۵/۶ درصد، بهبود مستمر در مدیریت محیط‌زیست و حفظ منابع را نشان می‌دهد. به‌طورکلی، این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از مسیر کمپوست نسبت به مسیر ذغال‌زیستی اثرات مثبت بیشتری در جهت بهبود خسارت به‌سلامت انسان، حفظ زیست‌بوم، و مدیریت مستدام منابع محیط‌زیست را در تولید هر کیلوگرم بادمجان داراست.

جدول ۷. درصد تغییر اثرات زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت از مسیر خطی به سمت مسیر زیستی-دایره‌ای بر اساس رده‌های خسارت پایانی

رده خسارت	مسیر کمپوست	مسیر ذغال‌زیستی
سلامت انسان	۱۶/۶	۵/۶۰
زیست‌بوم	۱۶/۶	۵/۵۷
منابع	۱۶/۶	۵/۵۴

شکل ۵ نشان می‌دهد که در مقایسه با دو مسیر مختلف، یعنی کمپوست و ذغال‌زیستی،مسیر کمپوست باعث کاهش بیشتری در خسارت کل زیست‌محیطی هر کیلوگرم بادمجان می‌شود. بر اساس نتایج، درصد تغییرات تولید بادمجان از مسیر خطی به سمت مسیر کمپوست یک کاهش ۱۶/۵۸ درصدی را نشان می‌دهد که نسبت به مسیر ذغال‌زیستی با کاهش ۵/۶ درصدی، از نتایج مثبت‌تری برخوردار است. این نتیجه مشخص می‌کند که تغییر به سمت مسیر کمپوست باعث می‌شود که هر کیلوگرم بادمجان با خسارت کمتری به محیط‌زیست تولید شود و این مسیر می‌تواند به‌عنوان یک الگوی کشاورزی پایدار تلقی شود که به حفظ سلامت محیط‌زیست کمک می‌کند.



شکل ۵. مقایسه اثرات زیست‌محیطی تولید هر کیلوگرم بادمجان تحت شرایط آب‌کشت از مسیر خطی به سمت مسیر زیستی-دایره‌ای بر اساس رده‌های خسارت پایانی وزن‌دار شده

بحث

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که مهم‌ترین عامل نشر گازهای گلخانه‌ای در تولید بادمجان در سامانه‌های آب‌کشت تولید و مصرف گاز طبیعی به‌منظور گرم کردن گلخانه است. این در حالی است که تولید بادمجان در مزارع به‌طورمعمول از نشر گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف کودهای شیمیایی رنج می‌برد (Flores, 2016; Taib et al., 2021). این مقایسه نشان می‌دهد که گرچه تولید تحت سامانه‌های آب‌کشت به کنترل مصرف کودهای شیمیایی کمک قابل‌توجهی می‌کند، تأمین گرمایش گلخانه که به‌طورکلی بر عهده سوخت‌های فسیلی است هنوز یک چالش جدی است. در پژوهش‌های قبلی نیز صالح پور و همکاران تأکید کردند که سوخت‌های فسیلی مورداستفاده به‌منظور گرمایش گلخانه نقش پررنگی در انتشار گازهای گلخانه‌ای به خود اختصاص داده‌اند (Salehpour et al., 2020).

گرچه توصیه‌هایی مانند مصرف بهینه سوخت، بهبود فناوری و جایگزینی سوخت‌های فسیلی با سوخت‌های زیستی به‌منظور کاهش

اثرات مخرب سوخت‌های فسیلی مورداستفاده در گلخانه مطرح‌شده است، در وضعیت فعلی به‌ویژه در مناطق با اقلیم سرد حذف کامل سوخت‌های فسیلی امکان‌پذیر نیست. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تغییر مسیر از حالت خطی به سمت اقتصاد زیستی–دایره‌ای حتی با تمرکز بر ماده‌ای مانند بقایای سبز بادمجان می‌تواند تولید گازهای گلخانه‌ای و سایر اثرات زیست‌محیطی ناشی از نشر مواد مختلف را به ازای هر کیلوگرم بادمجان کاهش دهد. پژوهش‌های قبلی نیز بر ارزش انتقال از مسیر خطی به سمت مسیر اقتصاد زیستی–دایره‌ای در تولید صیفی‌جات توافق نظر داشتند (Stylianou et al., 2023). این نکته مهم باید ذکر شود تاکنون این رویکرد بیشتر برای سامانه‌های کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گرفت که پسماند حاوی مواد با محتوی بالای چربی و یا مواد لیگنوسلولزی مورداستفاده در تولید الکل و همچنین بقایایی که می‌تواند در هضم بی‌هوازی با عملکرد بالا استفاده شود. پژوهش حاضر نشان داد مواد به‌ظاهر بی‌ارزشی مانند بقایای سبز بادمجان نیز ارزش آن را دارند که مسیر تولید بادمجان را پایدارتر کنند.

