



Research Article

Vol. 40, No. 3, Fall 2026, p. 339-356

Assessing the Eco-efficiency of Food Waste Recycling in Iran: A Dynamic Data Envelopment Analysis Approach with Undesirable Outputs

Kh. Karimi¹, M. Mardani Najafabadi^{1*}, A. Mirzaei¹

1- Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

(*- Corresponding Author Email: m.mardani@asnrukh.ac.ir)

Received: 16 December 2025
Revised: 19 February 2026
Accepted: 04 April 2026
Available Online: 04 April 2026

How to cite this article:

Karimi, Kh., Mardani Najafabadi, M., & Mirzaei, A. (2026). Assessing the eco-efficiency of food waste recycling in Iran: A dynamic data envelopment analysis approach with undesirable outputs. *Journal of Agricultural Economics & Development*, 40(3), 339-356. (In Persian abstract). <https://doi.org/10.22067/jead.2026.97043.1411>

Introduction

Global population growth and shrinking natural resources have intensified pressure on agricultural systems, positioning sustainable waste management as a national priority, particularly in arid and semi-arid countries like Iran. Agricultural activities generate substantial biomass residues, yet inefficient handling (e.g., open burning, uncontrolled dumping) contributes significantly to greenhouse gas (GHG) emissions (CO_2 , CH_4), energy overuse, and economic losses. Globally, one-third of food production is lost or wasted (FAO, 2011, 2013), with profound environmental and food security implications. In this context, the Circular Waste-Based Bioeconomy (CWBE) framework offers a strategic pathway: integrating circular economy principles into agricultural systems to transform waste into compost, biogas, animal feed, and bio-based materials—thereby enhancing resource efficiency and reducing environmental footprints. However, existing efficiency assessments in agricultural waste management in Iran predominantly ignore undesirable outputs, yielding an incomplete picture of sustainability. This study addresses that gap by evaluating the Eco-efficiency of agricultural waste recycling across Iran's 31 provinces over 2014–2019 (1393–1398), using a Dynamic Network Data Envelopment Analysis (DN-DEA) model that jointly accounts for desirable and undesirable outputs.

Materials and Methods

We construct a dynamic network model inspired by Lu et al. (2022), conceptualizing waste recycling as a two-stage system: (1) waste collection and preprocessing, and (2) valorization and environmental mitigation. The DN-DEA model allows efficiency scores to reflect carry-over effects—such as investment in fixed assets—across time periods, making it suitable for assessing policy persistence and technological lock-in.

Inputs include: (i) monetary cost of managing agricultural waste (IRR, adjusted for inflation), and (ii) energy consumption (GJ) in collection, transport, and processing. Desirable output is the quantity of recycled biomass (tonnes), while undesirable outputs encompass: (a) CO_2 emissions (tonnes), (b) CH_4 emissions (tonnes), (c) total energy consumption (as above, dual-counted to penalize inefficiency), and (d) waste management cost (as a proxy for incomplete valorization). Data were compiled from the Statistical Center of Iran, Agricultural Jihad provincial reports, and the Central Bank's economic databases. All monetary values were deflated using the consumer price index (base = 1390), and emission factors were standardized using IPCC Tier 1 guidelines adapted to Iran's agronomic conditions. The model was solved using GAMS 36.2.0 (with CONOPT solver), and statistical validation—including Pearson correlation matrices and significance tests—was performed in SPSS 28.

Results and Discussion



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://doi.org/10.22067/jead.2026.97043.1411>

Results reveal striking regional heterogeneity. Five provinces—Tehran, Bushehr, Ilam, Khuzestan, and South Khorasan—consistently achieved full efficiency (score = 1.00) across all six years, functioning as benchmarks. In contrast, Golestan (avg. θ = 0.34), Kurdistan (0.35), Sistan & Baluchestan (0.36), East Azerbaijan (0.41), and Kermanshah (0.41) exhibited chronic underperformance. Nationally, average efficiency declined from 0.72 in 2014 to 0.61 in 2019, signaling systemic deterioration—potentially linked to subsidy distortions, energy price volatility, or drought-induced feedstock scarcity.

Crucially, Pearson correlation analysis confirmed strong, positive, and statistically significant ($p < 0.01$) relationships between recycling efficiency and the management of undesirable outputs. This implies eco-efficiency synergy: provinces excelling in one dimension (e.g., lowering disposal costs) tend to outperform across all environmental and economic metrics. Moreover, undesirable outputs are highly inter correlated (e.g., energy–CO₂ : $r = 1.000$; CO₂–CH₄ : $r = 0.999$), suggesting that interventions targeting energy efficiency will likely reduce multiple emissions simultaneously. Spatial mapping (Figure 2) further confirms a pronounced east–west efficiency gradient, with high-efficiency clusters in central/southern/eastern provinces and low-efficiency zones concentrated in the northwest and southwest—mirroring disparities in infrastructure, technology access, and institutional capacity.

Conclusion

This study advances the literature by: (i) applying DN-DEA to Iranian agricultural waste for the first time; (ii) integrating four undesirable outputs simultaneously; and (iii) linking efficiency diagnostics to concrete, region-specific policy levers. Findings underscore that a one-size-fits-all approach is inadequate: instead, precision sustainability governance, where efficiency metrics inform spatially differentiated interventions, is essential. We recommend:

Region-targeted interventions for low-performing provinces (e.g., Golestan, Kurdistan, Sistan & Baluchestan).

Knowledge diffusion mechanisms, such as peer-learning networks, to transfer best practices from benchmark provinces

Efficiency-based budgeting, where provincial subsidies or green credit access are tied to annual DN-DEA scores.

Ultimately, improving eco-efficiency in agricultural waste recycling is not merely a technical challenge but a governance imperative, one that can simultaneously bolster rural livelihoods, enhance resource security, and advance Iran's commitment to low-carbon development.

JEL Classification: Q15, Q53, Q56, C61

Keywords: Agricultural waste recycling, Dynamic network DEA, Greenhouse gas emissions, Pearson correlation coefficient, Undesirable outputs

مقاله پژوهشی

جلد ۴۰، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵، ص. ۳۳۹-۳۵۶

ارزیابی کارایی زیست-اقتصادی بازیافت ضایعات مواد غذایی در ایران: رویکرد تحلیل پوششی داده‌های پویا با خروجی‌های نامطلوب

خدیدجه کریمی^۱ - مصطفی مردانی نجف‌آبادی^{۱*} - عباس میرزایی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵

چکیده

در شرایطی که فشار جمعیتی فزاینده و کاهش منابع طبیعی، مدیریت پایدار ضایعات کشاورزی را به یکی از اولویت‌های ملی در چارچوب اقتصاد زیستی تبدیل کرده است، ارزیابی جامع کارایی این سیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مطالعه با هدف ارزیابی کارایی زیست-اقتصادی بازیافت ضایعات مواد غذایی در ۳۱ استان ایران طی دوره ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸ طراحی شده است. برخلاف مطالعات سنتی که تنها خروجی‌های مطلوب را مدنظر قرار می‌دهند، در این مطالعه از مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای پویا (DN-DEA) استفاده شده تا خروجی‌های نامطلوب شامل دی‌اکسیدکربن (CO_2) و متان (CH_4) به صورت همزمان در ساختار ارزیابی کارایی گنجانده شوند. یافته‌ها نشان می‌دهد که تنها پنج استان (تهران، بوشهر، ایلام، خوزستان و خراسان جنوبی) در تمام سال‌های مورد بررسی، دارای کارایی کامل (امتیاز ۱) بوده‌اند، در حالی که استان‌های گلستان (۰/۳۴)، کردستان (۰/۳۵)، سیستان و بلوچستان (۰/۳۶) و آذربایجان شرقی (۰/۴۱) عملکردی بسیار پایین داشته‌اند. میانگین کارایی دوره‌ای نیز از ۰/۷۲ در سال ۱۳۹۳ به ۰/۶۱ در سال ۱۳۹۸ کاهش یافته است. بر این اساس، دستیابی به اهداف توسعه پایدار در گرو بهبود مستمر فرآیندهای بازیافت و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی در سراسر کشور است. آزمون همبستگی پیرسون رابطه‌ای مثبت، قوی و معنادار ($r \geq 0.94$, $p < 0.01$) میان کارایی بازیافت و کارایی در مدیریت خروجی‌های نامطلوب تأیید می‌کند؛ این یافته بیانگر آن است که استان‌هایی که در کاهش هزینه، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای موفق‌تر هستند، به طور همزمان کارایی بالاتری در بازیافت ضایعات نیز کسب می‌کنند. نتایج این پژوهش بر ضرورت اتخاذ سیاست‌های منطقه‌محور و تسهیل انتقال دانش از استان‌های الگو به مناطق کم‌کارا تأکید دارند.

طبقه‌بندی JEL: Q15, Q53, Q56, C61

واژه‌های کلیدی: بازیافت ضایعات کشاورزی، تحلیل پوششی داده‌های پویا، خروجی‌های نامطلوب، گازهای گلخانه‌ای، ضریب همبستگی پیرسون

مقدمه

فزاینده دارد؛ اما در عین حال یکی از مهم‌ترین تولیدکنندگان ضایعات زیستی و گازهای گلخانه‌ای نیز محسوب می‌شود. برآوردهای سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد نشان می‌دهد که سالانه حدود ۱/۳ میلیارد تن غذا (معادل یک‌سوم کل تولید جهانی) در زنجیره تأمین از دست می‌رود یا هدر می‌رود (FAO, 2011, 2013). این پدیده، که تحت عنوان هدررفت و از دست‌رفت مواد غذایی (FLW)^۲ شناخته می‌شود

رشد سریع جمعیت جهانی، که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ به ۹/۸ میلیارد نفر و تا پایان قرن حاضر به بیش از ۱۱ میلیارد نفر برسد (United Nations, 2022) فشار بی‌سابقه‌ای بر منابع طبیعی و نظام‌های تولید غذا وارد کرده است. بخش کشاورزی، به عنوان ستون اساسی امنیت غذایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در پاسخ‌گویی به این تقاضای

۱- گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: m.mardani@asnruk.ac.ir)

شود، علاوه بر تهدید امنیت غذایی، از طریق مصرف غیربهرینه منابع و انتشار آلاینده‌ها پیامدهای گسترده‌ای برای محیط‌زیست به‌همراه دارد (Munir et al., 2025).

