J. Agric. Mech., 11 (3):17-29 (2026)

Journal of
Agricultural Mechanization

Online ISSN: 2717-4107
Journal homepage: https://jam.tabrizu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Multivariate Analysis of Grain and Energy Losses in Wheat Harvesting Systems Using a Combined PCA–LDA Approach

Moslem Namjoo [1], Mohammad Ali Salehi [2*]

1- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

2- Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Mah.C., Islamic Azad University, Mahabad, Iran.

ARTICLE INFO

***Keywords*:**
Energy Ratio,
Grain Loss,
LDA,
Net Energy,
PCA

Received:
2025/10/07

Revised:
2026/09/06

Accepted:
2026/09/13

***Corresponding author:**
masalehi@iau.ir

ABSTRACT

Introduction

Wheat is a strategic crop that supplies around 20% of global calories and protein, making it essential for food security. Although cultivated on more than 217 million hectares worldwide, consumption still surpasses production, highlighting the need to improve yields and reduce post-harvest losses. In developed countries, post-harvest losses are about 2%, but in developing regions they are much higher, wasting not only food but also energy, water, fertilizer, and land. Mechanized harvesting with combines has improved efficiency but grain losses of 2–10% remain, often caused by weather, improper settings, or operator error. Where combine access is limited, farmers use stage-mechanized or semi-mechanized systems. Stage-mechanized harvesting involves reaping, manual gathering, and threshing, while semi-mechanized relies mainly on manual cutting and threshing. Both increase shattering and gathering losses compared to combines. Studies in Iran report combine losses near 5–6%, while semi- and stage-mechanized systems result in greater losses. Each kilogram of grain lost also represents wasted production energy, yet few studies have directly linked harvesting losses with energy efficiency. Kurdistan province, a major wheat-producing area, faces combine shortages during peak harvest. This study therefore assessed and compared losses and energy indices under three systems combine mechanized, stage-mechanized, and semi-mechanized in Marivan.

Materials and Methods

The experiment was conducted in Marivan, Kurdistan province, a mountainous area with a cold-temperate to Mediterranean climate, located in western Iran. A 2-hectare wheat field was used in a randomized complete block design with three harvesting methods combine mechanized, stage-mechanized, and semi-mechanized each replicated four times. In the semi-mechanized system, cutting and gathering were manual with stationary threshing. In the stage-mechanized system, reaping was mechanical, followed by manual gathering and threshing. The combine system used a John Deere 955 harvester for one-pass harvesting. Inputs including seed, fertilizers, pesticides, human labor, fuel, and machinery time were recorded and converted to energy equivalents, while outputs were grain and straw yields. Energy indices calculated included energy ratio, energy productivity, net energy gain, and specific energy. Grain losses were categorized as natural field losses, header or cutting losses, gathering losses, threshing losses, cleaning losses, and qualitative losses. Sampling involved one-square-meter frames and trays placed under machines. Data were analyzed with one-way ANOVA and Duncan's test at 5% significance. Principal Component Analysis (PCA) identified dominant variables, while Linear Discriminant Analysis (LDA) tested classification accuracy. Analyses were performed in R (v4.5.1).

How to cite:
Namjoo, M., and Salehi, MA. (2026). *Multivariate Analysis of Grain and Energy Losses in Wheat Harvesting Systems Using a Combined PCA–LDA Approach.* Journal of Agricultural Mechanization, 11 (3):17-29. https://doi.org/10.22034/jam.2026.69550.1343

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Results and Discussion

Harvesting method significantly affected both losses and energy performance ($p<0.01$). Combine harvesting had the lowest mean total loss of 6.95% (372.2 kg/ha), compared with 10.03% (537.6 kg/ha) in stage-mechanized and 10.76% (576.9 kg/ha) in semi-mechanized systems. Cutting loss was highest in the stage-mechanized system (3.8%), while the combine recorded the lowest header loss (2.9%). These values agree with international ranges of 2–10% for combine losses. Energy analysis showed combine harvesting also minimized energy waste: 5,469.3MJ/ha compared to 8,485.1 MJ/ha for semi-mechanized harvesting. Net energy gain was greatest in the combine system at 26,371.0 MJ/ha, compared with 23,016.4 MJ/ha in stage-mechanized and 23,622.8 MJ/ha in semi-mechanized systems. The combine achieved the highest energy ratio (1.56), productivity (0.106 kg MJ^{-1}), and lowest energy intensity, indicating improved efficiency. PCA revealed the first two components explained 83.1% of total variance, with the first strongly correlated with net energy gain and negatively with losses, clearly separating combine harvesting from the others. The PCA biplot placed combine as most efficient and semi-mechanized as least. LDA confirmed these results, with Wilks' Lambda ($\Lambda=0.042$, $p<0.001$) showing strong discrimination. The model reached 91.7% classification accuracy with Kappa=0.88 and AUC=94.2%. These outcomes confirm that combine harvesting not only reduces losses but also increases energy ratio, while stage-mechanized and semi-mechanized systems remain less efficient due to multiple steps and greater labor needs.

Conclusion

This study shows harvesting method has a decisive impact on wheat grain losses and energy efficiency in Marivan, Kurdistan. Combine mechanized harvesting reduced losses to below 7% while maximizing net energy gain and productivity, making it the most efficient option. Stage-mechanized and semi-mechanized systems had higher cutting, gathering, and threshing losses, leading to greater energy waste. Statistical analyses with PCA and LDA validated energy indices as effective indicators of harvesting performance and consistently ranked combine harvesting highest. These findings stress the need to improve farmers' access to combines in major wheat-growing areas, where shortages during peak harvest amplify post-harvest losses. By lowering both grain and energy waste, full mechanization strengthens farm profitability, national food security, and sustainable resource use. As this study was limited to one season and site, further multi-year and multi-regional research is recommended to confirm results under diverse climatic conditions.

Acknowledgement

The authors sincerely thank the engineers and experts of the Jihad-e-Keshavarzi Organization of Marivan and the Jutiyaran Zagros Company for their valuable cooperation in field operations and data collection. Their technical assistance and logistical support played an essential role in the successful completion of this research.

نشریه
مکانیزاسیون کشاورزی
شاپا الکترونیکی: 2717-4107
درگاه نشریه: https://jam.tabrizu.ac.ir



مقاله پژوهشی

تحلیل چند متغیره تلفات دانه و انرژی در سیستم‌های برداشت گندم با رویکرد ترکیبی PCA-LDA

مسلم نامجو [۱]، محمد علی صالحی [۲*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران.
۲- دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران.

* نویسنده مسئول: E-mail: masalehi@iau.ir

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تحلیل کمی تلفات دانه و تراز انرژی در سامانه‌های مختلف برداشت گندم در منطقه مریوان انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی با سه تیمار برداشت مکانیزه کمباینی، مکانیزه مرحله‌ای و نیمه‌مکانیزه و چهار تکرار طراحی گردید. نهاده‌های مصرفی و خروجی ثبت و معادل انرژی تبدیل شدند. تلفات دانه در مراحل برداشت اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد میانگین تلفات کل دانه در برداشت کمباینی ۶/۹۵ درصد بود که به‌طور معناداری کمتر از برداشت مرحله‌ای مکانیزه (۱۰/۰۳ درصد) و نیمه‌مکانیزه (۱۰/۷۶ درصد) بود (P<0.05). همچنین، انرژی خالص و بازده انرژی در برداشت کمباینی به ترتیب ۲۶۳۷۱ مگاژول در هکتار و ۱/۵۶ برآورد شد که نسبت به دو روش دیگر افزایش چشمگیری داشت. برای تحلیل جامع‌تر، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل تشخیص خطی (LDA) استفاده شد. PCA نشان داد که دو مؤلفه نخست ۸۳/۱ درصد از واریانس کل را تبیین کردند و بار مثبت ۰/۹۱ بر عملکرد، انرژی خالص و بازده انرژی و بار منفی ۰/۸۹- بر تلفات انرژی برداشت، مؤلفه اول را به شاخص برداشت و مدیریت انرژی تبدیل نمود. تحلیل LDA با تابع LD1 توانست ۸۹/۲ درصد واریانس بین‌گروهی را توضیح دهد و دقت طبقه‌بندی ۹۱/۷ درصد، ضریب کاپا ۰/۸۸ و AUC برابر ۹۴/۲ درصد را به دست آورد و مرزبندی واضحی میان تیمارها ایجاد کرد. نتایج تلفیقی سه رویکرد آماری نشان داد مکانیزاسیون کامل برداشت علاوه بر کاهش ۳۵/۵درصد تلفات انرژی، موجب بهبود بهره‌وری کل سیستم برداشت و در شرایط اقلیمی مشابه، به‌عنوان گزینه‌ی فنی–پایدار برتر قابل توصیه است.

