Performance Evaluation and Ranking of Rice Combine Harvesters Using an Integrated FAHP–TOPSIS Approach

ABSTRACT

Mechanized rice harvesting is a critical stage of rice production, and selecting a combine harvester is a multi-criteria decision-making problem due to differences among models in technical performance, energy consumption, and harvesting quality. This study aimed to evaluate and rank 17 rice combine harvester models using an integrated multi-criteria decision-making approach based on the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Six criteria, including effective field capacity, field efficiency, fuel consumption per unit area, total harvest loss, paddy purity, and paddy grain breakage, were used to evaluate the combine harvesters. The criteria weights were determined using FAHP based on the judgments of 20 experts, they were ranked using TOPSIS. Among the six selected criteria, total harvest loss received the highest relative weight (0.3563) based on expert judgments. Based on TOPSIS, the 4LZ-4.0Z combine harvester ranked first with a closeness coefficient of 0.83589. Sensitivity analysis involving a relative change of ±10% in each criterion weight showed that this model maintained its first rank across scenarios, indicating the stability of the ranking. An assessment of ranking robustness using VIKOR showed that the top four models had identical ranks in both methods, while the Spearman rank correlation coefficient between TOPSIS and VIKOR rankings was 0.90196, indicating a high level of agreement between the two methods. Overall, the integrated FAHP–TOPSIS framework can provide an appropriate approach for the evaluation and comparison of rice combine harvesters based on technical, energy, and quality criteria.

Keywords:

Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), Machine performance evaluation, Multi-Criteria Decision Making (MCDM), Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS).

بازنگاری نشده

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rice combine harvester performance involves multiple and potentially conflicting criteria, including field capacity, field efficiency, fuel consumption, harvesting losses, and grain quality. Therefore, evaluating combine harvesters based on a single performance indicator may not adequately reflect their overall performance. An integrated multi-criteria approach can provide a more comprehensive basis for comparing alternative machines by simultaneously considering technical, operational, and qualitative criteria. This study aimed to evaluate and rank 17 rice combine harvester models using an integrated FAHP–TOPSIS framework. Six criteria were considered: effective field capacity, field efficiency, fuel consumption per unit area, total harvesting loss, paddy purity, and broken paddy. FAHP was used to determine criterion weights based on expert judgments, and TOPSIS was applied to rank the alternatives. Sensitivity analysis and VIKOR were additionally used to assess the robustness and agreement of the ranking results.

Method

Performance data for 17 rice combine harvester models were obtained from official technical, field-performance, and quality test reports conducted in different years, fields, and rice varieties. Six comparable criteria were selected: effective field capacity (C1), field efficiency (C2), fuel consumption per unit area (C3), total harvesting loss (C4), paddy purity (C5), and broken paddy (C6). C1, C2, and C5 were treated as benefit criteria, whereas C3, C4, and C6 were considered cost criteria. Criterion weights were determined using FAHP based on pairwise comparisons provided by 20 purposively selected experts in agricultural mechanization and related fields. Expert judgments were represented by triangular fuzzy numbers and aggregated using the arithmetic mean. Fuzzy weights were calculated, defuzzified using the centroid method, and normalized. The consistency of the fuzzy pairwise comparisons was assessed using the Gogus–Boucher procedure. The FAHP weights were then incorporated into TOPSIS. The decision matrix was vector-normalized, weighted, and evaluated against the positive and negative ideal solutions. The relative closeness coefficient (CC_i) was calculated for each model, and the alternatives were ranked in descending order of CC_i. For descriptive interpretation, the observed CC_i range was divided into five equal intervals representing very high to very low relative performance. Ranking robustness was assessed through sensitivity analysis by independently varying each criterion weight by ±10%, followed by weight renormalization and repetition of TOPSIS. Finally, VIKOR was applied using the same decision matrix and FAHP weights, with $v = 0.5$. The S_i, R_i, and Q_i indices and the acceptable advantage and stability conditions were evaluated. Agreement between the TOPSIS and VIKOR rankings was assessed using Spearman's rank correlation coefficient.

Results

The FAHP results showed clear differences in the relative importance of the six criteria. Total harvesting loss (C4) received the highest weight (0.3563), followed by effective field capacity (C1; 0.2039) and broken paddy (C6; 0.1643), together accounting for approximately 72% of the total weight. Fuel consumption per unit area (C3), paddy purity (C5), and field

نمونه پذیرفته شده

efficiency (C2) received weights of 0.1158, 0.0907, and 0.0690, respectively. The aggregated fuzzy pairwise comparison matrix showed acceptable consistency. TOPSIS ranked 4LZ-4.0Z first among the 17 combine harvester models, with a closeness coefficient of 0.83589, followed by 4LZ-5.0, 4LZ-4.6, TH750C, and 4LZ-2.5. Based on the equal-interval classification of relative performance, 10 models (58.82%) were classified as high or very high, six models (35.29%) as medium, and one model (5.88%) as very low. No model fell within the low-performance interval. The first-ranked model maintained its position across all 12 sensitivity scenarios, with its closeness coefficient ranging from 0.82321 to 0.84890. The top four models received identical rankings under TOPSIS and VIKOR, and the Spearman rank correlation coefficient was 0.90196, indicating strong agreement between the two methods.