در میان اجزای FLW، ضایعات کشاورزی (شامل بقایای پس از برداشت، ضایعات پردازشی و بقایای مزارع) سهم قابل‌توجهی دارند. گزارش‌ها نشان می‌دهد که فعالیت‌های کشاورزی سالانه حدود ۰/۱۴ تریلیون تن پسماند زیستی تولید می‌کنند و این مقدار تا سال ۲۰۵۰ حدود ۶۰ درصد افزایش خواهد یافت (Al Mamun et al., 2020; Ong et al., 2023). مدیریت ناکارآمد این ضایعات، نظیر سوزاندن آزاد یا رهاسازی در طبیعت، منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای (به‌ویژه CO₂ و CH₄)، آلودگی هوا، تخریب خاک و کاهش تنوع زیستی می‌شود (Kumar et al., 2024). برای مثال، در هند سالانه بیش از ۹۲ میلیون تن ضایعات کشاورزی سوزانده می‌شود که پیامدهای جدی برای سلامت و محیط‌زیست ایجاد می‌کند (Koli et al., 2024; Sharma, 2024). افزون بر این، فعالیت‌های کشاورزی از جمله مصرف کودهای نیتروژنی، آبیاری و مدیریت خاک در کنار تجزیه یا سوزاندن بقایای زیستی، سهم مهمی در انتشار CO₂، CH₄ و N₂O دارند (Mirzaei et al., 2024; Muizniecea et al., 2015).

در سال‌های اخیر، با گسترش رویکرد اقتصاد پایدار، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بازیافت و فرآوری ضایعات کشاورزی می‌تواند به تولید کود آلی، خوراک دام، زیست‌سوخت، بیوپلاستیک و محصولات با ارزش افزوده منجر شود (Baráth et al., 2024). این فرآیندها علاوه بر کاهش آلودگی و هزینه‌های دفع ضایعات، موجب افزایش درآمد کشاورزان و ارتقای بهره‌وری منابع می‌شوند (Lu et al., 2022). مطالعات اقتصادی برای مثال در تایوان نشان داده‌اند که روش‌های بازیافت مانند کمپوست و بیوگاز از منظر هزینه-فایده مقرون‌به‌صرفه‌اند و نرخ بازگشت سرمایه مطلوبی دارند (Hsu, 2021). از این رو، ادغام ضایعات در زنجیره تولید و مصرف می‌تواند به بهبود کارایی زیست‌اقتصادی بخش کشاورزی کمک کند.

در ادامه این مسیر، مفهوم «اقتصاد زیستی مبتنی بر ضایعات» یا اقتصاد زیستی چرخشی پسماند (CWBE)^۱ مطرح شده است که با ادغام اصول اقتصاد چرخشی در نظام زیست‌اقتصادی، هم موجب کاهش آلاینده‌ها می‌شود و هم زنجیره ارزش کشاورزی را گسترش می‌دهد (Fytli & Zabaniotou, 2022; Munir et al., 2025). میوزنیکا و همکاران (Muizniecea et al., 2015) با توسعه یک مدل پویا، چارچوب CWBE را بسط داده‌اند تا تعامل میان تولید محصول، تولید ضایعات، بازیافت آن‌ها و انتشار آلاینده‌ها را شبیه‌سازی کنند؛ مدلی که با لحاظ کردن خروجی‌های مطلوب و نامطلوب، امکان ارزیابی جامع کارایی زیست‌اقتصادی را فراهم می‌کند.

1- Circular Waste-Based Bioeconomy

با وجود این ظرفیت‌ها، سیستم‌های کشاورزی در بسیاری از کشورهای درحال‌توسعه، از جمله ایران با چالش‌هایی مانند کمبود فناوری‌های بازیافت، نبود زیرساخت جمع‌آوری، نوسانات قیمتی و مدیریت ناکارآمد نهاده‌هایی مانند آب و کود روبه‌رو هستند. این عوامل سبب می‌شود بخش بزرگی از ضایعات کشاورزی بدون ارزش‌آفرینی دور ریخته یا سوزانده شود (De Corato et al., 2024; Dey et al., 2021). همچنین بخش عمده مطالعات کارایی کشاورزی تنها بر خروجی‌های مطلوب (تولید محصول) تمرکز داشته و از لحاظ کردن خروجی‌های نامطلوب مانند انتشار CO₂ یا مصرف آب غفلت شده است، که این امر موجب ارائه تصویری ناقص از پایداری زیست‌اقتصادی می‌شود. بنابراین، ارزیابی کارایی زیست‌اقتصادی، که ترکیبی از کارایی اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی است، نیازمند روش‌هایی پیشرفته نظیر تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)^۲ با قابلیت لحاظ کردن خروجی‌های نامطلوب و پویایی زمانی است.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در جهان به اهمیت کاهش ضایعات غذایی و نقش آن در بهبود پایداری زیست‌محیطی پرداخته‌اند. برای نمونه، مطالعات انجام‌شده در اروپا نشان می‌دهد که کاهش پسماند غذایی می‌تواند به کاهش قابل‌توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود (Osei-Owusu et al., 2023). از جمله تلاش‌های سیستماتیک در این حوزه، مطالعه لیو و همکاران (Lu et al., 2022) با عنوان «ارزیابی سه‌مرحله‌ای کارایی چرخشی در تولید کشاورزی، مصرف غذا و بازیافت ضایعات در کشورهای اتحادیه اروپا» است که با به‌کارگیری چارچوب تحلیل پوششی داده‌ها، کارایی هر مرحله از زنجیره غذایی را جداگانه و در تعامل با یکدیگر ارزیابی کرده است. این پژوهش نشان می‌دهد که کارایی مرحله بازیافت اغلب الگوی متفاوتی از کارایی کل زنجیره دارد و نیاز به سیاست‌های هدفمند برای هر مرحله دارد، یافته‌ای که به‌وضوح بر ضرورت بررسی دقیق بر مرحله «بازیافت» در مطالعات آینده تأکید دارد.

در حوزه بازیافت ضایعات، رن و همکاران (Ren et al., 2019) مدل‌هایی را برای ارزیابی کارایی بازیافت در صنایع کشاورزی و غذایی ارائه کرده است که نشان می‌دهد استفاده مؤثر از ضایعات می‌تواند هم آلودگی را کاهش دهد و هم بهره‌وری را افزایش دهد. همچنین لیو و همکاران (Lu et al., 2022) تأکید کرده‌اند که توسعه فناوری‌های نوین و نوآوری‌های تکنولوژیک در فرآیند بازیافت، نقشی اساسی در کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی دارد.

در کشورهای درحال‌توسعه نیز رویکردهای مبتنی بر فناوری برای کاهش ضایعات و افزایش بازدهی بازیافت مورد توجه قرار گرفته است. ژانگ (Zhang, 2019) بر اهمیت سیاست‌های حمایتی و ترویج فناوری‌های سبز تأکید کرده‌اند. از سوی دیگر، نتایج مطالعه یه و همکاران

2- Data Envelopment Analysis

استفاده کرده‌اند که قادر به مدل‌سازی همزمان فرآیندهای مرتبط (تولید، مصرف و بازیافت) و اثرات انتقالی بین دوره‌های زمانی نیستند (Mardani Najafabadi et al., 2025; Rastegaripour et al., 2025). همچنین، بسیاری از پژوهش‌های پیشین یا صرفاً بر خروجی‌های مطلوب تمرکز داشته و از لحاظ‌کردن خروجی‌های نامطلوب مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای غفلت کرده‌اند، یا در صورت لحاظ این متغیرها، از تبدیل‌های خطی استفاده نموده‌اند که ممکن است به نتایج اریب منجر شود (Tone, 2002). از این‌رو، نیاز به رویکردی یکپارچه که بتواند همزمان روابط شبکه‌ای بین مراحل مختلف، پویایی‌های زمانی، و خروجی‌های مطلوب و نامطلوب را در چارچوبی منسجم مدل‌سازی کند، به‌وضوح احساس می‌شود.

مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای پویای توسعه‌یافته توسط لیو و همکاران (Lu et al., 2022) دقیقاً برای پاسخ به چنین نیازهایی طراحی شده است. این مدل با ساختار شبکه‌ای خود، امکان تحلیل فرآیندهای داخلی و پیوندهای بین بخش‌های مختلف سیستم بازیافت را فراهم کرده و ماهیت پویای آن، مدل‌سازی متغیرهای انتقالی بین دوره‌های زمانی را میسر می‌سازد. ویژگی متمایز این مدل، قابلیت مدل‌سازی همزمان خروجی‌های مطلوب (بازیافت) و نامطلوب (آلاینده‌های زیست‌محیطی) بدون نیاز به تغییر در مقادیر آنهاست که آن را از مدل‌های کلاسیک DEA که صرفاً به ارزیابی تک‌دوره‌ای و تک‌فرآیندی می‌پردازند، متمایز می‌کند. لیو و همکاران (Lu et al., 2022) در مطالعه خود بر روی ۲۷ کشور اروپایی نشان دادند که مرحله بازیافت ضایعات غذایی مهمترین مرحله قابل مدیریت در زنجیره اقتصاد چرخشی است و متغیرهایی مانند تولید کشاورزی، ضایعات غذایی، بازیافت، دی‌اکسیدکربن و متان همگی همبستگی بالایی با یکدیگر دارند؛ یافته‌ای که بر ضرورت مدل‌سازی همزمان این متغیرها در چارچوبی یکپارچه تأکید دارد. بنابراین، استفاده از این مدل در پژوهش حاضر، پاسخی به شکاف‌های روش‌شناختی موجود و ابزاری مناسب برای دستیابی به اهداف مطالعه است.

بر این اساس، مطالعه حاضر با بهره‌گیری از مدل DEA پویا تلاش می‌کند ارزیابی جامعی از وضعیت بازیافت ضایعات کشاورزی در ایران ارائه دهد و بخشی از خلأهای موجود در پیشینه پژوهش را پوشش دهد. این پژوهش با در نظر گرفتن خروجی‌های نامطلوب (مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف بی‌پایان منابع طبیعی) و با تأکید بر بازیافت ضایعات کشاورزی، به تحلیل کارایی زیست‌اقتصادی سیستم‌های بازیافت ضایعات کشاورزی در سطح استان‌های ایران می‌پردازد. رویکرد پژوهش پویا و مبتنی بر اصول اقتصاد پایدار است و هدف آن، ارزیابی چگونگی دستیابی به تعادل بین عملکرد اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی در چرخه مدیریت ضایعات کشاورزی است.

(Ye et al., 2019) نشان می‌دهد که ارتقای فرآیندهای بازیافت علاوه‌بر کاهش ضایعات، می‌تواند فرصت‌های شغلی جدیدی برای جوامع محلی ایجاد کند. تحقیقات المراز و همکاران (Almaraz et al., 2018) و ساین و همکاران (Singh et al., 2022) نیز بیانگر نقش کلیدی سیاست‌های دولتی، حمایت‌های مالی و مشوق‌ها در بهبود کارایی بازیافت ضایعات کشاورزی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی آن است.