کلمات کلیدی: انرژی خالص، بازده انرژی، تحلیل تشخیص خطی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، تلفات دانه

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

گندم به‌عنوان محصولی استراتژیک، سهمی مهمی در امنیت غذایی جهان دارد و حدود ۲۰ درصد از انرژی و پروتئین مورد نیاز بشر را تأمین می‌کند. این محصول در بیش از ۲۱۷ میلیون هکتار از اراضی جهان کشت می‌شود (Erenstein et al., 2022; Mostashari-Rad et al., 2020; Yue et al., 2025) و همچنان مصرف آن فراتر از تولید جهانی است که ضرورت بهینه‌سازی بهره‌وری و مدیریت منابع را آشکار می‌سازد(Ulukan, 2024). راهکارهای اصلی برای پاسخ به تقاضای روزافزون مواد غذایی افزایش عملکرد مزرعه و کاهش ضایعات می‌باشد (FAO, 2023). کاهش ضایعات، به‌ویژه در مرحله برداشت و پس از برداشت، به یکی از راهبردهای اساسی ارتقای امنیت غذایی تبدیل شده است. تلفات پس از برداشت به‌ویژه در کشورهای توسعه‌یافته تنها حدود ۲ درصد گزارش‌شده است و در کشورهای درحال‌توسعه به‌مراتب بالاتر است(Dehghan & Eyvani, 2019; Kumar & Kalita, 2017). تلفات علاوه بر هدر رفت مواد غذایی، منابع حیاتی مانند آب، زمین و انرژی را نیز از بین می‌برد (Calicioglu et al., 2019; Shahbazi et al., 2025).

گسترش برداشت مکانیزه باعث کاهش زمان برداشت و افزایش کارایی شده است (Erkan & Dogan, 2019; Husaini et al., 2021). اما هم‌زمان چالش‌های جدیدی مانند افزایش تلفات دانه در شرایط نامساعد اقلیمی یا تنظیمات نادرست دستگاه‌ها ایجاد کرده است (Filenko et al., 2018). بررسی‌ها نشان می‌دهد در شرایط بهینه و با کمباین‌های مدرن و تنظیمات صحیح، تلفات گندم در برداشت مکانیزه بین ۰.۵ تا ۲ درصد قابل دستیابی است. با این حال، در شرایط واقعی مزارع به ویژه در کشورهای در حال توسعه و با کمباین‌های فرسوده یا تنظیمات نامناسب، تلفات معمولاً بین ۳ تا ۷ درصد و در بدترین شرایط تا ۲۰ درصد نیز می‌رسد (Abdalla et al., 2021; Mirasi et al., 2014; Tihanov et al., 2021).

در بسیاری از مناطق، به‌ویژه نواحی کمتر برخوردار، عدم دسترسی به کمباین در زمان بهینه برداشت سبب تاخیر در برداشت و کشاورزان را ناچار به استفاده از روش‌های مکانیزه مرحله‌ای یا نیمه‌مکانیزه می‌کند. این تأخیر یا استفاده از روش‌های غیر کارآمد، میزان تلفات را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. مقایسه روش‌های برداشت نشان داده است که اگرچه کمباین‌ها در مقایسه با روش‌های مکانیزه مرحله‌ای یا نیمه‌مکانیزه کارایی بالاتری دارند، اما همچنان تلفات قابل‌توجهی ایجاد می‌کنند (Govindaraj et al., 2017; Sattar et al., 2015). در هند، اندونزی و پاکستان، تلفات خرمن‌کوبی بین ۲ تا ۴ درصد و افت ناشی از تأخیر در برداشت یا ضعف مهارت نیروی کار تا بیش از ۳ درصد گزارش‌شده است (Andriani & Kusrini, 2025; Rajak et al., 2022; Van Loon et al., 2020). این یافته‌ها اهمیت انتخاب روش برداشت متناسب با شرایط منطقه‌ای و اقلیمی را برجسته می‌کند.

مطالعات داخلی نشان دادند که میزان تلفات برداشت گندم در مناطق مختلف کشور متغیر بوده و تحت تأثیر شرایط منطقه، ویژگی‌های مزرعه و عملکرد کمباین قرار دارد. در لرستان، تلفات دانه ناشی از کمباین ۶/۴۱ درصد و در کردستان ۴/۹۲ درصد گزارش‌شده است (Motei et al., 2016; Safari & Rostami, 2023). تفاوت مدل‌های کمباین مانند جاندیر و K130 نیز بر میزان تلفات اثرگذار بوده است (Bazvand et al., 2016; Rostami et al., 2018). چنین یافته‌هایی بیانگر لزوم بازنگری در مدیریت و انتخاب فناوری برداشت در کشور است.

از سوی دیگر، توجه به تلفات دانه تنها کافی نیست، بلکه باید آن را از منظر تراز انرژی نیز بررسی کرد؛ زیرا هر دانه تلف‌شده دربردارنده بخشی از انرژی‌های مصرف‌شده در کل فرآیند تولید می‌باشد. اگرچه مطالعات متعددی تراز انرژی ورودی و خروجی تولید گندم را بررسی کرده‌اند (Imran & Ozcatalbas, 2021; Khoshnevisan et al., 2013; Kumar et al., 2024; Salehi, 2023). اما ارتباط مستقیم بین تلفات دانه و اتلاف انرژی کمتر موردتوجه قرارگرفته است. مطالعات مختلف در ایران و سایر کشورها نشان داده‌اند که نهاده‌هایی همچون سوخت دیزل و کود نیتروژن بیشترین سهم را در انرژی ورودی کشت گندم دارند (Alhajj Ali et al., 2013; Moitzi et al., 2019; Taghinazhad & Jabraeil, 2021). این در حالی است که هر دانه تلف‌شده نماینده بخشی از انرژی نهاده‌ها است و نادیده گرفتن آن می‌تواند منجر به برآوردهای ناقص در بهره‌وری انرژی شود.

استان کردستان با تولید ۱,۳۸۵,۱۶۵ تن در سال یکی از قطب‌های تولید گندم در کشور محسوب می‌شود. عملکرد گندم آبی و دیم در این استان به ترتیب ۵,۰۹۷ و ۱,۹۲۳ کیلوگرم بر هکتار است (Anonymous, 2024). با وجود این، مرحله برداشت در این منطقه به دلیل شرایط توپوگرافی، محدودیت زمانی برداشت و عملکرد کمباین‌ها با چالش‌هایی همراه است. در برخی مناطق ازجمله مریوان، محدودیت دسترسی به کمباین در زمان اوج برداشت، کشاورزان را به استفاده از روش‌های مکانیزه مرحله‌ای یا نیمه‌مکانیزه وادار می‌کند. هرچند تلفات دانه و تراز انرژی در تولید گندم به‌طور جداگانه در پژوهش‌های متعددی بررسی شده‌اند، اما ارتباط میان این دو و تحلیل آن‌ها کمتر مورد توجه پژوهشگران بوده است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با رویکردی تلفیقی، به تحلیل هم‌زمان بیلان انرژی و تلفات دانه و انرژی برداشت گندم پرداخته و تلاش می‌کند با شناسایی عوامل مؤثر، راهکارهایی برای افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش تلفات در مرحله برداشت ارائه دهد.

۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش در شهرستان مریوان، واقع در استان کردستان و غرب ایران، انجام شد (شکل ۱). مریوان در مختصات جغرافیایی ۴۵ تا ۴۶ طول شرقی و ۳۵ تا ۳۶ عرض شمالی و در ارتفاع ۱۳۲۰ متری از سطح دریا قرار دارد. دارای آب‌وهوای سرد و کوهستانی با گرایش به معتدل

سرد و حتی مدیترانه‌ای است (Farshad et al., 2022; Sharifi et al., 2017).