با توجه به استفاده از بقایا به‌عنوان مواد اولیه برای تولید کمپوست و ذغال‌زیستی که می‌توانند به‌عنوان یک کود آلی جذاب در سامانه‌های کشاورزی مورداستفاده قرار گیرند، این رویکرد می‌تواند برای تحقق اهداف دوگانه زیست‌محیطی و اقتصادی مفید باشد. از یک‌سو، تبدیل بقایا به کمپوست و ذغال‌زیستی به‌عنوان منابع آلی غنی و بهینه برای کودزایی و بهسازی خاک محسوب می‌شود. این اقدام نه‌تنها می‌تواند به بهبود ساختار خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی منجر شود بلکه از تخریب منابع خاک نیز جلوگیری کند. از سوی دیگر، تولید ذغال‌زیستی(و گازهای همراه آن‌که از فرایند پیرولیز) از بقایا می‌تواند به‌عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر و پایدار در گلخانه‌ها استفاده شود. ذغال‌زیستی، به‌عنوان یک جاذب کربن ثابت، می‌تواند در جلوگیری از گسترش گازهای گلخانه‌ای و تأمین انرژی حرارتی موردنیاز برای گرمایش گلخانه‌ها نیز مؤثر باشد. این اقدام همچنین می‌تواند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و انرژی غیر پایدار در تأمین گرمایش گلخانه‌ها کمک کرده و درنهایت به افزایش پایداری سیستم تولید کمک کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، مشخص است که تحول از مدل خطی به مدل اقتصاد زیستی–دایره‌ای در تولید بادمجان تحت سامانه‌های آب‌کشت، به‌ویژه با بهره‌گیری از بقایای سبز به‌عنوان منبع ارزشمند، می‌تواند اثرات زیست‌محیطی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد و به ارتقاء بهره‌وری و پایداری در کشاورزی بیشتر کمک کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج نشان دادند که رویکرد اقتصاد زیستی–دایره‌ای، به‌ویژه از طریق مسیر منتهی به تولید کمپوست، به میزان قابل‌توجهی خسارت منفی تولید بادمجان تحت شرایط آب‌کشت را در زمینه‌های سلامت انسان، زیست‌بوم، و منابع کاهش می‌دهد. بهبود عملکرد در این مسیر با کاهش ۱۶/۶ درصد در تأثیرات منفی بر سلامت انسان نسبت به مسیر ذغال‌زیستی، تأثیرات مثبت بیشتری را نشان می‌دهد. در زمینه زیست‌بوم نیز، مسیر کمپوست با کاهش ۱۶/۶ درصدی در اثرات منفی به حفظ تنوع زیستی کمک می‌کند و نسبت به مسیر ذغال‌زیستی با کاهش ۵/۶ درصدی، عملکرد بهتری دارد. همچنین، در رده خسارت منابع، مسیر منهی به تولید کمپوست تغییرات کاهشی حدود ۱۶/۶ درصدی را نشان می‌دهد که بهبود مستمر در مدیریت محیط‌زیست و حفظ منابع را نشان می‌دهد. تحلیل اثرات زیست‌محیطی نشان می‌دهد که تولید بادمجان تحت شرایط آب‌کشت می‌تواند خساراتی به‌سلامت انسان، زیست‌بوم، و اقتصاد وارد کند. ازجمله مهم‌ترین عوامل در این خسارات، گاز طبیعی ظاهر می‌شود که به‌عنوان عامل اصلی در آسیب‌های زیست‌محیطی نقش دارد. برای کاهش این تأثیرات، توصیه می‌شود که از منابع انرژی پایدار استفاده شود و سامانه‌های گرمایش گلخانه‌ها بهینه‌سازی شود. همچنین، هماهنگی بین صنعت، دولت و کشاورزان می‌تواند در جهت مدیریت پایدار منابع و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مؤثر باشد. در پایان، تغییر از تولید خطی بادمجان به سمت مدل‌های زیستی–دایره‌ای، به‌ویژه از طریق استفاده از مسیر کمپوست، می‌تواند تأثیرات مثبت گسترده‌ای در سه رده خسارت موردبررسی، شامل سلامت انسان، زیست‌بوم، و منابع ایجاد کند. این پژوهش نتایج مثبت در جهت بهبود محیط‌زیست و کاهش خسارات زیست‌محیطی از طریق اتخاذ مسیر زیستی–دایره‌ای به‌ویژه از کمپوست را تأیید می‌کند. برای مطالعات آتی، توصیه می‌شود تحقیقات بیشتری در زمینه بهینه‌سازی فرآیندها، انتخاب مواد جایگزین، و توسعه راهکارهای جدید برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی انجام شود. همچنین، مطالعاتی که به مقایسه اثرات گوناگون تولید محصولات مختلف به روش‌های مختلف پرداخته و در زمینه بهبود اقتصاد زیستی–دایره‌ای تلاش نمایند، از اهمیت بالایی برخوردار خواهند بود.