از دیگر منابع کلیدی، کتاب کلیتکو و همکاران (Klitkou et al., 2019) است که چارچوب‌های نوین اقتصاد زیستی را برای تبدیل ضایعات آلی به ارزش آفرینی (از کود آلی و خوراک دام تا زیست‌سوخت و مسیرهای ارزش‌آفرینی) می‌پردازد و بر ضرورت سیاست‌های فراتکنولوژیک (شامل قوانین، مالیات، بازار و همکاری‌های چندبخشی) برای تحول ضایعات به منابع تأکید دارد. پژوهش‌های دیگری نیز کارایی زیست‌محیطی را به‌عنوان نسبت رشد اقتصادی به فشارهای زیست‌محیطی تعریف کرده‌اند و آن را شاخصی مهم برای ارزیابی کارایی فرآیندهای بازیافت دانسته‌اند. برای مثال، در مطالعه بارث و همکاران (Baráth et al., 2024) با استفاده از DEA، نشان داده شد که مدیریت مناسب ضایعات کشاورزی می‌تواند به ارتقای کارایی زیست‌محیطی کمک کند. همچنین هیدنریچ و همکاران (Heidenreich et al., 2022) در بررسی‌هایی در غنا و کنیا نشان دادند که بهبود مدیریت ضایعات در بخش کشاورزی موجب کاهش آلودگی و افزایش کارایی اقتصادی می‌شود. در تحقیق چن و ونگ (Chen & Wang, 2024) نیز تأکید شده است که مدیریت و بازیافت صحیح ضایعات، به‌ویژه ضایعات کشاورزی، می‌تواند از انتشار خروجی‌های نامطلوب کاسته و کارایی تولید را افزایش دهد.

با وجود این پژوهش‌ها، هنوز شکاف‌های قابل‌توجهی در ادبیات علمی وجود دارد. بخش زیادی از مطالعات پیشین بر کشورهای توسعه یافته متمرکز بوده و تحقیقات اندکی به‌صورت جامع در کشورهای درحال توسعه، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، انجام شده است. علاوه‌براین، بیشتر مطالعات از مدل‌های ایستا استفاده کرده و رابطه پویا بین تولید، مصرف و بازیافت را در نظر نگرفته‌اند (Mardani Najafabadi et al., 2023; Rastegaripour et al., 2025). در حوزه زیست‌محیطی نیز بررسی همزمان کارایی تولید و مدیریت پسماند با لحاظ خروجی‌های نامطلوبی مانند انتشار آمونیاک و متان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، نقش فناوری‌های نوین در بهبود بهره‌وری کشاورزی مناطق مختلف ایران به‌طور کمی تحلیل نشده و بسیاری از مطالعات محدود به بازه‌های زمانی کوتاه بوده‌اند.

اگرچه مطالعات متعددی به ارزیابی کارایی کشاورزی و بازیافت ضایعات پرداخته‌اند، اما بیشتر آنها از مدل‌های ایستا و تک‌فرآیندی

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، به منظور ارزیابی کارایی بازیافت پسماندهای غذایی در استان‌های مختلف، از مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای پویای ارائه شده توسط لیو و همکاران (Lu et al., 2022) استفاده شده است. این مدل یک ابزار قدرتمند برای تحلیل عملکرد سیستم‌هایی است که از چندین فرآیند مرتبط تشکیل شده‌اند. تحلیل شبکه‌ای پویا امکان بررسی و ارزیابی تغییرات کارایی در طول زمان را فراهم می‌کند (Mardani Najafabadi et al., 2025).

در این مطالعه، ورودی‌های بازیافت شامل مخارج بازیافت ضایعات غذایی و مصرف انرژی در آن بوده و خروجی‌های آن شامل کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و مواد بازیافتی قابل استفاده مجدد، است.

توابع هدف و محدودیت‌ها

مدل ریاضی شامل توابع هدف و محدودیت‌هایی برای ارزیابی کارایی کلی و دوره‌ای است. در اینجا توابع هدف و محدودیت‌های مدل به صورت زیر تعریف شده‌اند:

الف) تابع هدف (کارایی کلی): این تابع هدف حداقل کردن نسبت ناکارایی کل ورودی‌ها به خروجی‌های مطلوب و نامطلوب در تمامی دوره‌ها را دنبال می‌کند. این کارایی نشان‌دهنده عملکرد کلی سیستم است.

این تابع هدف، به حداقل رساندن نسبت ناکارایی ورودی‌ها (هزینه ضایعات و انرژی مصرفی) به خروجی‌های مطلوب (بازیافت ضایعات کشاورزی) و خروجی‌های نامطلوب (مانند آلاینده‌های زیست‌محیطی) در طول تمام دوره‌ها تمرکز دارد (معادله ۱).

$$\theta_0^* = \min \frac{\sum_{t=1}^T W^t \left[\left(\sum_{i=1}^{m_k} \frac{S_{iok}^{t-}}{X_{iok}^t} + \sum_{(kh)_{l=1}}^{linkin_k} \frac{S_{o(kh)lin}^t}{Z_{o(kh)lin}^t} + \sum_{k_l}^{nininput_k} \frac{S_{oklin}^{(t,t+1)}}{Z_{oklin}^{(t,t+1)}} \right) \right]}{\sum_{t=1}^T W^t \left[\left(\sum_{r=1}^{r_{1k}} \frac{S_{rokgood}^{t+}}{Y_{rokaood}^t} + \sum_{r=1}^{r_{2k}} \frac{S_{rokbad}^{t-}}{Y_{rokhad}^t} \right) \right]} \quad (1)$$

$$\min \frac{\sum_{t=1}^T W^t \left[\left(\sum_{i=1}^{m_k} \frac{S_{iok}^{t-}}{X_{iok}^t} + \sum_{(kh)_{l=1}}^{linkin_k} \frac{S_{o(kh)lin}^t}{Z_{o(kh)lin}^t} + \sum_{k_l}^{ngood_k} \frac{S_{oklgood}^{(t,t+1)}}{Z_{oklgood}^{(t,t+1)}} \right) \right]}{\sum_{t=1}^T W^t \left[\left(\sum_{r=1}^{r_{1k}} \frac{S_{rokgood}^{t+}}{Y_{rokaood}^t} + \sum_{r=1}^{r_{2k}} \frac{S_{rokbad}^{t-}}{Y_{rokhad}^t} \right) \right]} \quad (2)$$

تابع هدف کارایی دوره‌ای مشابه کارایی کلی است، اما بر یک دوره زمانی خاص تمرکز دارد و برای هر دوره به طور مستقل محاسبه می‌شود. ویژگی‌ها و کاربرد این تحلیل شامل انعطاف‌پذیری زمانی برای ارزیابی عملکرد سیستم در واکنش به تغییرات فصلی، اقتصادی یا محیطی، تطبیق‌پذیری در شناسایی دوره‌های با عملکرد ضعیف یا بسیار کارا، بررسی تأثیرات کوتاه‌مدت سیاست‌ها یا شرایط محیطی، شناسایی روندهای مثبت یا منفی در بازه‌های زمانی مختلف، و ارائه بازخورد سریع جهت اصلاح فرایندها است.

کاربرد این توابع شامل شناسایی ضعف‌ها و ناکارایی‌های کلی سیستم، ارائه راهکارهای مدیریتی برای بهبود عملکرد کل زنجیره، و فراهم کردن تحلیلی جامع‌تر در مقایسه با ارزیابی‌های محدود به کارایی دوره‌ای یا بخشی است.

ج) محدودیت‌ها

محدودیت‌های تعریف‌شده برای بازیافت ضایعات غذایی در مدل،

تابع هدف کارایی کلی بر اساس یک رویکرد چنددوره‌ای تعریف شده که در آن وزن‌دهی به دوره‌ها (با ضرایب W^t) برای تحلیل جامع‌تر انجام می‌شود. پارامترها و متغیرهای این مدل شامل موارد زیر است:

X_i^t : ورودی مدل شامل مخارج بازیافت ضایعات غذایی و مصرف انرژی در کشاورزی در زمان t می‌باشد.

Y_{bad}^t : خروجی نامطلوب شامل دی اکسیدکربن (CO_2) و متان (CH_4) می‌باشد.

Y_{good}^t : خروجی مطلوب بازیافت ضایعات مواد غذایی

$Z_{input}^{(t,t+1)}$: انتقال شامل سرمایه‌گذاری در دارایی‌های ثابت

S_{0-}^t : متغیرهای ورودی بازیافت را نشان می‌دهد.

S_{20bad}^{t+} : بیانگر مازاد خروجی نامطلوب بازیافت می‌باشند.

$S_{input}^{(t,t+1)}$: بیانگر متغیر مازاد برای انتقال است.

ب) کارایی دوره‌ای: برای هر دوره، میزان کارایی در آن بازه زمانی خاص محاسبه می‌شود تا تغییرات زمانی بررسی شوند.

این کارایی به بررسی عملکرد سیستم در یک بازه زمانی خاص می‌پردازد. در واقع، با محاسبه کارایی دوره‌ای می‌توان تغییرات زمانی و عوامل محیطی یا مدیریتی تأثیرگذار بر سیستم را تحلیل کرد (معادله ۲).

$$\partial_0^* =$$

معتبری مانند آمارنامه‌های جهاد کشاورزی، مرکز آمار ایران و بانک مرکزی جمع‌آوری شده‌اند. اطلاعات مربوط به متغیرهای ورودی، خروجی و انتقال پس از پردازش و استانداردسازی به مدل وارد شده‌اند. اطلاعات کامل در زمینه جمع‌آوری داده‌های مدل در جدول ۱ ارائه شد.