شکل ۱- نقشه جغرافیایی شهرستان مریوان.
Fig 1. Geographic location map of Marivan County.

این پژوهش در یک مزرعه گندم به مساحت ۲ هکتار در دشت مریوان انجام شد. مراحل خاک‌ورزی، کاشت و داشت به‌صورت یکسان برای تمام تیمارها اجرا شد. کلیه نهاده‌های مصرفی از مرحله کاشت تا برداشت با دقت ثبت شد. عملیات برداشت در سه روش نیمه‌مکانیزه (برداشت دستی، جمع‌آوری، خرمنکوبی)، مکانیزه مرحله‌ای (دروگر، جمع‌آوری، خرمنکوبی) و مکانیزه کمباینی انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار برداشت مکانیزه کمباینی، برداشت مکانیزه مرحله‌ای و برداشت نیمه مکانیزه و چهار تکرار اجرا شد. تخصیص تیمارها با قرعه‌کشی تصادفی ساده انجام شد.

به منظور حذف اثرات توپوگرافی و باد غالب (غرب به شرق)، پلات‌ها در جهت عمود بر شیب و باد (شمال- جنوب) طراحی شدند. ابعاد هر پلات ۱۰ × ۱۰۰ متر (۱۰۰۰ مترمربع) تعیین شد تا کمباین بدون گردش در پلات، برداشت پیوسته داشته باشد. فاصله بین پلات‌های مجاور در هر بلوک ۳ متر و فاصله بین بلوک‌ها ۵ متر در نظر گرفته شد. همچنین نوار حاشیه ۲ متری در مرز خارجی هر پلات برای همه تکرارها اعمال گردید تا اثرات حاشیه‌ای و تداخل ماشین‌آلات حذف شود. زمان برداشت بر اساس رسیدگی فیزیولوژیکی گندم و رطوبت دانه معادل ۱۴ درصد تعیین شد که با استفاده از رطوبت‌سنج غلات اندازه‌گیری شد. عملکرد نهایی محصول نیز بر اساس وزن خشک دانه در واحد سطح (کیلوگرم در هکتار) محاسبه شد. داده‌های ورودی شامل مصرف سوخت، مصرف سموم شیمیایی، ساعات کار ماشین‌آلات، ساعات کار نیروی انسانی، مصرف کود شیمیایی و مصرف بذر بود. با توجه به محوریت پژوهش بر تلفات دانه، انرژی بقایای گیاهی (کاه و کلش) از محاسبات شاخص‌های انرژی خارج شد و خروجی انرژی شامل محصول گندم در نظرگرفته شد. کلیه ورودی‌ها و خروجی‌ها به‌صورت هکتاری محاسبه و سپس مقادیر آن‌ها بر اساس معادل انرژی هم‌ارز، به انرژی تبدیل شدند (جدول ۱ و شکل ۲). پس از محاسبه انرژی ورودی و خروجی، شاخص‌های مربوط به نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی و انرژی خالص تعیین شد (Menzel et al., 2025; Mohammadi et al., 2008; Platis et al., 2025; Zentner et al., 2004) (معادله ۱ تا ۶).

$$EP = Y/EI \quad (۱)$$
$$ER = EO/EI \quad (۲)$$
$$SE = EI/Y \quad (۳)$$
$$IEI = EI/10000 \quad (۴)$$
$$OEI = EO/10000 \quad (۵)$$
$$NEG = EO - EI \quad (۶)$$

در اینجا؛ EI انرژی ورودی (MJ/ha)، EO انرژی خروجی (MJ/ha)، Y محصول (kg/ha)، EP بهره‌وری انرژی (kg/MJ)، ER بازده انرژی (%)، SE انرژی ویژه (MJ/kg)، IEI شدت انرژی ورودی (MJ/m^2)، OEI شدت انرژی خروجی (MJ/m^2) و NEG انرژی خالص (MJ/ha).

تلفات انرژی در هر روش برداشت، معادل انرژی نهفته در تلفات دانه محاسبه شد. بدین منظور، ابتدا تلفات انرژی برای هر یک از مراحل برداشت (درو، جمع‌آوری و خرمن‌کوبی) به‌طور جداگانه با استفاده از رابطه (۷) برآورد شد.

$$EL = GL * EE_{Wheat} \quad (۷)$$

در اینجا؛ EL تلفات انرژی (Mj/ha)، GL تلفات دانه (kg/ha) و EE_{wheat} معادل انرژی گندم است.

برای تعیین میزان تلفات دانه گندم در هر یک از تیمارهای برداشت، چهارچوب یک‌دریک مترمربعی به کار گرفته شد. در تمامی موارد، پس از جمع‌آوری دانه‌های ریخته‌شده، مقدار تلفات به کیلوگرم در هکتار تبدیل شد.

عملکرد ناخالص: شامل عملکرد مزرعه قبل از برداشت و افت طبیعی است که از طریق نمونه‌گیری به‌دست‌آمده است (Amiri et al., 2022).

افت طبیعی: قبل از برداشت، چهارچوب در سه نقطه تصادفی مزرعه قرار داده شد و دانه‌های ریخته‌شده روی زمین توزین شد (Amiri et al., 2022; Sheikh Davoodi & Houshyar, 2010).

افت سکوی برش: پس از برداشت، کمباین ۴ متر به عقب بازگردانده شد. چهارچوب در قسمت برداشت‌شده (دور از ریزش عقب) قرار داده شد و دانه‌ها جمع‌آوری و توزین شد. تلفات طبیعی از آن کسر شد. تلفات دروگر خودگردان نیز به همین روش محاسبه شد (Al-Sammarraie & Alhadithi, 2021; Sumner & Williams, 2009).

افت درو نیمه مکانیزه: پس از برداشت دستی، چهارچوب در سه نقطه از منطقه برداشت‌شده قرار داده شد و دانه‌های باقیمانده توزین شد.

وزن به‌دست‌آمده از تلفات طبیعی مزرعه کسر شد (Sedaghat Hosseini et al., 2010).

افت کوبنده: در حین برداشت، کادر توری‌دار سه بار زیر کمباین قرار داده شد. مواد خروجی از الک و کاه‌پران جمع‌آوری شد و توزین دانه‌های حاصل از آن و با تعمیم آن در هکتار، مقدار این افت مشخص شد (Bomoi et al., 2022).

افت خرمن‌کوب: یک کیسه گونی در خروجی کاه خرمن‌کوب قرار داده شد. از کاه خروجی، سه نمونه ۵۰۰ گرمی گرفته شد و دانه‌های مخلوط در آن جداسازی و توزین شد. سپس نسبت به وزن کلی کاه تلفات خرمن‌کوب محاسبه شد (Sedaghat Hosseini et al., 2010).

جدول ۱- معادل انرژی نهاده‌های ورودی و خروجی در تولید گندم.

Table 1. Energy equivalents of inputs and outputs in wheat production.

منبع انرژی Energy source	واحد Unit	معادل انرژی Equivalent Energy (MJ)	منبع Reference
نیروی انسانی Human labor	hr	2.2	(Elhami et al., 2019; Pimentel & Pimentel, 1979)
تراکتور و ماشین‌ها Tractors and machinery	hr	62.7	(Hatirli et al., 2006)
کمباین Combine	hr	148	(Kitani et al., 1999)
سوخت دیزل Diesel fuel	lit	56.3	(Soleymani et al., 2025)
کود اوره Urea fertilizer	kg	76.14	(Yilmaz et al., 2005)
کود فسفات Phosphate fertilizer	kg	13.7	(Soheili-Fard & Salvatian, 2015)
کود پتاس Potassium fertilizer	kg	11.15	(Ordikhani et al., 2021)
کود حیوانی Animal manure	kg	0.3	(Singh, 2002)
آفت‌کش Pesticide	lit	363.6	(Kaab et al., 2019)
قارچ‌کش Fungicide	kg	198	(Yildizhan & Taki, 2018)
علف‌کش Herbicide	kg	120	(Kitani et al., 1999)
آبیاری Irrigation	m^3	1.02	(Yildizhan & Taki, 2018)
الکتریسیته Electricity	kW-hr	12	(Ordikhani et al., 2021)
بذر Seed	kg	25	(Ozkan et al., 2004; Vahedi & Zarifneshat, 2021)
دانه گندم Wheat grain	kg	14.7	(Vahedi & Zarifneshat, 2021)
کاه و کلش Straw and stubble	kg	12.5	(Keikha et al., 2025)