REFERENCES

Balakrishnan, D., 2024. Exploring the potential of sugarcane vinasse for biogas and biofertilizer Production:

A catalyst for advancing the bioeconomy. Sustain. Energy Technol. Assessments 61, 103474.
Bayram, B., Greiff, K., 2023. Life cycle assessment on construction and demolition waste recycling: a systematic review analyzing three important quality aspects. Int. J. Life Cycle Assess. 2023 1–23.
Bisbis, M.B., Gruda, N., Blanke, M., 2018. Potential impacts of climate change on vegetable production and product quality–A review. J. Clean. Prod. 170, 1602–1620.
Chakravarty, I., Mandavgane, S.A., 2023. Sequential bioprocessing of tomato waste-a biorefinery approach, in: Fruit and Vegetable Waste Utilization and Sustainability. Elsevier, pp. 121–138.
Daughtrey, M., Buitenhuis, R., 2020. Integrated pest and disease management in greenhouse ornamentals. Integr. pest Dis. Manag. Greenh. Crop. 625–679.
Dunlop, S.J., Arbestain, M.C., Bishop, P.A., Wargent, J.J., 2015. Closing the loop: Use of biochar produced from tomato crop green waste as a substrate for soilless, hydroponic tomato production. HortScience 50, 1572–1581.
Dunn, B., Bizhen, H., Dharti, T., 2021. Soilless Growing Mediums. Div. Agric. Sci. Nat. Resour. 1–7.
Flores, E.D., 2016. Energy use and CO2 emissions of eggplant production in the Philippines. Agric. Eng. Int. CIGR J. 18, 138–148.
Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Rehan, M., Nizami, A.-S., 2020. Determining key issues in life-cycle assessment of waste biorefineries, in: Waste Biorefinery. Elsevier, pp. 515–555.
ISO, 2006. 14040 International standard. Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland.
Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Tabatabaei, M., Ghanavati, H., Mohtasebi, S.S., Rahimi, V., Shafiei, M., Angelidaki, I., Karimi, K., 2017. Life cycle assessment of castor-based biorefinery: a well to wheel LCA. Int. J. Life Cycle Assess. 1–18.
Khounani, Z., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Moustakas, K., Talebi, A.F., Goli, S.A.H., Rajaeifar, M.A., Khoshnevisan, B., Jouzani, G.S., Peng, W., Kim, K.-H., 2021. Environmental life cycle assessment of different biorefinery platforms valorizing olive wastes to biofuel, phosphate salts, natural antioxidant, and an oxygenated fuel additive (triacetin). J. Clean. Prod. 278, 123916.
Kiehbadroudinezhad, M., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Pan, J., Peng, W., Wang, Y., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., 2023a. The potential of aquatic weed as a resource for sustainable bioenergy sources and bioproducts production. Energy 278, 127871.
Kiehbadroudinezhad, M., Merabet, A., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., 2023b. A life cycle assessment perspective on biodiesel production from fish wastes for green microgrids in a circular bioeconomy. Bioresour. Technol. Reports 21, 101303.
Majid, M., Khan, J.N., Shah, Q.M.A., Masoodi, K.Z., Afroza, B., Parvaze, S., 2021. Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (Lactuca sativa L., var. Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. Agric. Water Manag. 245, 106572.
Massironi, A., Biella, S., de Moura Pereira, P.F., Scibona, F., Feni, L., Sindaco, M., Emide, D., Jiménez-Quero, A., Bianchi, C.L.M., Verotta, L., 2023. Valorization of pumpkin seed hulls, cucurbitin extraction strategies and their comparative life cycle assessment. J. Clean. Prod. 427, 139267.
Mendieta, O., Castro, L., Escalante, H., Garfí, M., 2021. Low-cost anaerobic digester to promote the circular bioeconomy in the non-centrifugal cane sugar sector: A life cycle assessment. Bioresour. Technol. 326, 124783.
Michiels, F., Hubo, L., Geeraerd, A., 2021. Why mass allocation with representative allocation factor is preferential in LCA when using residual livestock products as organic fertilizers. J. Environ. Manage. 297, 113337.
Mordor Intelligence, 2023. Commercial greenhouse market size & share analysis - growth trends & forecasts (2023 - 2028) [WWW Document]. Mordor Intell. URL https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/commercial-greenhouse-market
Nematian, M., Keske, C., Ng'ombe, J.N., 2021. A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass. Waste Manag. 135, 467–477.
Parajuli, R., Matlock, M.D., Thoma, G., 2021. Cradle to grave environmental impact evaluation of the consumption of potato and tomato products. Sci. Total Environ. 758, 143662.
Patchaye, M., Sundarkrishnan, B., Tamilselvan, S., Sakthivel, N., 2018. Microbial management of organic waste in agroecosystem. Microorg. Green Revolut. Vol. 2 Microbes Sustain. Agro-ecosystem 45–73.
Rosa-Martínez, E., García-Martínez, M.D., Adalid-Martínez, A.M., Pereira-Dias, L., Casanova, C., Soler, E., Figàs, M.R., Raigón, M.D., Plazas, M., Soler, S., 2021. Fruit composition profile of pepper, tomato and eggplant varieties grown under uniform conditions. Food Res. Int. 147, 110531.