شایان ذکر است که برای حل مدل ریاضی تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای پویا، از نرم‌افزار GAMS^۱ استفاده شده است. شایان ذکر است که تابع هدف این مدل (معادله ۱) به صورت کسری تعریف شده است. این تابع هدف دارای ویژگی‌هایی است که آن را ذاتاً غیرخطی می‌کند. اول آنکه تابع هدف به صورت نسبت دو تابع خطی است. اگرچه برخی از مدل‌های برنامه‌ریزی کسری^۲ DEA با استفاده از تبدیل‌هایی به فرم خطی تبدیل می‌شوند، اما این تبدیل در مدل‌های شبکه‌ای پویا با متغیرهای انتقالی و خروجی‌های نامطلوب، به دلیل وجود همزمان متغیرهای کمبود در صورت و مخرج کسر و همچنین وجود پیوندهای زمانی، منجر به یک مدل خطی ساده نمی‌شود. دوم وجود متغیرهای کمبود در مخرج کسر است. تنی (Tone, 2002) خود اشاره می‌کند که مدل SBM اصلی غیرخطی است و برای حل آن باید از تبدیل‌های خاص یا حلگرهای غیرخطی استفاده کرد. سوم آنکه مدل شامل محدودیت‌های انتقال بین دوره‌ای (معادلات ۷ و ۸) است که متغیرهای Z را به λ پیوند می‌دهد. این محدودیت‌ها همراه با تابع هدف کسری، مدلی ایجاد می‌کنند که خطی‌سازی ساده آن امکان‌پذیر نیست. بنابراین، حفظ ساختار اصلی مدل و حل آن به صورت NLP، رویکردی دقیق‌تر و قابل اعتمادتر است. CONOPT یک حلگر قدرتمند در نرم‌افزار GAMS است که برای مسائل بهینه‌سازی غیرخطی در مقیاس بزرگ که بر اساس روش گرادیان کاهش‌یافته تعمیم‌یافته (GRG)^۳ کار می‌کند، تعبیه شده است. مدل مورد استفاده در این مطالعه با توجه به تعداد استان‌ها (n)، دوره‌ها (T) و متغیرها، یک مسئله غیرخطی نسبتاً بزرگ اما تنک^۴ است و CONOPT برای چنین مسائلی بهینه شده است. همچنین، CONOPT به دلیل پایداری عددی بالا، در مسائل DEA که ممکن است مقادیر بسیار کوچک یا صفر در داده‌ها داشته باشند، مناسب است.

به تحلیل دقیق ورودی‌ها و خروجی‌های مرتبط با آن کمک می‌کنند و از رعایت تعادل و منطق در تخصیص منابع و بررسی ناکارایی‌ها اطمینان حاصل می‌کنند.

معادله ۳ محدودیتی است که تضمین می‌کند خروجی‌های مطلوب حاصل از بازیافت ضایعات غذایی، بر اساس ترکیب مناسب ضرایب وزنی λ^t و مقدار ناکارایی s_o^{t-} محاسبه می‌شوند.

$$x_o^t = X^t \lambda^t + s_o^{t-} (\forall t) \quad (3)$$

معادله ۴ برای بررسی انتشار مواد نامطلوب (مانند گازهای گلخانه‌ای) ناشی از بازیافت ضایعات طراحی شده است. این مواد بر اساس ضرایب وزن λ^t و ناکارایی‌ها s_{obad}^{t-} محاسبه می‌شوند.

$$y_{obad}^t = Y_{bad}^t \lambda^t + s_{obad}^{t-} (\forall t) \quad (4)$$

مدل بکار گرفته شده در این مطالعه بدون تغییر در مقدار ورودی‌های نامطلوب، قادر است این متغیرها را نامطلوب در نظر بگیرد. توضیح این مطلب به این صورت است که درست مانند محدودیت ورودی‌ها (معادله ۳) که متغیر کمبود دارای علامت مثبت است، در محدودیت ۴ نیز علامت متغیر کمبود مثبت است؛ این علامت مثبت به معنی در نظر گرفتن خروجی‌ها به عنوان خروجی نامطلوب بوده و هیچ نیازی به تغییر در مقدار پارامترها وجود ندارد.

معادله ۵ بیان می‌کند که خروجی‌های مطلوب (مانند مواد بازیافتی) باید مطابق با ضرایب وزنی λ^t و مقدار ناکارایی s_{oin}^t محاسبه شوند.

$$y_{oin}^t = y_{in}^t \lambda^t + s_{oin}^t (in) \quad (5)$$

ضرایب وزنی برای تمامی واحدهای تصمیم‌گیرنده باید برابر با یک باشند تا تعادل و انسجام در محاسبات حفظ شود (معادله ۶).

$$e \lambda^t = 1 (\forall t) \quad (6)$$

معادلات ۷ و ۸ محدودیت‌های انتقال را معرفی می‌کنند. این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که ورودی‌های انتقالی در دوره‌های مختلف قابل انتقال باشند.

$$\sum_{j=1}^n z_{ja}^{(t,t+1)} \lambda_j^t = \sum_{j=1}^n z_{ja}^{(t,t+1)} \lambda_j^{t+1} \quad (t = 1, \dots, T-1) \quad (7)$$

$$\frac{z_{oinput}^{(t,t+1)}}{s_{oinput}^{(t,t+1)}} = \sum_{j=1}^n \frac{z_{jinput}^{(t,t+1)}}{s_{jinput}^{(t,t+1)}} \lambda_{jk}^t + \quad (8)$$

در نهایت، تمام متغیرهای مدل باید غیرمنفی باشند، زیرا خروجی‌های مطلوب، نامطلوب و ضرایب وزنی نمی‌توانند مقادیر منفی داشته باشند (معادله ۹).

$$\lambda^t \geq 0, s_o^{t-} \geq 0, s_{obad}^{t-} \geq 0. \quad (\forall t) \quad (9)$$

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات کشاورزی ۳۱ استان ایران در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸ است. این داده‌ها از منابع

3- Generalized Reduced Gradient

4- Sparse

1- General Algebraic Modeling System

2- Fractional Programming

جدول ۱- توضیح محاسبه پارامترهای مدل به همراه منابع مورد استفاده

Table 1- Explanation of the calculation of model parameters along with the sources used

نوع پارامتر Parameter type	تعریف پارامتر Parameter definition	واحد Unit	نماد Symbol	نحوه محاسبه Calculation	منبع Source
ورودی Input	هزینه بازیافت ضایعات Waste recycling cost	میلیون ریال Million Rials	X3	جمعیت هر استان در سال t ضربدر سرانه ضایعات مواد غذایی (۲۷/۶ کیلوگرم) ضربدر نرخ بازیافت (۱۰ درصد) ضربدر هزینه بازیافت به ازای هر واحد وزنی. Population of each province in year t times per capita food waste (27.6 kg) times recycling rate (10%) times recycling cost per unit weight	جمعیت استان‌ها: مرکز آمار ایران (سرشماری نفوس و مسکن)-سرانه ضایعات و نرخ بازیافت: (Khosravani et al., 2016) - هزینه بازیافت: (Badeenezhad et al., 2024) Population of provinces: Statistical Center of Iran (Population and Housing Census) - Per capita waste and recycling rate: (Khosravani et al., 2016) - Recycling cost: (Badeenezhad et al., 2024)
	انرژی مصرفی Energy consumed	تن Ton		تولید محصولات کشاورزی استان j در سال t تقسیم بر کل تولیدات کشور در سال t ضربدر مقدار انرژی مصرفی سالانه کل کشور (بر اساس گزارش‌های ترازنامه انرژی). Agricultural production of province j in year t divided by the total production of the country in year t multiplied by the annual energy consumption of the entire country (based on energy balance reports)	تولیدات کشاورزی: وزارت جهاد کشاورزی، آمارنامه کشاورزی (جلد اول و سوم)-انرژی مصرفی کل کشور: ترازنامه هیدروکربوری Agricultural production: Ministry of Agricultural Jihad, Agricultural Statistics (Volumes One and Three) - Total national energy consumption: Hydrocarbon balance sheet
	CO ₂	هزار تن A thousand tons		تولیدات کشاورزی استان مورد بررسی در سال t تقسیم بر کل تولیدات کشور در همان سال t ضربدر مقدار CO ₂ انتشار یافته سال t (بر اساس ترازنامه هیدروکربوری). Agricultural production of the province under study in year t divided by the total production of the country in the same year t multiplied by the amount of CO ₂ emitted in year t (based on the hydrocarbon balance sheet)	تولیدات کشاورزی: وزارت جهاد کشاورزی آمارنامه کشاورزی (جلد اول و سوم)-انتشار آلاینده‌ها: ترازنامه هیدروکربوری Agricultural Production: Ministry of Agricultural Jihad Agricultural Statistics (Volumes One and Three) - Emissions of Pollutants: Hydrocarbon Balance Sheet
	CH ₄	تن Ton		تولیدات کشاورزی استان مورد بررسی در سال t تقسیم بر کل تولیدات کشور در همان سال t ضربدر مقدار متان انتشار یافته سال t (بر اساس ترازنامه هیدروکربوری). Agricultural production of the province under study in year t divided by the total production of the country in the same year t multiplied by the amount of methane emitted in year t (based on the hydrocarbon balance sheet)	تولیدات کشاورزی: وزارت جهاد کشاورزی آمارنامه کشاورزی (جلد اول و سوم)-انتشار آلاینده‌ها: ترازنامه هیدروکربوری Agricultural Production: Ministry of Agricultural Jihad Agricultural Statistics (Volumes One and Three) - Emissions of Pollutants: Hydrocarbon Balance Sheet
خروجی‌های نامطلوب Undesirable outputs			Y3		
پیوند Link	بازیافت ضایعات Waste recycling	صد تن One hundred tons	Z31	جمعیت هر استان در سال t ضربدر سرانه ضایعات مواد غذایی (۲۷/۶ کیلوگرم) ضربدر نرخ بازیافت (۱۰ درصد) Population of each province in year t times per capita food waste (27.6 kg) times recycling rate (10 percent)	جمعیت استان‌ها: مرکز آمار ایران (سرشماری نفوس و مسکن)-سرانه ضایعات و نرخ بازیافت: (Khosravani et al., 2016) Population of provinces: Statistical Center of Iran (Population and Housing Census) - Per capita waste and recycling rate: (Khosravani et al., 2016)

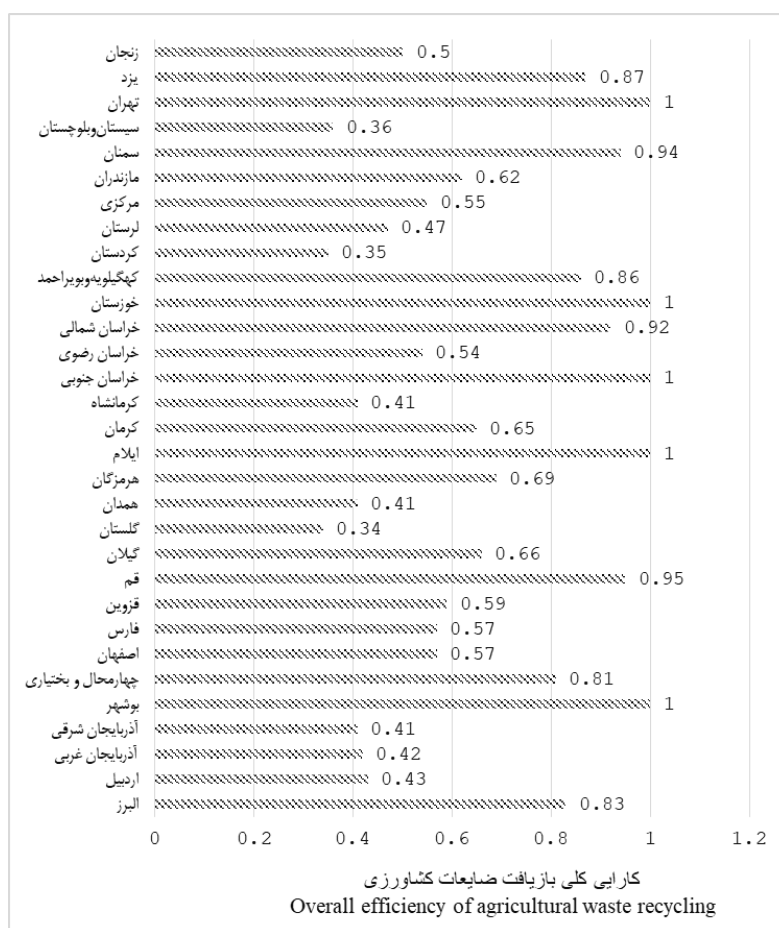
آن را از مدل‌های کلاسیک DEA که صرفاً به ارزیابی تک‌دوره‌ای و تک‌فراآیندی می‌پردازند، متمایز می‌کند. نوآوری این پژوهش در کاربرد این مدل پیشرفته در حوزه بازیافت ضایعات غذایی و تلفیق همزمان ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی در چارچوبی یکپارچه و پویا برای استان‌های ایران است.