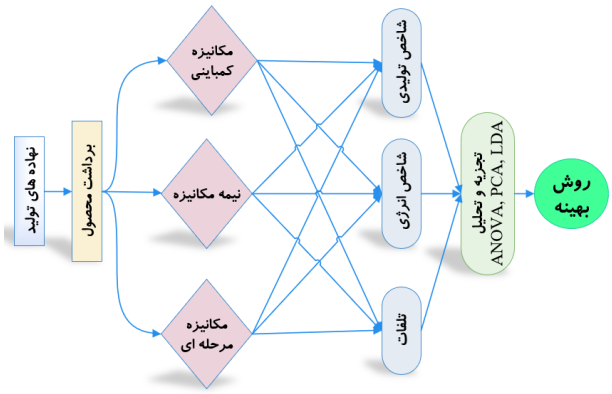
افت واحد بوجاری و کاه‌پران‌ها: شامل دانه‌هایی که از عقب کمباین بیرون می‌ریزند. با جمع‌آوری دانه‌های موجود در قاب توری دار و توزین آن‌ها و تعمیم آن به هکتار مقدار این افت مشخص گردیده است (Al-Sammarraie & Alhadithi, 2021; Sumner & Williams, 2009).

افت جمع‌آوری: پس از جمع‌آوری خوشه‌ها در روش مکانیزه و نیمه‌مکانیزه، چهارچوب در سه نقطه تصادفی قرار داده شد و خوشه‌های ریخته‌شده جمع‌آوری گردید. تلفات طبیعی و تلفات درو از آن کسر شد (Bomoi et al., 2022).

افت کیفی: شامل دانه‌های شکسته شده، ترک برداشته و به‌طورکلی به لحاظ ظاهری آسیب‌دیده در نمونه گرفته‌شده از مخزن کمباین است و بر اساس درصدی از دانه‌های سالم برآورد شد.

تلفات ماشینی: مجموع تلفات دروگر، جمع‌آوری، خرمنکوبی و تلفات کیفی ناشی از عملکرد ماشین است.

در این مطالعه، به منظور انتخاب ماشین‌آلات مورد استفاده، ابتدا نظرات کارشناسان محلی و کشاورزان منطقه جمع‌آوری شد. بر اساس نتایج این بررسی‌ها و همچنین با توجه به فراوانی و کاربرد رایج ماشین‌آلات در منطقه، دروگر گندم فرجی ۶۲۲، خرمنکوب شامه ۲۰۰۰ و کمباین جاندیر ۹۵۵ انتخاب شدند. برای انجام آزمایش‌ها، تنظیمات عملیاتی خرمنکوب، دروگر و کمباین بر اساس مطالعات پیشین تعیین شد. سرعت پیشروی بهینه دروگر و کمباین جاندیر ۹۵۵ معادل ۱/۵ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شد (Ebrahimi-Nik et al., 2008).



شکل ۲- مدل مفهومی انتخاب بهینه روش برداشت گندم.

Fig 2. Conceptual framework for optimal harvesting method selection.

نمونه‌های برداشت‌شده از هر کمباین به‌صورت جداگانه پس از توزین، مقادیر دانه خالص و تلفات اندازه‌گیری و بر اساس آن، عملکرد و درصد تلفات محاسبه شد. در ادامه، میزان تلفات بر مبنای انرژی خروجی ازدست‌رفته محاسبه شد. برای ارزیابی تفاوت‌های آماری بین تیمارهای آزمایشی، از تجزیه واریانس یک‌طرفه (One-Way ANOVA) استفاده شد. در مواردی که نتایج تجزیه واریانس ازنظر آماری معنی‌دار بودند ($P<0.05$)، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ انجام گرفت تا تفاوت‌های مشخص بین گروه‌ها شناسایی شود.

در این مطالعه، ۱۵ متغیر؛ تلفات مراحل مختلف برداشت، شاخص‌های انرژی و عملکردی وارد تحلیل مؤلفه‌های اصلی شدند. به‌منظور افزایش دقت تحلیل و شناسایی الگوهای پنهان در داده‌ها، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis, PCA) برای کاهش ابعاد و استخراج شاخص‌های کلیدی کارایی انرژی و از تحلیل تشخیص خطی (Linear Discriminant Analysis, LDA) برای ارزیابی قدرت تفکیک روش‌های برداشت استفاده شد.

برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی الگوهای کلی درمجموعه داده‌های چندمتغیره شامل تولید کل، تلفات کل دانه، انرژی خالص، بازده انرژی عملی و انرژی تجدیدناپذیر، تحلیل مؤلفه‌های اصلی به کار گرفته شد. چون داده‌ها دارای واحدهای متفاوت بودند داده‌ها نرمال‌سازی شدند. پیش از تحلیل، کفایت نمونه‌گیری و همبستگی متغیرها با آزمون Bartlettو شاخص KMO ارزیابی شد تا اطمینان حاصل شود داده‌ها برای تحلیل مؤلفه‌های اصلی مناسب هستند. مؤلفه‌هایی با Eigen-value>1 انتخاب شدند و محور اول به‌عنوان شاخص کارایی برداشت و مدیریت انرژی تفسیر شد. مؤلفه‌های اصلی استخراج‌شده از PCA ، ترکیبی خطی از همه متغیرهای ورودی بوده و هر مؤلفه نمایانگر ساختار همبستگی نهفته میان گروهی از متغیرهاست. برای انتخاب متغیرهای ورودی به تحلیل تشخیص خطی، از ۱۵ متغیر اولیه، متغیرهایی که در دو مؤلفه نخست PC1 و PC2 دارای بار عاملی مطلق بیشتر از ۰/۸ بودند به عنوان ورودی مدل تحلیل تشخیص خطی انتخاب شدند.

برای طبقه‌بندی تیمارها و ارزیابی قدرت تفکیک متغیرها، تحلیل تشخیص خطی استفاده شد. عملکرد مدل با معیارهای دقت کلی، ضریب کاپای کوهن و AUC ارزیابی شد و توابع تمییز و بیضی‌های اطمینان جداسازی معنادار گروه‌ها را تأیید کردند.

این رویکرد ترکیبی تجزیه واریانس، تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل تشخیص خطی امکان شناسایی متغیرهای اصلی مؤثر بر کارایی برداشت و انرژی و همچنین ارزیابی علمی تفاوت‌های تیمارهای برداشت را فراهم می‌کند (Karimi et al., 2008).

تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار R نسخه ۴.۵.۱ انجام شد. پیش‌پردازش داده‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel 2021 صورت گرفت. سطح معنی‌داری برای تمامی آزمون‌های آماری ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که روش برداشت تأثیر معنی‌داری بر میزان تلفات و شاخص‌های انرژی دارد ($P < 0.01$). در تیمار مکانیزه کمباینی، میانگین تلفات ماشینی ۶/۹ درصد معادل ۳۷۲/۲ kg/ha ثبت شد، در حالی‌که این مقدار در تیمار مکانیزه مرحله‌ای ۱۰.۰۳ درصد با ۵۳۷/۶ kg/ha و در تیمار نیمه‌مکانیزه ۱۰/۷۶درصد با ۵۷۶/۹ kg/ha بود (جدول ۲). همچنین، درو در تیمارمرحله‌ای با ۳/۸ درصد بیشترین تلفات را در بین عملیات مزرعه داشت، در حالی که در تیمار کمباین این مقدار به ۲/۹ درصدکاهش یافت. این نتایج نشان داد که تیمار مکانیزه کمباینی با تنظیم دقیق‌تر، حذف مرحله جمع‌آوری و کاهش تلفات خرمنکوبی، کارآمدترین روش در حفظ دانه در تمام مراحل برداشت است. دلیل افزایش تلفات دانه در تیمار مرحله‌ای و نیمه‌مکانیزه مربوط به طولانی بودن برداشت و تلفات در جمع‌آوری است. این نتایج با یافته‌های Motei et al. (2016) در لرستان تلفات دانه ناشی از کمباین

را ۶/۴۱ درصد گزارش کردند مطابقت دارد. در مقابل، Safari and Rostami (2023) در کردستان میزان تلفات را ۴/۹۲ درصد به دست آوردند که اندکی کمتر از نتایج این مطالعه است. اگرچه تلفات کل در سیستم کمباین (۶/۹ درصد) اندکی بالاتر از محدوده بهینه گزارش‌شده در مطالعات Hazbawi (2026) و Šotnar et al. (2018) با تلفات دانه (۰/۴۹ تا ۵/۲ درصد) است، اما این رقم همچنان در بازه قابل قبول برای کشورهای در حال توسعه و شرایط عملیاتی مزارع کوچک قرار دارد و با یافته‌های Chen et al. (2022) مبنی بر تلفات کلی حدود ۶/۵۸ درصد همسویی دارد. این یافته با روند گزارش‌شده در مطالعات بین‌المللی هم‌راستا است که نشان می‌دهند مکانیزاسیون کامل فرآیند برداشت، تلفات خرمن‌کوبی گندم را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (Aboelasaad et al., 2026; Hasan et al., 2020; Vishwakarma et al., 2020).