Salehpour, T., Khanali, M., Rajabipour, A., 2020. Environmental impact assessment for ornamental plant greenhouse: Life cycle assessment approach for primrose production. Environ. Pollut. 266, 115258.
Salvador, R., Puglieri, F.N., Halog, A., de Andrade, F.G., Piekarski, C.M., Antonio, C., 2021. Key aspects for designing business models for a circular bioeconomy. J. Clean. Prod. 278, 124341.
Silva, W.R., de Carvalho Carregosa, J., Almeida-Couto, J.M.F., Cardozo-Filho, L., Wisniewski Jr, A., 2022. Management of de-oiled coffee beans biomass through pyrolysis process: Towards a circular bioeconomy. J. Anal. Appl. Pyrolysis 168, 105763.
Srivastava, R.K., Sarangi, P.K., Shadangi, K.P., Sasmal, S., Gupta, V.K., Govarthanan, M., Sahoo, U.K., Subudhi, S., 2023. Biorefineries development from agricultural byproducts: Value addition and circular bioeconomy. Sustain. Chem. Pharm. 32, 100970.
Stylianou, M., Laifi, T., Bennici, S., Dutournie, P., Limousy, L., Agapiou, A., Papamichael, I., Khiari, B., Jeguirim, M., Zorpas, A.A., 2023. Tomato waste biochar in the framework of circular economy. Sci. Total Environ. 871, 161959.
Suh, S., Huppes, G., 2005. Methods for life cycle inventory of a product. J. Clean. Prod. 13, 687–697.
Taib, A.P., Alamhali, J.A., Tabal, E.P., 2021. Net energy use and carbon emission equivalent of tomato and eggplant production in Zamboanga City, Philippines. Int. J. Multidiscip. Res. Publ. 4, 73–78.
Wang, L., Ning, S., Zheng, W., Guo, J., Li, Youli, Li, Yinkun, Chen, X., Ben-Gal, A., Wei, X., 2023. Performance analysis of two typical greenhouse lettuce production systems: commercial hydroponic production and traditional soil cultivation. Front. Plant Sci. 14.
Yahia, E.M., García-Solís, P., Celis, M.E.M., 2019. Contribution of fruits and vegetables to human nutrition and health, in: Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables. Elsevier, pp. 19–45.
Yang, T., Kim, H.-J., 2020. Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. J. Clean. Prod. 274, 122619.