نتایج و بحث

شکل ۱ نتایج ارزیابی کارایی کلی سیستم‌های بازیافت ضایعات کشاورزی در استان‌های ایران را نشان می‌دهد. بر این اساس، پنج استان تهران، خوزستان، ایلام، خراسان جنوبی و بوشهر با کسب امتیاز کارایی برابر با ۱، به‌عنوان واحدهای کاملاً کارا شناسایی شده‌اند. این استان‌ها مرز کارایی را تشکیل می‌دهند و الگوی مناسبی برای بهره‌گیری سایر واحدها محسوب می‌شوند.

همچنین، برای تحلیل آماری و محاسبه ضریب همبستگی پیرسون بین کارایی عوامل (ورودی‌ها و خروجی‌ها) و میانگین کارایی کلی، از نرم‌افزار SPSS بهره گرفته شده است. این تحلیل به‌منظور بررسی آماری همبستگی بین امتیازهای کارایی هر یک از ورودی و خروجی‌های پژوهش انجام شده است.

در این پژوهش، برای اولین بار در ایران، از مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای پویا بر اساس رویکرد لیو و همکاران (Lu et al., 2022) برای ارزیابی کارایی زیست‌اقتصادی بازیافت ضایعات مواد غذایی استفاده شده است. این مدل که یکی از پیشرفته‌ترین و جدیدترین مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها محسوب می‌شود، با ساختار شبکه‌ای خود امکان تحلیل فرآیندهای داخلی و پیوندهای بین بخشی را فراهم کرده و ماهیت پویای آن، مدل‌سازی متغیرهای انتقالی بین دوره‌های زمانی را میسر می‌سازد. ویژگی متمایز این مدل، قابلیت مدل‌سازی همزمان خروجی‌های مطلوب (بازیافت) و نامطلوب (آلاینده‌های زیست‌محیطی) بدون نیاز به تغییر در مقادیر آنهاست که



شکل ۱- مقایسه کارایی کلی بازیافت ضایعات غذایی در استان‌های ایران
Figure 1- Comparison of overall food waste recycling efficiency in Iranian provinces

جدول ۲- کارایی دوره‌ای بازیافت ضایعات کشاورزی در استان‌های ایران (۱۳۹۸-۱۳۹۳)

Table 2- Periodic efficiency of agricultural waste recycling in Iranian provinces (2014-2019)

استان Province	1393 2014	1394 2015	1395 2016	1396 2017	1397 2018	1398 2019
البرز Alborz	1	1	0.66	0.74	0.89	0.73
اردبیل Ardabil	0.46	0.62	0.36	0.36	0.4	0.39
آذربایجان غربی Azerbaijan West	0.44	0.4	0.41	0.38	0.58	0.35
آذربایجان شرقی Azerbaijan East	0.45	0.44	0.41	0.41	0.42	0.35
بوشهر Busheh	1	1	1	1	1	1
چهارمحال و بختیاری Chahar-e-Mahāl-e-Bakhtiari	0.8	0.84	0.79	0.79	0.8	0.81
اصفهان Isfahan	1	0.53	0.48	0.53	0.56	0.43
فارس Fars	0.61	0.62	0.56	0.61	0.58	0.43
قزوین Qazvin	0.58	0.56	0.7	0.63	0.61	0.44
قم Qom	0.9	0.92	1	0.94	0.96	0.99
گیلان Gilan	0.63	0.56	0.63	1	0.67	0.54
گلستان Golestan	0.38	0.35	0.33	0.35	0.31	0.31
همدان Hamdan	0.5	0.42	0.39	0.35	0.41	0.36
هرمزگان Hormozgan	1	0.69	0.6	0.6	0.69	0.64
ایلام Ilam	1	1	1	1	1	1
کرمان Kerman	0.63	0.55	0.59	0.63	1	0.57
کرمانشاه Kermanshah	0.41	0.35	0.33	0.36	0.63	0.35
خراسان جنوبی Khorasan South	1	1	1	1	1	1
خراسان رضوی Khorasan Razavi	0.5	1	0.44	0.45	0.53	0.41
خراسان شمالی North Khorasan	1	1	1	1	0.8	0.78
خوزستان Khuzestan	1	1	1	1	1	1
کهگیلویه و بویراحمد Kohgiluyeh-e-Boyr-Ahmad	1	0.74	1	0.69	1	0.74
کردستان Kurdistan	0.42	0.36	0.33	0.33	0.32	0.29

لرستان Lorestan	0.46	0.4	0.44	0.42	0.47	0.63
مرکزی Markazi	0.71	0.55	0.51	0.46	0.66	0.42
مازندران Mazandaran	0.66	0.62	0.58	0.67	0.6	0.59
سمنان Semnan	1	0.83	1	1	1	0.82
سیستان و بلوچستان Sistan-e-Baluchestan	0.38	0.35	0.34	0.34	0.35	0.32
تهران Tehran	1	1	1	1	1	1
یزد Yazd	1	1	0.79	0.74	0.95	0.77
زنجان Zanjan	0.49	0.48	0.48	0.57	0.52	0.46
میانگین Average	0.72	0.68	0.65	0.66	0.7	0.61

یافته‌ها نشان‌دهنده نیاز این استان‌ها به بهبود زیرساخت‌ها و فرآیندهای بازیافت است. استان‌هایی مانند آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و لرستان در بیشتر سال‌ها کارایی متوسطی داشته‌اند، اما تغییرات قابل توجهی نشان داده‌اند. برای نمونه، لرستان در سال ۱۳۹۸ به امتیاز ۰/۶۳ رسیده که نسبت به سال‌های قبل افزایش قابل توجهی است. استان‌های اصفهان، گیلان و فارس نیز عملکردی نوسانی داشته‌اند. این استان‌ها در برخی دوره‌ها به کارایی نزدیک به کامل دست یافته‌اند، اما در سایر دوره‌ها افت چشم‌گیری داشته‌اند. به‌طور مثال، اصفهان در سال ۱۳۹۳ کارایی کامل داشته، اما در سال ۱۳۹۸ به ۰/۴۳ کاهش یافته است.

میانگین کارایی کشوری از ۰/۷۲ در سال ۱۳۹۳ به ۰/۶۱ در سال ۱۳۹۸ کاهش یافته است که نشان‌دهنده چالش‌های افزایشی در مدیریت ضایعات غذایی در طول این دوره است.

این الگوها بیانگر تفاوت‌های قابل ملاحظه در عملکرد استان‌ها است. استان‌هایی که در تمام دوره‌ها کارایی کامل داشته‌اند، نمونه‌های موفق از مدیریت پایدار منابع هستند. در مقابل، استان‌های با کارایی پایین نیازمند اقدامات اصلاحی و سیاست‌های حمایتی برای بهبود فرآیندهای بازیافت و بهره‌برداری بهتر از منابع هستند.

شکل ۲ توزیع فضایی کارایی بازیافت ضایعات کشاورزی در ایران را نشان می‌دهد. در این نقشه، نواحی با رنگ سبز بیانگر کارایی بالا و نواحی با رنگ قرمز نشان‌دهنده کارایی پایین هستند. همان‌طور که دیده می‌شود، الگوی روشنی از ناهمگونی جغرافیایی وجود دارد. مناطق با کارایی بالاتر بیشتر در بخش‌های مرکزی، جنوبی و شرقی کشور قرار دارند، در حالی که مناطق با کارایی پایین عمدتاً در غرب و شمال‌غرب مشاهده می‌شوند. رنگ‌های زرد و نارنجی نیز بیانگر سطوح میانی

در مقابل، استان‌های گلستان (۰/۳۴)، کردستان (۰/۳۵)، آذربایجان شرقی و کرمانشاه (هر دو ۰/۴۱)، و آذربایجان غربی (۰/۴۲) کمترین سطح کارایی را ثبت کرده‌اند. این یافته بیانگر ضعف جدی در ساختارهای فنی، نهادی یا عملیاتی مدیریت و بازیافت ضایعات کشاورزی در این مناطق است و لزوم توجه فوری و برنامه‌ریزی هدفمند برای رفع شکاف کارایی را آشکار می‌سازد.

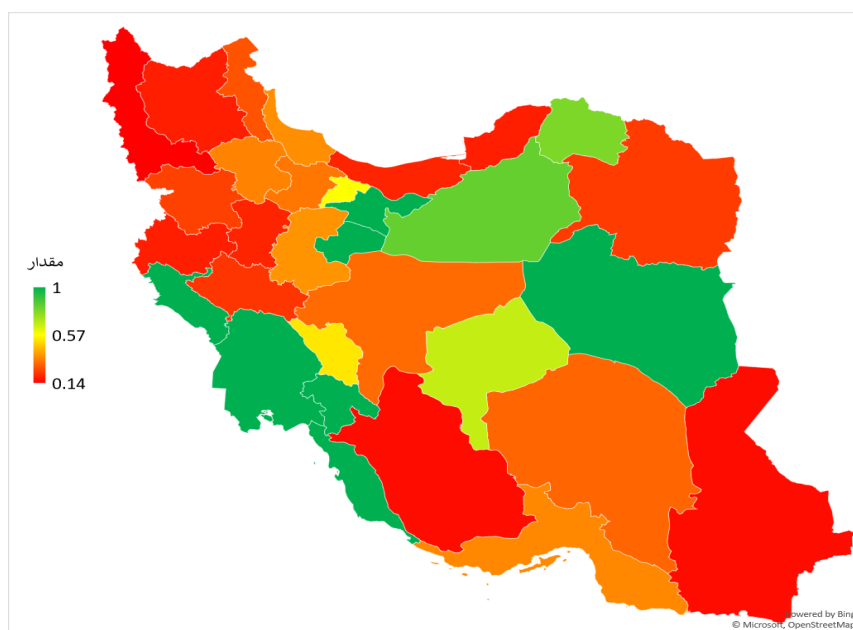
همچنین، گروهی از استان‌ها از جمله قم (۰/۹۵)، سمنان (۰/۴۵)، کهگیلویه و بویراحمد (۰/۸۶)، یزد (۰/۸۷)، البرز (۰/۸۳) و چهارمحال و بختیاری (۰/۸۱) در محدوده کارایی نسبتاً بالا قرار دارند، اما همچنان فاصله‌ای تا دستیابی به کارایی کامل دارند.