جدول ۲- تجزیه واریانس و آزمون دانکن تلفات برداشت گندم (kg/ha)

Table 2. ANOVA and Duncan's multiple range test for wheat harvesting losses (kg ha^{-1}).

P-value	F-value	مکانیزه کمباینی Combine mechanized	مکانیزه مرحله‌ای Staged mechanized	نیم مکانیزه Semi-mechanized	صفت Characteristic (kg/ha)
<0.001**	42.3	154.2(c)	205.6(a)	186.9(b)	تلفات دروگر* Reaper losses
<0.001**	518	0.0(c)	88.9(b)	130.1(a)	تلفات جمع‌آوری Gathering losses
<0.001**	57.4	163.1(c)	195.8(b)	208.8(a)	تلفات خرمنکوبی Threshing losses
0.101ns	2.85	54.9(a)	47.3(a)	51.1(a)	تلفات کیفی Quality losses
<0.001**	312	372.2(c)	537.6(b)	576.9(a)	تلفات ماشینی Machine losses
<0.001**	355.23	4979.4(c)	4820.5(b)	4782.3(a)	تولید گندم Wheat production

* میانگین‌های دارای اندیس مشترک در هر ردیف اختلاف معنی دار آماری ندارند (α<0.05).

** P-value های کمتر از ۰/۰۱ دارای اختلاف معنی در سطح ۱ درصد هستند.

ns: اختلاف معنی دار نیست.

از نظر انرژی، کمترین تلفات انرژی در برداشت کمباینی MJ/ha ۵۴۶۹/۳ بود، درحالی‌که این مقدار در مکانیزه مرحله‌ای به MJ/ha ۷۸۶۴/۷ و در نیمه مکانیزه بیشترین تلفات انرژی به MJ/ha ۸۴۸۵/۱ افزایش یافت (جدول ۳). همچنین بیشترین انرژی خروجی در برداشت کمباینی با مقدار MJ/ha ۷۳۱۹۷/۷ به دست آمد. اما تفاوت‌ها در انرژی خالص نمایان شد. تیمار کمباینی بیشترین و برابر با MJ/ha ۲۶۳۷۱ بود، که با دو تیمار مرحله‌ای MJ/ha ۲۳۰۱۶/۴ و نیمه‌مکانیزه MJ/ha ۲۳۶۲۲/۸ اختلاف معنی‌داری داشته است.

جدول۳- تجزیه واریانس و آزمون دانکن شاخص‌های تولید و انرژی در تولید گندم.

Table 3. ANOVA and Duncan's multiple range test for wheat production and energy indices.

P-value	F-value	مکانیزه کمباینی Combine mechanized	مکانیزه مرحله‌ای Staged mechanized	نیم مکانیزه Semi-mechanized	واحد Unit	صفت Characteristic
<0.001	971.05	5469.3(c)	7864.7(b)	8485.1(a)	MJ/ha	تلفات انرژی Energy losses
<0.001	353.87	73197.7(c)	70813.5(b)	70244.5(a)	MJ/ha	انرژی تولیدی Produced energy
<0.001	1352.93	1.56(a)	1.48(c)	1.51(b)	٪	بازده انرژی Energy efficiency
<0.001	934.16	26371.0(a)	23016.4(c)	23622.8(b)	MJ/ha	انرژی خالص Net energy
<0.001	1361.7	0.106(a)	0.101(c)	0.103(b)	kg/MJ	بهره‌وری انرژی Energy productivity
<0.001	1240.5	7.32(c)	7.08(a)	7.02(b)	MJ/m^2	شدت‌انرژی خروجی Output energy intensity
<0.001	12789.4	9.4(c)	9.92(a)	9.75(b)	MJ/kg	انرژی ویژه Specific energy

بازده انرژی از ۱/۴۸ در تیمار مرحله‌ای به ۱/۵۶ در تیمار مکانیزه کمباینی افزایش یافت و بهره‌وری انرژی از ۰/۱۰۱ kg/MJ به ۰/۱۰۶ رسید ($P<0.001$). شدت انرژی خروجی نیز از ۷/۰۲ MJ/m^2 در تیمار مرحله‌ای به ۷/۳۲ MJ/m^2 در تیمار کمباین افزایش یافت؛ که نشان‌دهنده افزایش ۴/۳ درصدی انرژی قابل برداشت به ازای هر مترمربع زمین است. شاخص انرژی ویژه در تیمار مکانیزه مرحله‌ای ۹/۹۲ و در تیمار کمباینی ۹/۴ مگاژول بر کیلوگرم بود که اختلاف معنی‌داری نشان داد ($P<0.001$). این کاهش معادل ۵/۲۴ درصد بوده و تأیید می‌کند که در تیمار کمباینی، به ازای هر کیلوگرم دانه برداشت‌شده، ۰/۵۲ مگاژول انرژی کمتری مصرف می‌شود. این صرفه‌جویی مستقیماً ناشی از حذف مراحل میانی جمع‌آوری و کاهش ریزش خرمنکوبی و بهبود کارایی انرژی در سیستم برداشت یکپارچه است. در مجموع، نتایج تجزیه واریانس و آزمون دانکن نشان داد که مکانیزاسیون کامل با کاهش چشمگیر تلفات و افزایش کارایی، بهره‌وری کل مراحل برداشت را به‌شکل معنی‌داری ارتقا می‌بخشد. نتایج حاصله نشان داد که بهبود شاخص‌های انرژی در مقایسه با کاهش تلفات فیزیکی، از کشش بسیار کمتری برخوردار است. اگرچه تیمار کمباینی کاهش ۳۵/۵ درصدی تلفات انرژی را نسبت به نیمه‌مکانیزه نشان می‌دهد، اما افزایش بازده انرژی تنها ۵/۴ درصد است. این فاصله معنادار بین کاهش تلفات و افزایش بازده، بیانگر آن است که بخش قابل‌توجهی از انرژی ورودی در هر سه سیستم به‌طور ثابت صرف عملیات مشترک (مانند خاک‌ورزی و کاشت) می‌شود که تحت تأثیر روش برداشت قرار نمی‌گیرد. از این رو، مزیت اصلی کمباین نه در کاهش انرژی ورودی، بلکه در جلوگیری از هدررفت انرژی انباشته‌شده در دانه خلاصه می‌شود. نتایج حاضر با مطالعه‌ی Moitzi et al. (2019) در اروپا و Rostami et al. (2018) در ایران هم‌راستا بود که گزارش کردند مکانیزاسیون کامل علاوه بر کاهش تلفات محصول، از طریق یکپارچه‌سازی عملیات سبب کاهش مصرف سوخت در مرحله برداشت می‌گردد. این بهبود ناشی از حذف ترددهای اضافی ماشین‌آلات و کاهش زمان عملیات است.

نتایج آزمون بارتلت ۱۲۶/۴ و شاخص KMO با ۰/۷۳ (جدول ۴) نشان داد داده‌ها برای تحلیل مؤلفه‌های اصلی مناسب هستند. دو مؤلفه نخست در مجموع ۸۳/۱ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کردند (جدول۵).

جدول ۴- نتایج آزمون‌های Bartlett و KMO

Table 4. Results of the Bartlett and KMO tests.