Evaluating the environmental impacts of eggplant production in hydroponic greenhouse: implementing a circular bioeconomy approach through composting and biochar

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The recent global coronavirus outbreaks emphasize the crucial role of vitamins in boosting the human immune system. While fresh produce faces challenges in continuous availability, greenhouse cultivation, valued at $42.04 billion in 2023 and projected to reach $56.79 billion by 2028, offers a practical solution. However, traditional greenhouses raise sustainability concerns due to their heavy reliance on chemical pesticides. Hydroponic systems present an appealing alternative, reducing the need for chemicals. This research proposes an ecological-circular economic approach to manage agricultural waste in hydroponic systems, focusing on converting waste into compost or biochar. The approach aims for sustainability by utilizing renewable resources and fostering local development. The study, using the life cycle assessment (LCA) method, evaluates environmentaly the transition to a circular bioeconomy system in hydroponic eggplant cultivation, emphasizing the need for environmental compatibility before large-scale implementation.

Material and methods

This research focused on eggplant production under hydroponic systems, examining both conventional and circular bioeconomy approaches with a specific emphasis on compost and biochar production from eggplant green waste. The LCA method was employed to evaluate the environmental impacts of eggplant production under linear and circular bioeconomy systems. This approach offers a comprehensive assessment of the environmental effects throughout the entire life cycle of a product, from raw material extraction, through production and use, to disposal or recycling at the end of its life. The goal of this research as the first stege of an LCA was to investigate the environmental impacts of hydroponic eggplant production, transitioning from a linear economy to a circular bioeconomy under two pathways: compost and biochar. In the second stage, by documenting the environmental inputs and outputs throughout the eggplant life cycle, background and foreground information was collected from reliable sources. In the third stage, the environmental impact assessment was conducted using the ReCiPe method, revealing impacts at both midpoint and endpoint levels.

Results and discussion

The environmental analysis of producing one kilogram of eggplant under hydroponic conditions reveals a significant carbon footprint increase of 2.37 kilograms of carbon dioxide, with 69% attributed to the production and consumption of natural gas. Additionally, the production of fertilizers and the use of steel in greenhouse structures introduce harmful substances like trichlorofluoromethane. Addressing these challenges necessitates the implementation of strategies to enhance production technology and substitute materials with lower environmental impact. According to the results, the production of one kilogram of hydroponic eggplant imposes health damages of 1.6×10^{-6} DALY on humans. Furthermore, in the ecisystems domain, the damage caused by producing one kilogram of hydroponic eggplant is equivalent to 1.08×10^{-8} species per year while in terms of resources, the estimated total damage cost is $0.261 per kilogram. Natural gas emerges as a significant contributor to these challenges, prompting recommendations for mitigating negative impacts through the adoption of sustainable energy sources and optimization of greenhouse heating systems. Furthermore, the benefits of eggplant production, adopting a circular bioeconomy approach and emphasizing compost production, are evident. This ecological-economic strategy results in reduced greenhouse gas emissions, ozone layer preservation, improved environmental and human health, reduced suspended particle production, and enhanced water and soil quality. A comparison between compost and biochar pathways reveals that compost production from green eggplant residues is more effective in mitigating negative impacts on human health, ecosystems, and resources. The results indicate that under the circular bioeconomy approach, especially the compost production pathway, there is a 16.6% reduction in health damages. Moreover, in the ecological realm, the compost production pathway contributes to biodiversity conservation with a 16% reduction compared to the biochar production pathway, demonstrating better performance. In the resource damage category, the compost production pathway from green eggplant residues leads to approximately a 16% reduction compared to conventional hydroponic eggplant production.

Conclusion

This study indicates that embracing circular bioeconomy approach, especially through compost production, proves effective in reducing environmental impacts of hydroponic eggplant. Comparing compost

and biochar pathways underscores the superiority of compost production in mitigating negative impacts on health, ecosystems, and resources. A 16.6% reduction in health damages, ecosystems and resource damage reduction demonstrate the positive outcomes of transitioning from linear to circular bioeconomy practices through compost production vs. a 6% reduction through biochar production. In conclusion, adopting circular bioeconomy practices, particularly through compost utilization, provides a promising avenue for minimizing the environmental footprint of hydroponic eggplant cultivation, fostering sustainability and local development.