در مجموع، میانگین کارایی در سطح کشور نشان‌دهنده توزیع ناهمگون و پراکنده عملکرد استانی است؛ در حالی که بخشی از استان‌ها عملکردی نزدیک به بهینه دارند، گروه قابل توجه دیگری فاصله چشم‌گیری تا مرز کارایی دارند. این پراکندگی، بازتابی از ناهمگونی‌های منطقه‌ای در دسترسی به زیرساخت‌های مناسب، سطح فناوری، ظرفیت‌های نهادی و چارچوب‌های حکمرانی در حوزه مدیریت پسماند کشاورزی است.

جدول ۲ کارایی بازیافت ضایعات کشاورزی در استان‌های ایران را در طول شش سال (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸) نشان می‌دهد. برخی استان‌ها در تمام دوره‌ها به کارایی کامل (امتیاز ۱) دست یافته‌اند. از جمله این استان‌ها می‌توان به بوشهر، ایلام، خراسان جنوبی، خوزستان و تهران اشاره کرد که مدیریت مؤثر و پایداری در فرآیندهای بازیافت داشته‌اند. در مقابل، استان‌های گلستان، سیستان و بلوچستان، کردستان و اردبیل در تمام سال‌ها کارایی پایین (زیر ۰/۵) داشته‌اند. به‌عنوان مثال، گلستان در سال ۱۳۹۸ کمترین کارایی را با امتیاز ۰/۳۱ ثبت کرده است. این

کشاورزی در ایران یکنواخت نیست و تفاوت قابل توجهی بر اساس موقعیت جغرافیایی وجود دارد.

کارایی بوده و در برخی مناطق شمال، مرکز و جنوب شرق کشور دیده می‌شوند. این الگوی فضایی نشان می‌دهد که کارایی بازیافت ضایعات



شکل ۲- نقشه کارایی بازیافت ضایعات مواد غذایی در ایران
Figure 2- Food waste recycling efficiency map in Iran

مداخله سیاستی است. استان‌هایی با نماد ★، به‌ویژه گلستان، کردستان و سیستان و بلوچستان نیازمند برنامه‌های فوری برای ارتقای کارایی در مدیریت انرژی و هزینه‌های ضایعات هستند.

شکل ۳ مقایسه‌ای بین کارایی کلی و کارایی کل-عامل برای خروجی‌های نامطلوب شامل هزینه ضایعات، انرژی مصرفی، CO_2 و متان را در استان‌های ایران نشان می‌دهد. در این شکل، استان‌هایی با کارایی بازیافت بالا، مانند بوشهر، ایلام، خراسان جنوبی، خوزستان و تهران دارای کارایی کلی نزدیک به ۱ هستند. در مقابل، استان‌هایی با کارایی بازیافت پایین، مانند گلستان (۰/۱۸۵)، کردستان (۰/۲۴۹)، سیستان و بلوچستان (۰/۱۵۵) و آذربایجان شرقی (۰/۱۸۷) نشان‌دهنده کارایی کلی پایین‌تر هستند. خروجی‌های نامطلوب نیز الگوهای مشابهی را نشان می‌دهند: استان‌هایی با کارایی بالا، مقدار کمتری از متان، CO_2 و انرژی مصرفی دارند. به عنوان مثال بوشهر با کارایی ۱، مقدار متان، CO_2 و انرژی مصرفی را همگی برابر با ۱ (به معنای کمترین سطح خروجی نامطلوب در مقیاس) ثبت کرده است. در مقابل، گلستان با کارایی ۰/۱۸۵، مقدار متان، CO_2 و انرژی مصرفی را به ترتیب ۰/۲۱۴، ۰/۲۱۲ و ۰/۲۱۲ دارد که نشان‌دهنده ناکارآمدی در کاهش آلودگی است. این یافته‌ها بر ضرورت توسعه فناوری‌های کاهش انتشار در این مناطق تأکید دارد. به‌طور کلی، کارایی کلی تحت تأثیر کارایی بازیافت و خروجی‌های نامطلوب قرار دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد

جدول ۳ وضعیت اولویت حاکمیت برای اهمیت دادن به متغیرهای مختلف در بازیافت ضایعات مواد غذایی را در استان‌های ایران نشان می‌دهد. میانگین کارایی کلی در حدود ۰/۴ (۴۰ درصد) است، که نشان‌دهنده این است که بیش از ۶۰ درصد استان‌ها کارایی پایین‌تر از میانگین دارند.

کمترین کارایی در میان پارامترهای مورد بررسی مربوط به مصرف انرژی بوده است که میانگین پایینی نسبت به سایر متغیرها (مثل CO_2 و متان) داشته است. این یافته نشان‌دهنده ضعف ساختاری در مدیریت انرژی در فرایندهای بازیافت ضایعات کشاورزی در اکثر استان‌ها است. بر اساس رتبه‌بندی کارایی بازیافت، استان‌هایی با کارایی پایین‌تر شامل اردبیل، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، گلستان، همدان، کرمانشاه، کردستان، لرستان و سیستان و بلوچستان هستند. این استان‌ها باید در اولویت بالاتری برای بهبود قرار گیرند (به‌ویژه در زمینه‌های کاهش هزینه‌های ضایعات و مصرف انرژی). در میان این استان‌ها، گلستان (۰/۳۸)، کردستان (۰/۴۵)، سیستان و بلوچستان (۰/۲۸)، آذربایجان شرقی (۰/۳۴)، همدان (۰/۴۳)، کرمانشاه (۰/۳۸)، آذربایجان غربی (۰/۲۹) و فارس (۰/۳۸) به دلیل کارایی پایین در هزینه ضایعات، نیازمند توجه ویژه‌تری هستند.

نمادهای اولویت بهبود در جدول شامل ★ (اولویت بالا)، □ (اولویت متوسط) و X (بدون نیاز به بهبود) نشان‌دهنده سطح ضرورت

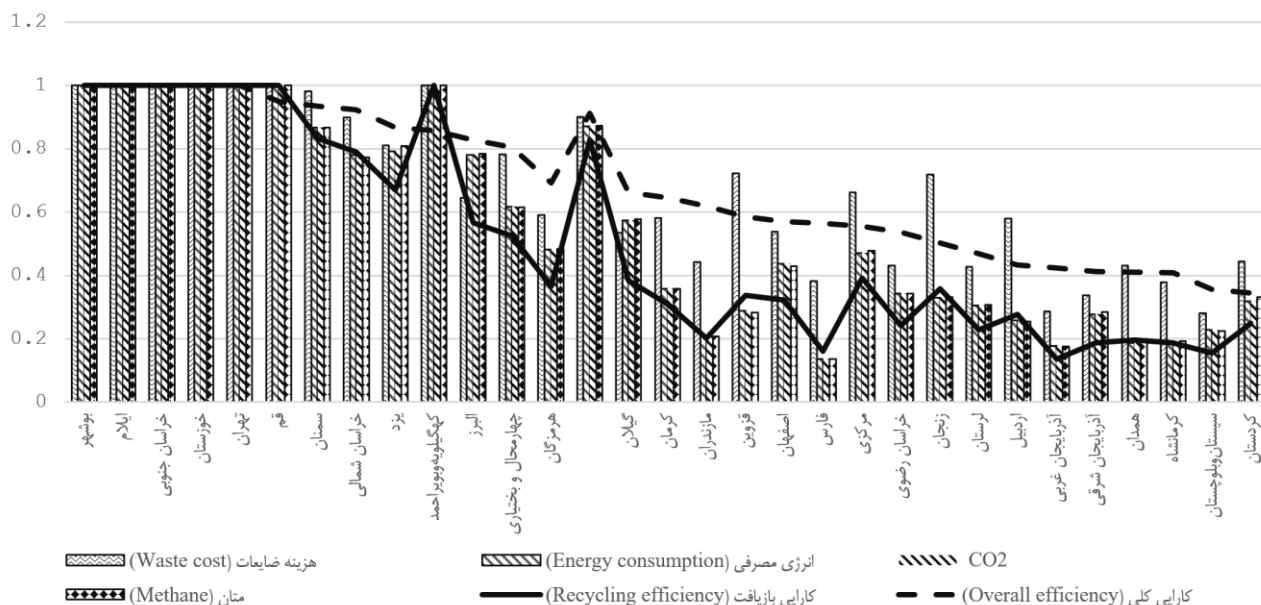
که بهبود کارایی بازیافت، به‌ویژه از طریق کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های ضایعات می‌تواند به افزایش کارایی کلی و کاهش آلودگی منجر شود. این الگوها با یافته‌های جدول ۳ هم‌سو هستند و نشان می‌دهند که استان‌هایی با اولویت بهبود بالاتر (نماد ★) مانند گلستان، کردستان و سیستان و بلوچستان نیازمند توجه ویژه به مدیریت خروجی‌های نامطلوب هستند.