آزمون Test	آماره Statistic	Df	p-value
Bartlett Test of Sphericity	126.4	45	$< 0.0001^{*}$
Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)	0.73^{**}	-	-

*: P-value های کمتر از ۰.۰۱ دارای اختلاف معنی در سطح ۱ درصد هستند.

** : مقدار KMO > 0.6 نشان‌دهنده کفایت نمونه‌برداری در سطح قابل قبول است.

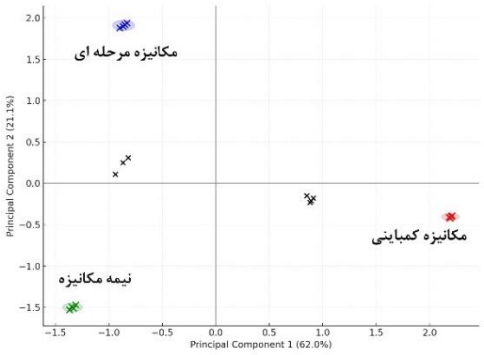
جدول ۵- نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی

Table 5. Principal component analysis results.

مؤلفه Component	مقدار ویژه (Eigenvalue)	درصد واریانس Variance percentage	واریانس تجمعی Cumulative variance
PC1	8.06	62.0	62.0
PC2	2.74	21.1	83.1
PC3	0.98	7.5	90.6

فاکتور کارایی با بارهای ۰/۹۱+ بر انرژی خالص، ۰/۸۹+ بر بازده عملی و ۰/۹۴- بر تلفات انرژی برداشت، تمایز کاملی بین روش‌های برداشت ایجاد کرد. نمودار بای‌پلات (شکل۳) نشان داد که دو مؤلفه اصلی نخست PC1 و PC2 در مجموع ۸۳/۱ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کردند و جدایی آشکار تیمارها در فضای دوبعدی بیانگر برتری برداشت تیمار مکانیزه کمباینی در شاخص‌های انرژی و عملکرد نسبت به تیمار مکانیزه مرحله‌ای و نیمه مکانیزه است.

این نتایج به‌وضوح نشان داد که مکانیزاسیون کامل نه‌تنها تلفات کل دانه را کاهش می‌دهد، بلکه با بهینه‌سازی توزیع انرژی در مراحل برداشت، بهره‌وری کل سیستم را به‌شکل معنی‌داری ارتقا می‌بخشد. این الگو با نتایج Moitzi et al. (2019) و Rostami et al. (2018) همخوان است که گزارش کردند مکانیزاسیون کامل باعث کاهش معنی‌دار تلفات و افزایش بازده انرژی در گندم می‌شود.



شکل ۳- پراکنش و جداسازی تیمارها بر اساس مؤلفه‌های اصلی.

Fig 3. Distribution and separation of harvesting treatments based on the principal components

یافته‌های تحلیل تفکیک خطی (جدول ۶) مؤید نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی بود. آزمون ویلکز ۰/۰۴۲ در سطح ($p < 0.001$) نشان داد تنها تابع اول (LD1) معنادار است و ۸۹/۲٪ واریانس بین‌تیماری را توضیح می‌دهد (جدول ۷). LD1 همبستگی مثبت قوی با انرژی خالص (۰/۹۱+)، بازده انرژی عملی (۰/۸۹+) و همبستگی منفی با تلفات انرژی برداشت (۰/۹۴) داشت.

جدول ۶ - پیش‌فرض‌ها و معناداری توابع تمییز.

Table 6. Assumptions and significance of discriminant functions.

آزمون Test	آماره Statistic	Df	p-value
Wilks' Λ (LD1&2)	0.042	20	<0.001
Wilks' Λ (LD2)	0.505	9	0.160

جدول ۷- اطلاعات مؤلفه‌ها و بارهای تمییز.

Table 7. Components and discriminant loadings information.

مؤلفه Component	مقدار ویژه (Eigenvalue)	واریانس Variance %	Canonical Correlation
LD1	8.06	89.2	0.94
LD2	0.98	10.8	0.70

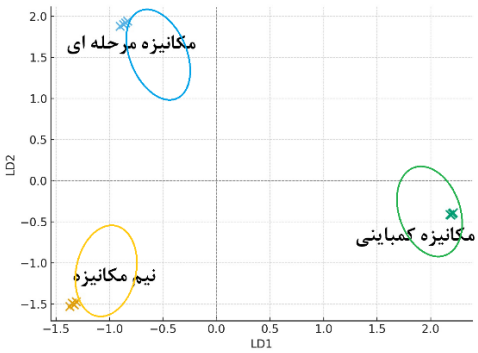
شکل ۴ نیز با بیضی‌های ۹۵٪ اطمینان نشان می‌دهد که تیمارها به‌خوبی در فضای LD1 و LD2 از یکدیگر تفکیک شده‌اند و هر کدام در یک ربع مجزا خوشه‌بندی شده‌اند. متغیرهایی با بار مثبت مانند انرژی خالص و انرژی خروجی در تمایز تیمار کمباینی نقش دارند، در حالی‌که شاخص‌هایی با بار منفی مانند تلفات انرژی برداشت بیشتر با تیمار نیمه مکانیزه مرتبط هستند. فاصله ماهلانوبیس زیاد و هم‌پوشانی ناچیز بیانگر تفکیک قوی خطی و برتری معنی‌دار مکانیزاسیون کامل در مدیریت انرژی است. شاخص‌های اعتبارسنجی مدل (جدول ۸) با دقت (۹۱/۷ درصد)، Kappa (۰/۸۸) و AUC (۹۴/۲ درصد) نشان دادند.

جدول ۸- شاخص‌های اعتبارسنجی تحلیل تشخیص خطی.

Table 8. Validation metrics of the LDA model

شاخص Indicator	مقدار Value
Accuracy	91.7%
Kappa (CI 95%)	0.88 (0.69 -1.00)
MCC	0.87
میانگین AUC	94.2%
خطا (LOOCV)	1 نمونه (مرحله‌ای→نیمه مکانیزه)

بنابراین، مکانیزاسیون کامل به‌واسطه بهینه‌سازی توزیع انرژی مراحل برداشت، کارایی کل سیستم را به‌طور معنی‌داری ارتقا می‌بخشد. این نتایج با یافته‌های Rajak et al. (2022) که نشان داد استفاده از کمباین‌های تنظیم‌شده و مناسب می‌تواند تلفات دانه را در مقایسه با روش‌های کمتر مکانیزه به‌طور معنی‌داری کاهش دهد همسو است. همچنین کاهش معنی‌دار تلفات محصول و افزایش بازده انرژی در برداشت روش کمباینی نسبت به روش‌های مکانیزه مرحله‌ای و نیمه‌مکانیزه را گزارش داد.



شکل ۴- مرزبندی و تفکیک تیمارها بر اساس توابع تمییز.

Fig 4. Separation of harvesting treatments based on the linear discriminant functions.

به‌طورکلی، نتایج تلفیقی سه رویکرد آماری تجزیه واریانس، تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل تشخیص خطی همگرا نشان دادند که تیمار برداشت مکانیزه کمباینی با برتری معنادار نسبت به تیمارهای مکانیزه مرحله‌ای و نیمه‌مکانیزه، ضمن کاهش تلفات دانه و انرژی، بازده انرژی و بهره‌وری را ارتقا می‌دهد. این نتایج با یافته‌های خارجی Imran and Ozcatalbas (2021) و داخلی Bazvand et al. (2016) و همخوانی دارد. بر این اساس، توصیه می‌شود توسعه مکانیزاسیون کامل برداشت در مناطق مشابه در دستور کار قرار گیرد. همچنین، مطالعات آینده می‌تواند اثرات مقیاس مزرعه، مدل‌های مختلف کمباین و شرایط اقلیمی متفاوت را بر کارایی انرژی و میزان تلفات ارزیابی کند.

از محدودیت‌های این مطالعه می‌توان اجرای پژوهش در یک سال زراعی و شرایط اقلیمی خاص منطقه مریوان اشاره کرد. بنابراین، تعمیم نتایج به سایر مناطق نیازمند تحقیقات تکمیلی در مقیاس‌های بزرگ‌تر و در شرایط اقلیمی متنوع است.