جدول ۳- وضعیت اولویت حاکمیت برای متغیرهای بکار رفته در کارایی بازیافت ضایعات مواد غذایی
Table 3- Governance priority status for variables used in food waste recycling efficiency

کارایی بازیافت Recycling efficiency	رتبه Rank	متان Methane	CO ₂	انرژی مصرفی Energy consumption	هزینه ضایعات Waste cost	استان Province	اولویت بهبود Priority for improvement
0.34	1	0.21	0.21	0.21	0.38	گلستان Golestan	★(۲)
0.35	2	0.33	0.32	0.32	0.45	کردستان Kurdistan	★(۲)
0.36	3	0.23	0.23	0.23	0.28	سیستان و بلوچستان Sistan and Baluchestan	★(۱)
0.41	4	0.29	0.28	0.28	0.34	آذربایجان شرقی Azerbaijan East	★(۱)
0.41	5	0.19	0.19	0.19	0.43	همدان Hamedan	★(۱)
0.41	6	0.19	0.19	0.19	0.38	کرمانشاه Kermanshah	★(۱)
0.42	7	0.18	0.18	0.18	0.29	آذربایجان غربی Azerbaijan West	★(۱)
0.43	8	0.25	0.26	0.26	0.58	اردبیل Ardabil	★(۱)
0.47	9	0.31	0.31	0.3	0.43	لرستان Lorestan	★(۱)
0.5	10	0.33	0.33	0.33	0.72	زنجان Zanjan	★(۱)
0.54	11	0.34	0.34	0.34	0.43	خراسان رضوی Razavi Khorasan	★(۱)
0.55	12	0.48	0.47	0.47	0.66	مرکزی Markazi	★(۱)
0.57	13	0.43	0.44	0.44	0.54	اصفهان Isfahan	★(۱)
0.57	14	0.14	0.14	0.14	0.38	فارس Fars	★(۱)
0.59	15	0.28	0.29	0.29	0.72	قزوین Qazvin	★(۱)
0.62	16	0.21	0.21	0.21	0.44	مازندران Mazandaran	★(۱)
0.65	17	0.36	0.36	0.36	0.58	کرمان Kerman	★(۱)
0.66	18	0.58	0.58	0.57	0.53	گیلان Gilan	★(۱)
0.69	19	0.48	0.48	0.48	0.59	هرمزگان Hormozgan	★(۱)
0.81	20	0.62	0.62	0.62	0.78	چهارمحال و بختیاری Chaharmahal and Bakhtiari	◎(۱)
0.83	21	0.79	0.78	0.78	0.65	البرز Alborz	★(۱)
0.86	22	1	1	1	1	کهگیلویه و بویراحمد and Kohgiluyeh Boyer Ahmad	X

Q1)	یزد Yazd	0.81	0.79	0.79	0.81	23	0.87
Q1)	خراسان شمالی Khorasan North	0.9	0.78	0.78	0.77	24	0.92
Q1)	سمنان Semnan	0.98	0.87	0.87	0.87	25	0.94
X	قم Qom	1	1	1	1	26	0.95
X	بوشهر Busheh	1	1	1	1	27	1
X	ایلام Ilam	1	1	1	1	28	1
X	خراسان جنوبی Khorasan South	1	1	1	1	29	1
X	خوزستان Khuzestan	1	1	1	1	30	1
X	تهران Tehran	1	1	1	1	31	1

★ ارتقا اولویت با بهره‌وری پایین‌تر (Priority upgrade with lower productivity) (Lower improvement priority with higher performance score) □ اولویت بهبود کمتر با امتیاز کارایی بالاتر
اولویت (۱) < (۲) < (۳)



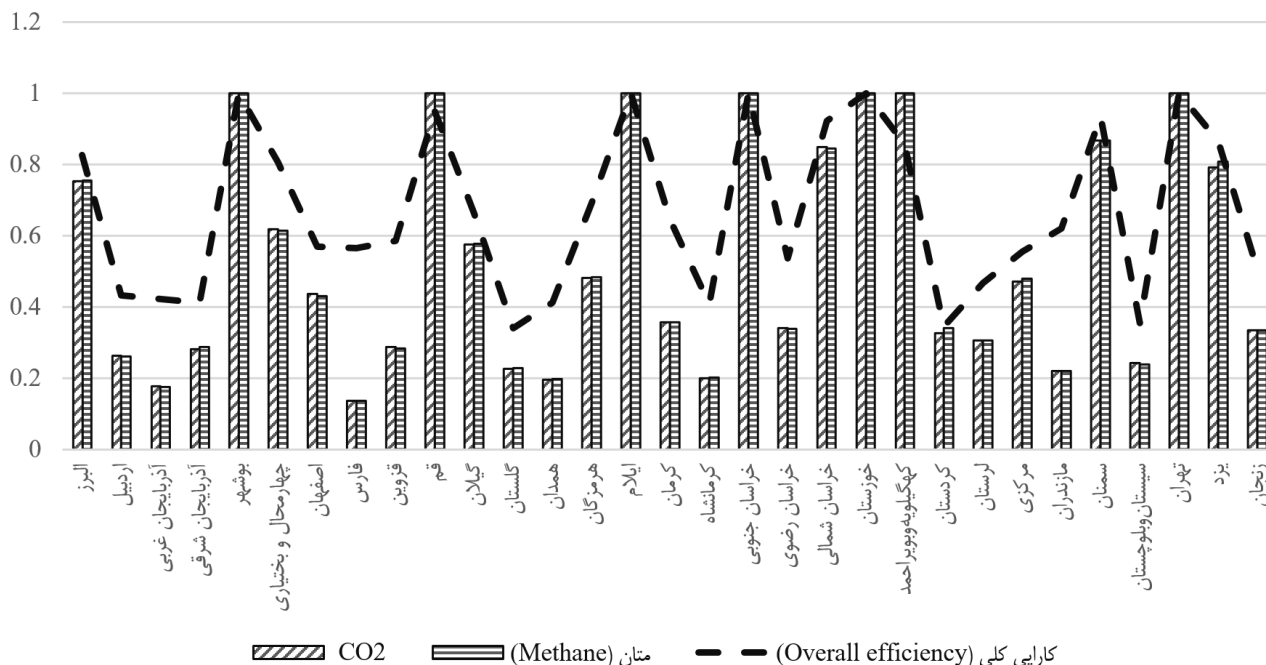
شکل ۳- کارایی کل و کل-عامل خروجی‌های نامطلوب در بازیافت ضایعات غذا به تفکیک استان‌ها
Figure 3- Overall efficiency and total-factor of undesirable outputs in food waste recycling by province

تهران کارایی کامل (۱) در مدیریت هر دو گاز را ثبت کرده‌اند، که نشان‌دهنده عملکرد بهینه در کاهش آلودگی هوا است. استان‌های لرستان، کردستان، کرمانشاه، مازندران، سیستان و بلوچستان، همدان، اردبیل، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، قزوین، گلستان، کرمان، خراسان رضوی، زنجان، اصفهان، مرکزی و هرمزگان نیز کارایی پایین‌تری در مدیریت متان و CO_2 دارند و باید بهبود این دو پارامتر را در اولویت سیاست‌های خود قرار دهند. به‌ویژه، استان‌های اردبیل، گلستان، همدان، کرمانشاه، آذربایجان شرقی، کردستان،

شکل ۴ کارایی مدیریت متان و دی‌اکسید کربن را در فرآیند بازیافت ضایعات غذایی در استان‌های ایران نشان می‌دهد. در این چارچوب، مقادیر بالاتر نشان‌دهنده مدیریت بهتر و کاهش بیشتر انتشار این گازهای گلخانه‌ای است. بر اساس داده‌ها، استان فارس کمترین کارایی را در مدیریت هر دو خروجی نامطلوب (متان = 0.137 ، CO_2 = 0.137) دارد و نیازمند تمرکز فوری بر کاهش انتشار این گازها در فرآیند بازیافت ضایعات کشاورزی است. در مقابل، استان‌های بوشهر، ایلام، خراسان جنوبی، خوزستان و

بیشتر استان‌های با کارایی پایین در بازیافت، همزمان با مشکل جدی انتشار گازهای گلخانه‌ای مواجه هستند، که نشان‌دهنده ناکارآمدی ساختاری در فرآیندهای بازیافت است.

لرستان، مرکزی و سیستان و بلوچستان در مدیریت متان عملکرد ضعیف‌تری دارند (مقادیر زیر ۰/۲) و نیازمند اقدامات خاص برای کاهش این گاز با پتانسیل گرمایشی بالا هستند. این الگوها نشان می‌دهند که



شکل ۴- کارایی عوامل توسعه پایدار مواد غذایی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

Figure 4- Efficiency of factors for sustainable food development and greenhouse gas emission reduction

نامطلوب اغلب همزمان و همراستا در سیستم بازیافت رخ می‌دهند و کاهش یکی می‌تواند به کاهش دیگری منجر شود. بنابراین، سیاست‌هایی که همزمان بر کاهش مصرف انرژی، هزینه‌های ضایعات و انتشار گازهای گلخانه‌ای تمرکز کنند، می‌توانند به‌طور همزمان کارایی بازیافت ضایعات کشاورزی را در سطح استانی بهبود بخشند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با بهره‌گیری از مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای پویا و لحاظ کردن خروجی‌های نامطلوب، به ارزیابی کارایی زیست‌اقتصادی بازیافت ضایعات کشاورزی در ۳۱ استان طی دوره ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸ پرداخته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که عملکرد استان‌ها در این حوزه بسیار ناهمگون است. پنج استان تهران، بوشهر، ایلام، خوزستان و خراسان جنوبی در تمامی سال‌های مورد بررسی دارای کارایی کامل (۱) بوده‌اند و به‌عنوان الگوهای موفق در مدیریت پایدار ضایعات کشاورزی شناخته می‌شوند. در مقابل، استان‌هایی مانند گلستان، کردستان، سیستان و بلوچستان، آذربایجان شرقی و کرمانشاه به‌طور مداوم کارایی بسیار پایینی (زیر ۰/۴۵) داشته‌اند و در مدیریت هزینه‌های ضایعات، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO₂)

جهت بررسی رابطه میان امتیاز کارایی بازیافت ضایعات غذایی و کارایی در مدیریت عوامل نامطلوب، از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد (جدول ۴). نتایج این آزمون نشان می‌دهد که همبستگی مثبت، قوی و معناداری بین کارایی بازیافت و سایر شاخص‌های مدیریت خروجی‌های نامطلوب وجود دارد. به‌طور خاص، ضریب همبستگی پیرسون بین کارایی بازیافت و هزینه ضایعات (۰/۹۴۱)، مصرف انرژی (۰/۹۸۱)، دی‌اکسیدکربن (۰/۹۸۱) و متان (۰/۹۸۰) نشان می‌دهد که این عوامل به‌شدت با امتیاز کارایی بازیافت در ارتباط هستند. تمامی ضرایب همبستگی در سطح معناداری ۰/۰۱ آماری معنادار بوده‌اند که نشان‌دهنده رابطه‌ای قوی و مثبت بین این متغیرهاست. این یافته‌ها بیانگر آن است که استان‌هایی که در مدیریت هزینه‌های ضایعات، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای (دی‌اکسیدکربن و متان) عملکرد بهتری دارند، همزمان کارایی بالاتری در فرایند بازیافت ضایعات کشاورزی نیز کسب می‌کنند.