سپاس‌گزاری

نویسندگان صمیمانه از مهندسان و کارشناسان سازمان جهاد کشاورزی مریوان و شرکت جوتیاران زاگرس به‌خاطر همکاری در عملیات میدانی و جمع‌آوری داده‌ها سپاسگزاری می‌کنند. کمک‌های فنی و پشتیبانی لجستیکی آنان نقش اساسی در تکمیل موفقیت‌آمیز این پژوهش داشت.

منابع

Abdalla, O. A., Dahab, M. H., Musa, M. M., & Babikir, E. S. N. (2021). *Influence of Combine Harvester Forward and Reel Speeds on Wheat Harvesting Losses in Gezira Scheme (Sudan). International* Journal of Scientific Advances, 2(2), 177–182. https://doi.org/10.51542/ijscia.v2i2.17

Aboelasaad, G., Pari, L., Brambilla, M., Bergonzoli, S., Cozzolino, L., Ceglie, F. G., Elkot, A. F., Shaban, Y., & Morgan, H. (2026). *Evaluation of Different Mechanized Wheat Harvesting Systems in Egypt: Case Study Within the EU KAFI Programme*. AgriEngineering, 8(3), 87. https://doi.org/10.3390/agriengineering8030087

Al-Sammarraie, M. A. J., & Alhadithi, S. A. (2021). *Determination of Grain Losses on Combine Harvester*. J. Sci. Eng. Res, 8, 196–202.

Alhajj Ali, S., Tedone, L., & De Mastro, G. (2013). *A comparison of the energy consumption of rainfed durum wheat under different management scenarios in southern Italy*. Energy, 61, 308–318. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.028

Amiri, H., Asakereh, A., & Soleymani, M. (2022). *Economic Analysis and Evaluation of Grain Losses of Two Common Straw Collecting Combine Harvester: A Case Study, Azna County, Lorestan, Iran*. Journal of Agricultural Machinery, 12(4), 613–626. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jam.2021.70758.1045

Andriani, L., & Kusrini, N. (2025). *Losses in Each Stage of Rice Harvest and Postharvest.* Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 30(1), 85–98. https://doi.org/10.18343/jipi.30.1.85

Anonymous. (2024). *Agricultural Statistics Yearbook: Volume 1*, Crop Products 2023-2024. M. o. Agriculture-Jihad. (In Persian).

Bazvand, Z., Nouri, S., Behrouzi Lar, M., & Yari, R. (2016). *Investigation of Forward Speed and Cutting Height of Two Types of Combine Harvesters (John Deere 955 and K130) for Wheat Harvesting BT* - 5th National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources. Tehran. (In Persian).

Bomoi, M. I., Mat Nawi, N., Abd Aziz, S., & Mohd Kassim, M. S. (2022). *Sensing Technologies for Measuring Grain Loss during Harvest in Paddy Field: A Review.* AgriEngineering, 4(1), 292–310. https://doi.org/10.3390/agriengineering4010020

Calicioglu, O., Flammini, A., Bracco, S., Bellù, L., & Sims, R. (2019). *The future challenges of food and agriculture: An integrated analysis of trends and solutions*. Sustainability, 11(1), 222–222. https://doi.org/10.3390/su11010222

Chen, X., He, X., Wang, W., Qu, Z., & Liu, Y. (2022). *Study on the technologies of loss reduction in wheat mechanization harvesting: a review*. Agriculture, 12(11), 1935–1935. https://doi.org/10.3390/agriculture12111935

Dehghan, E., & Eyvani, A. (2019). *Assessment and Spatial Analysis of Combine Harvester Wheat Losses in Iran BT* - 12th National Congress on Biosystem Mechanical Engineering and Mechanization of Iran. Ahvaz. (In Persian).

Ebrahimi-Nik, M. A., Khadem-Hosseini, N., Mahdinia, A., & Kazemi, N. (2008). *Effect of ground speed and effective header width on wheat losses in JD 955 combine*. Iran. (In Persian).

Elhami, B., Raini, M. G. N., & Soheili-Fard, F. (2019). *Energy and environmental indices through life cycle assessment of raisin production: A case study (Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province, Iran).* Renewable Energy, 141, 507–515. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.034

Erenstein, O., Jaleta, M., Mottaleb, K. A., Sonder, K., Donovan, J., & Braun, H.-J. (2022). *Global trends in wheat production, consumption and trade*. In (pp. 47–66). Springer International Publishing Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90673-3_4

Erkan, M., & Dogan, A. (2019). *Harvesting of horticultural commodities*. In (pp. 129–159). Elsevier.

FAO. (2023). Sustainable Agricultural Mechanization http://www.fao.org

Farshad, L., Durban Astana, A., & Pourahmad, A. (2022). *Analysis of the Role of the Mental Image of the Destination Brand in Tourism Development, Case Study: Marivan City.* urban tourism, 9(1), 49–65. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jut.2022.332215.965

Filenko, G. A., Firsova, T. I., & Skvortsova, Y. G. (2018). *Grain loss during winter wheat harvesting*. Зерновое хозяйство России(1), 28–32.

Govindaraj, M., Masilamani, P., Asokan, D., Rajkumar, P., & Selvaraju, P. (2017). *Effect of different harvesting and threshing methods on harvest losses and seed quality of rice varieties.* International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 6(9), 1510–1520. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.609.184

Hasan, K., Tanaka, T. S., Alam, M., Ali, R., & Saha, C. K. (2020). *Impact of modern rice harvesting practices over traditional ones*. Reviews in Agricultural Science, 8, 89–108. https://doi.org/10.7831/ras.8.0_89

Hatirli, S. A., Ozkan, B., & Fert, C. (2006). *Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production.* Renewable Energy, 31(4), 427–438. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.04.007

Hazbawi, I. (2026). *Modeling and Optimization of Grain Loss in the Threshing, Separation and Cleaning (TSC) Unit of a Straw-Chopper Combine Harvester Using Response Surface Methodology*. Results in Engineering, 110861–110861. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110861

Husaini, Ardiansyah, R., Ismail, M., & Andriani, R. (2021). *Feasibility analysis of traditional rice farming with combine harvester in Teureubeh Village, Aceh Besar District*. In E3S Web of Conferences (Vol. 306, p. 02044). EDP Sciences.

Imran, M., & Ozcatalbas, O. (2021). *Optimization of energy consumption and its effect on the energy use efficiency and greenhouse gas emissions of wheat*

production in Turkey. Discover Sustainability, 2(1), 28–28. https://doi.org/10.1007/s43621-021-00035-w

Kaab, A., Sharifi, M., Mobli, H., Nabavi-Pelesaraei, A., & Chau, K.-w. (2019). *Use of optimization techniques for energy use efficiency and environmental life cycle assessment modification in sugarcane production*. Energy, 181, 1298–1320. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.002

Karimi, M., Beheshti Tabar, I., & Khubbakht, G. M. (2008). *Energy production in Iran's agronomy*. Am. Eurasian J. Agric. Environ. Sci, 4(2), 172–177.

Keikha, A., Parashkoohi, M. G., Mohammadi, A., & Afshari, H. (2025). *Comparing mechanization systems for regression model based crop production under different tillage systems*. Results in Engineering, 25, 104056–104056. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104056

Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M., Yousefi, M., & Movahedi, M. (2013). *Modeling of energy consumption and GHG (greenhouse gas) emissions in wheat production in Esfahan province of Iran using artificial neural networks*. Energy, 52, 333–338. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.028

Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). *CIGR handbook of agricultural engineering* (Vol. 5). American Society of Agricultural Engineers.

Kumar, D., & Kalita, P. (2017). *Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries*. Foods, 6(1), 8. https://doi.org/10.3390/foods6010008

Kumar, N., Bhunia, S., & Dey, P. (2024). *Data envelopment analysis and multi-objective genetic algorithm based optimization of energy consumption and greenhouse gas emissions in rice-wheat system*. Energy, 313, 133680–133680. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133680

Menzel, A., Egli, L., & Gross, A. (2025). *Energy-efficiency of community supported agriculture farms and conventional vegetable production*. Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1490652–1490652. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1490652

Mirasi, A., Asoodar, M. A., Samadi, M., & Kamran, E. (2014). *The evaluation of wheat losses harvesting in two conventional combine (John Deere 1165, 955) in Iran*. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research, 2(5), 1417–1425.