همچنین، نتایج نشان می‌دهد که ارتباط قوی میان خود عوامل نامطلوب نیز وجود دارد؛ به‌عنوان مثال، ضریب همبستگی بین مصرف انرژی و دی‌اکسیدکربن (۱/۰۰۰) و بین دی‌اکسیدکربن و متان (۰/۹۹۹) بسیار بالا و معنادار است. این امر نشان می‌دهد که این خروجی‌های

کارایی بازیافت منجر می‌شود. همچنین، کاهش میانگین کارایی کشوری از ۰/۷۲ در سال ۱۳۹۳ به ۰/۶۱ در سال ۱۳۹۸، بیانگر تشدید چالش‌های ساختاری در سیستم بازیافت ضایعات کشاورزی در ایران است.

و متان) عملکرد ضعیفی از خود نشان داده‌اند. آزمون همبستگی پیرسون نیز رابطه‌ای مثبت، قوی و معنادار بین کارایی بازیافت و کارایی در مدیریت عوامل نامطلوب تأیید کرد. این یافته نشان می‌دهد که کاهش همزمان هزینه‌ها، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها نه تنها با یکدیگر هم‌راستا است، بلکه مستقیماً به افزایش

جدول ۴- آزمون ضریب همبستگی پیرسون برای بازیافت ضایعات مواد غذایی

Table 4- Pearson correlation coefficient test for food waste recycling

	هزینه ضایعات Waste cost	انرژی مصرفی Energy consumed	دی‌اکسیدکربن Carbon dioxide	متان Methane	بازیافت ضایعات Waste recycling
هزینه ضایعات Waste cost	1.00	0.889**	0.889**	0.887**	0.941**
انرژی مصرفی Energy consumed	0.889**	1.00	1.00**	0.999**	0.981**
دی‌اکسیدکربن Carbon dioxide	0.889**	1.00**	1.00	0.999**	0.981**
متان Methane	0.887**	0.999**	0.999**	0.887**	0.980**
بازیافت ضایعات Waste recycling	0.941**	0.981**	0.981**	0.980**	1.00

* و ** به ترتیب بیانگر معنی‌داری در سطوح ۵ و ۱ درصد هستند.

*and ** indicate significance at the 5 and 1 percent levels, respectively.

حمایت‌های مالی و قانونی: ارائه مشوق‌های مالی، معافیت‌های مالیاتی و قوانین الزام‌آور برای جمع‌آوری و بازیافت ضایعات غذایی با توجه به اولویت‌های تعیین شده در این مطالعه می‌تواند کارایی کلی در ایران را بهبود بخشد.

این پژوهش با پر کردن شکاف‌های تحقیقاتی، از جمله لحاظ خروجی‌های نامطلوب و استفاده از مدل پویا گامی مؤثر در جهت تحول به سمت اقتصاد زیستی در ایران برداشته است.

پیشنهادهای سیاستی

اولویت‌دهی منطقه‌محور: استان‌های با کارایی پایین (به‌ویژه گلستان، کردستان و سیستان و بلوچستان) باید در اولویت اول برنامه‌های مداخله‌گری قرار گیرند. تبادل دانش و تجربیات موفق: ایجاد بستری برای انتقال دانش فنی و مدیریتی از استان‌های الگو (مانند تهران و خوزستان) به استان‌های با کارایی پایین‌تر می‌تواند زمینه‌ساز بهبود شرایط گردد.

References

- Al Mamun, A., Hayat, N., Malarvizhi, C.A.N., & Zainol, N.R.B. (2020). Economic and environmental sustainability through green composting: A study among low-income households. *Sustainability*, 12(16), 6488. <https://doi.org/10.3390/su12166488>
- Almaraz, M., Bai, E., Wang, C., Trousdell, J., Conley, S., Faloona, I., & Houlton, B.Z. (2018). Agriculture is a major source of NO_x pollution in California. *Science Advances*, 4(1), eaao3477. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2561>
- Badeenezhad, A., Darabi, K., Torkashvand, J., Khosravani, F., & Moein, H. (2024). Economic and waste flow analysis of available scenarios to improve food waste management in Tehran. *Results in Engineering*, 24, 102852. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102852>
- Baráth, L., Bakucs, Z., Benedek, Z., Fertő, I., Nagy, Z., Vigh, E., Debrenti, E., & Fogarasi, J. (2024). Does participation in agri-environmental schemes increase eco-efficiency? *Science of the Total Environment*, 906, 167518. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167518>
- Chen, C.-M., & Wang, H. (2024). Comparing eco-efficiency with productive efficiency: Addressing the dimensionality issue. *European Journal of Operational Research*, 313(3), 1170-1179. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.09.001>
- De Corato, U., Viola, E., Keswani, C., & Minkina, T. (2024). Impact of the sustainable agricultural practices for governing soil health from the perspective of a rising agri-based circular bioeconomy. *Applied Soil Ecology*, 194,

105199. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105199>
7. Dey, S., Reang, N., Das, P., & Deb, M. (2021). A comprehensive study on prospects of economy, environment, and efficiency of palm oil biodiesel as a renewable fuel. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124981. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124981>
8. FAO. (2011). *Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. <https://doi.org/10.19103/as.2019.0053.01>
9. FAO. (2013). *Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food wastage footprint: Impacts on natural resources*. .
10. Fytli, D., & Zabaniotou, A. (2022). Organizational, societal, knowledge and skills capacity for a low carbon energy transition in a Circular Waste Bioeconomy (CWBE): Observational evidence of the Thessaly region in Greece. *Science of the Total Environment*, 813, 151870. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151870>
11. Heidenreich, A., Grovermann, C., Kadzere, I., Egyir, I.S., Muriuki, A., Bandanaa, J., Clottey, J., Ndungu, J., Blockeel, J., & Muller, A. (2022). Sustainable intensification pathways in Sub-Saharan Africa: Assessing eco-efficiency of smallholder perennial cash crop production. *Agricultural Systems*, 195, 103304. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103304>
12. Hsu, E. (2021). Cost-benefit analysis for recycling of agricultural wastes in Taiwan. *Waste Management*, 120, 424-432. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.051>
13. Khosravani, F., Pezeshki Rad, G.R., & Farhadian, H. (2016). Analyze of component consumer behavior toward food waste in Tehran. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 13(53), 173-183.
14. Klitkou, A., Fevolden, A.M., & Capasso, M. (2019). *From waste to value: Valorisation pathways for organic waste streams in circular bioeconomies*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.4324/9780429460289>
15. Koli, A., Pattanshetti, A., Mane-Gavade, S., Dhabbe, R., Kamble, R., Garadkar, K., & Sabale, S. (2024). Agro-waste management through sustainable production of activated carbon for CO₂ capture, dye and heavy metal ion remediation. *Waste Management Bulletin*, 2(1), 97-121. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.12.010>
16. Kumar, R.S., Sasikumar, R., & Dhilipkumar, T. (2024). Exploiting agro-waste for cleaner production: A review focusing on biofuel generation, bio-composite production, and environmental considerations. *Journal of Cleaner Production*, 435, 140536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140536>
17. Lu, L.C., Chiu, S.-Y., Chiu, Y.-h., & Chang, T.-H. (2022). Three-stage circular efficiency evaluation of agricultural food production, food consumption, and food waste recycling in EU countries. *Journal of Cleaner Production*, 343, 130870. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130870>
18. Mardani Najafabadi, M., Karimi, K., & Mirzaei, A. (2025). Managing the use of production inputs to improve the efficiency of agricultural production in Iran: Application of dynamic network data envelopment analysis. *Agricultural Economics*, 19(3). <https://doi.org/10.22034/iaes.2025.2043911.2089>
19. Mardani Najafabadi, M., Kazmi, H., Shirzadi Laskookalayeh, S., & Abdeslahi, A. (2023). Investigating the ability of fuzzy and robust DEA models to apply uncertainty conditions: an application for date palm producers. *OPSEARCH*, 60(2), 776-801. <https://doi.org/10.1007/s12597-023-00631-6>
20. Mirzaei, A., Naserin, A., & Najafabadi, M.M. (2024). Optimizing water-energy-food nexus index, CO₂ emissions, and chemical pollutants under irrigation water salinity scenarios. *Environmental and Sustainability Indicators*, 23, 100461. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100461>
21. Muizniecea, I., Dace, E., & Blumberga, D. (2015). Dynamic modeling of the environmental and economic aspects of bio-resources from agricultural and forestry wastes. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 806-812. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.129>
22. Munir, S., Zia Ul Haq, M., Shafiq, S., Azeem, A., & Ali, I. (2025). From waste to value: traditional to innovative approaches for agricultural and food waste valorization. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10163-025-02251-2>
23. Ong, P.J., Leow, Y., Soo, X.Y.D., Chua, M.H., Ni, X., Suwardi, A., Tan, C.K.I., Zheng, R., Wei, F., & Xu, J. (2023). Valorization of Spent coffee Grounds: A sustainable resource for Bio-based phase change materials for thermal energy storage. *Waste Management*, 157, 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.039>
24. Osei-Owusu, A.K., Read, Q.D., & Thomsen, M. (2023). Potential energy and environmental footprint savings from reducing food loss and waste in Europe: a scenario-based multiregional input-output analysis. *Environmental Science & Technology*, 57(43), 16296-16308. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00158>
25. Rastegaripour, F., Najafabadi, M.M., Ohadi, N., Tavassoli, A., & Caballero-Calvo, A. (2025). Enhancing agricultural eco-efficiency amid data uncertainty: Saffron farming insights from a semi-arid region. *Environmental Modeling & Assessment*, 30(5), 1089-1103. <https://doi.org/10.1007/s10666-025-10043-z>
26. Ren, C., Liu, S., Van Grinsven, H., Reis, S., Jin, S., Liu, H., & Gu, B. (2019). The impact of farm size on agricultural sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 220, 357-367. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.151>
27. Sharma, R. (2024). Agro-industrial waste to energy-Sustainable management. *Sustainable Materials and Technologies*, 41, e01117. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01117>
28. Singh, R., Paritosh, K., Pareek, N., & Vivekanand, V. (2022). Integrated system of anaerobic digestion and pyrolysis

- for valorization of agricultural and food waste towards circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 360, 127596. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127596>
29. Tone, K. (2002). A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 143(1), 32-41. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00324-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00324-1)
30. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). World Population Prospects 2022: Summary of Results (UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3). United Nations. <https://doi.org/10.18356/9789211065138>
31. Ye, Z., Guo, X., Cheng, L., Cheng, S., Chen, D., Wang, W., & Liu, B. (2019). Reducing PM2. 5 and secondary inorganic aerosols by agricultural ammonia emission mitigation within the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Atmospheric Environment*, 219, 116989. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116989>
32. Zhang, X.-h. (2019). Farm size and fertilizer sustainable use: An empirical study in Jiangsu, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(12), 2898-2909. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62732-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62732-2)