Mohammadi, A., Tabatabaeefar, A., Shahan, S., Rafiee, S., & Keyhani, A. (2008). *Energy use and economical analysis of potato production in Iran a case study: Ardabil Province*. Energy Conversion and Management, 49, 3566–3570. https://doi.org/doi:10.1016/j.enconman.2008.07.003

Moitzi, G., Neugschwandtner, R. W., Kaul, H.-P., & Wagentristl, H. (2019). *Energy efficiency of winter wheat in a long-term tillage experiment under Pannonian climate conditions*. European Journal of Agronomy, 103, 24–31. https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.11.002

Mostashari-Rad, F., Ghasemi-Mobtaker, H., Taki, M., Ghahderijani, M., Saber, Z., Chau, K.-W., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2020). *Data supporting midpoint-weighting life cycle assessment and energy forms of cumulative exergy demand for horticultural crops*. Data in brief, 33, 106490–106490. https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106490

Motei, M. R., Shahbazi, F., & Hazbavi, I. (2016). *Five-Year Study on the Impact of Various Factors on Wheat Dryland Losses During Harvest with Combine*. Mashhad, Iran. (In Persian).

Ordikhani, H., Parashkoohi, M. G., Zamani, D. M., & Ghahderijani, M. (2021). *Energy-environmental life cycle assessment and cumulative exergy demand analysis for horticultural crops (Case study: Qazvin province)*. Energy Reports, 7, 2899–2915. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.017

Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). *Energy input–output analysis in Turkish agriculture*. Renewable Energy, 29(1), 39–51. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6

Pimentel, D., & Pimentel, M. (1979). *Food, Energy and Society*. Edward Arnold.

Platis, D. P., Menexes, G. C., Anagnostopoulos, C. D., Tsaboula, A. D., Kalburtji, K. L., & Mamolos, A. P. (2025). *Assessing agricultural sustainability: analysis of energy use, carbon and water footprint to maintain ecosystem services in Larissa, Greece*. Energy, Ecology and Environment, 10, 607–622. https://doi.org/10.1007/s40974-025-00374-8

Rajak, D., Immanuel, G., & Jat, R. (2022). *Assessment of losses in harvesting and threshing by manual method for wheat and maize crop in Samastipur district, Bihar, India*. International Journal of Economic Plants, 9(4), 281–285. http://dx.doi.org/10.23910/2/2022.IJEP0482b

Rostami, S., Lotfalian, M., & Hosseinzadeh-Samani, B. (2018). *Assessment and Comparison of Conventional and Straw Walker Combines Harvesting Losses in Fars Province.* Agricultural Mechanization and Systems Research, 19(70), 85–96. (In Persian). https://doi.org/10.22092/erams.2018.107988.1140

Safari, M., & Rostami, M. A. (2023). *Comparison of Dry Land Wheat Grain Harvest Losses in Different Types of Chaff Collector Combine Harvesters in Kurdistan Province*. Journal of Agricultural Machinery, 13(3), 309–319. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jam.2022.75175.1091

Salehi, M. (2023). *Energy Balance in Dryland Wheat Production in Mountainous Regions BT* - 10th National Conference on Modern Studies and Research in the Field of Biology and Natural Sciences in Iran.

Sattar, M., Din, M., Ali, M., Ali, L., Waqar, M. Q., Ali, M. A., & Khalid, L. (2015). *Grain losses of wheat as affected by different harvesting and threshing techniques*. International Journal of Research in Agriculture and Forestry, 2 (6), 20–26.

Sedaghat Hosseini, S. M., Korang Beheshti, A. M., & Farzaneh, Y. (2010). *Comparison of Losses in Different Methods of Harvesting Irrigated Wheat in Miandoab County*. Ahvaz, Iran. (In Persian).

Shahbazi, F., Shahbazi, S., Nadimi, M., & Paliwal, J. (2025). *Losses in agricultural produce: A review of causes and solutions, with a specific focus on grain crops.* Journal of Stored Products Research, 111, 102547–102547. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102547

Sharifi, Z., Nazari, C., Mohammadi Samani, K., & Shabanian, N. (2017). *Effects of a Wildfire on Some Soil Properties in Northeran Zagros Oak Forest (Case Study: Marivan Region).* Water and Soil Science, 27(1), 1–16. (In Persian).

Sheikh Davoodi, M. J., & Houshyar, E. (2010). *Evaluation of Wheat Losses Using New Holland Combine Harvester in Iran.* American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 8(1), 104–108.

Singh, J. M. (2002). *On farm energy use pattern in different cropping systems in Haryana*, India

Soheili-Fard, F., & Salvatian, S. B. (2015). *Forecasting of tea yield based on energy inputs using artificial neural networks (a case study: Guilan province of Iran)*. Biological Forum – An International Journal, 7(1), 1432–1432.

Soleymani, M., Asakereh, A., & Safaeinejad, M. (2025). *Optimization of Cumulative Energy, Exergy Consumption and Environmental Life Cycle Assessment Modification of Corn Production in Lorestan Province, Iran*. Journal of Agricultural Machinery, 15(1), 23–46. https://doi.org/10.22067/jam.2024.86234.1221

Šotnar, M., Pospíšil, J., Mareček, J., Dokukilová, T., & Novotný, V. (2018). *Influence of the combine harvester parameter settings on harvest losses.* Acta technologica agriculturae, 21(3), 105–108. https://doi.org/10.2478/ata-2018-0019

Sumner, P. E., & Williams, E. J. (2009). *Measuring field losses from grain combines*. University of Georgia, Bulletin 9.

Taghinazhad, J., & Jabraeil, V. (2021). *Energy Consumption Modeling and Sensitivity Analysis of Energy Inputs for Irrigated Wheat Production: Case Study: Ardabil Province.* Journal of Agricultural Mechanization, 6(4), 11–19. (In Persian). https://doi.org/10.22034/jam.2022.14202

Tihanov, G., Dallev, M., Hristova, G., & Mitkov, I. (2021). *Loss of grain at harvesting wheat with a combine harvester.* Scientific Papers. Series A. Agronomy, 64 (1), 345–350.

Ulukan, H. (2024). *Wheat Production Trends and Research Priorities: A Global Perspective BT - Advances in Wheat Breeding : Towards Climate Resilience and Nutrient Security*. In N. Zencirci, F. Altay, F. S. Baloch, M. A. Nadeem, & N. Ludidi (Eds.), (pp. 1–22). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9478-6_1

Vahedi, A., & Zarifneshat, S. (2021). *Evaluation Energy Flow and Analysis of Energy Economy for Irrigated Wheat Production in Different Geographical Regions of Iran.* Journal of Agricultural Machinery, 11(2), 505–523. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jam.v11i2.81747

Van Loon, J., Woltering, L., Krupnik, T. J., Baudron, F., Boa, M., & Govaerts, B. (2020). *Scaling agricultural mechanization services in smallholder farming systems: Case studies from sub-Saharan Africa, South Asia, and Latin America*. Agricultural Systems, 180, 102792–102792. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102792

Vishwakarma, R., Jha, S., Dixit, A. K., Rai, A., & Ahmad, T. (2020). *Estimation of harvest and post-harvest losses of cereals and effect of mechanisation in different agro-climatic zones of India*. Indian Journal of Agricultural Economics, 75(3), 317–336. https://doi.org/10.22004/ag.econ.345134

Yildizhan, H., & Taki, M. (2018). *Assessment of tomato production process by cumulative exergy consumption approach in greenhouse and open field conditions: Case study of Turkey.* Energy, 156, 401–408. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.117

Yilmaz, I., Akcaoz, H., & Ozkan, B. (2005). *An analysis of energy use and input costs for cotton production in Turkey*. Renewable Energy, 30(2), 145–155. https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.06.001

Yue, J., Yao, Y., Shen, J., Li, T., Xu, N., Feng, H., Wei, Y., Xu, X., Lin, Y., & Guo, W. (2025). *Winter wheat harvest detection via Sentinel-2 MSI images*. International Journal of Remote Sensing, 1–19. https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2452318

Zentner, R. P., Lafond, G. P., Derksen, D. A., Nagy, C. N., Wall, D. D., & May, W. E. (2004). *Effects of tillage method and crop rotation on non-renewable energy use efficiency for a thin Black Chernozem in the Canadian prairies*. Soil and Tillage Research, 77. https://doi.org/10.1016/j.still.2003.11.002