Conclusions

The integrated FAHP–TOPSIS framework enabled a comprehensive evaluation of rice combine harvesters by simultaneously considering multiple performance criteria. The results indicated that harvesting loss and grain damage, together with operational capacity, are important in overall performance assessment. Among the 17 evaluated models, 4LZ-4.0Z achieved the highest relative priority, and its leading position remained stable under the sensitivity scenarios and was supported by the VIKOR results. The rankings should be interpreted as relative comparisons within the evaluated models, criteria, expert-derived weights, and available performance data rather than as evidence of absolute superiority under all operating conditions. Future studies should evaluate combine harvesters under uniform field and crop conditions and incorporate economic, reliability, maintenance, and environmental criteria to provide a more comprehensive basis for machinery selection.

ویرایشگری نشده

ارزیابی و رتبه‌بندی عملکرد کمباین‌های برداشت برنج با استفاده از روش ترکیبی FAHP–TOPSIS

چکیده

برداشت مکانیزه برنج یکی از مراحل حساس تولید این محصول است و انتخاب کمباین مناسب به دلیل تفاوت مدل‌ها از نظر عملکرد فنی، مصرف انرژی و کیفیت برداشت، یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌شود. هدف از این پژوهش، ارزیابی و رتبه‌بندی عملکرد ۱۷ مدل کمباین برداشت برنج با استفاده از یک رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) و تکنیک رتبه‌بندی بر اساس تشابه با راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) بود. در این پژوهش، شش معیار شامل ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، راندمان مزرعه‌ای، مصرف سوخت سطحی، تلفات کل برداشت، خلوص شلتوک و شکستگی شلتوک برای ارزیابی مدل‌های کمباین مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا وزن معیارها با روش FAHP و بر اساس قضاوت ۲۰ خبره تعیین و سپس کمباین‌ها با روش TOPSIS رتبه‌بندی شدند. در شش معیار، تلفات کل برداشت با وزن ۰/۳۵۶۳ بیشترین اهمیت را نزد خبرگان داشت. بر اساس رتبه‌بندی TOPSIS، کمباین مدل 4LZ-4.0Z با ضریب نزدیکی ۰/۸۳۵۸۹ رتبه نخست را به دست آورد. تحلیل حساسیت با تغییر ۱۰± درصدی وزن هر معیار نشان داد که این مدل در تمامی سناریوها رتبه نخست خود را حفظ کرد که بیانگر پایداری رتبه‌بندی بود. بررسی استحکام نتایج با روش راه‌حل سازشی چندمعیاره (VIKOR) نیز نشان داد که چهار مدل نخست در هر دو روش رتبه‌های یکسانی داشتند و ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن بین رتبه‌بندی‌های TOPSIS و VIKOR برابر ۰/۹۰۱۹۶ بود که بیانگر توافق بالای آنهاست. در مجموع، چارچوب ترکیبی FAHP–TOPSIS می‌تواند رویکردی مناسب برای ارزیابی جامع و مقایسه کمباین‌های برداشت برنج بر اساس معیارهای فنی، انرژی و کیفی فراهم کند.

کلیدواژه‌ها:

ارزیابی عملکرد ماشین، تصمیم‌گیری چندمعیاره، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تکنیک شباهت به گزینه ایده‌آل.

ستاری نشده

مقدمه

برنج (*Oryza sativa L.*) یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی جهان بوده و نقش اساسی در تأمین امنیت غذایی جوامع دارد. در ایران، تولید برنج عمدتاً در استان‌های شمالی کشور، به‌ویژه گیلان و مازندران، متمرکز است. مرحله برداشت به دلیل محدودیت زمانی، تأثیر مستقیم بر مقدار محصول قابل استحصال، حساسیت شلتوک به ریزش و کاهش کیفیت محصول، یکی از مراحل بحرانی تولید برنج محسوب می‌شود. شرایط نامساعد آب‌وهوایی پایان فصل، تأخیر در برداشت و وابستگی زیاد به نیروی انسانی از مهم‌ترین چالش‌های برداشت برنج هستند؛ ازاین‌رو توسعه مکانیزاسیون برداشت و استفاده از ماشین‌های مناسب اهمیت ویژه‌ای دارد (حسن‌جانی و همکاران، ۱۳۸۶؛ Kyani et al., 2025).

کمباین‌های برداشت برنج با انجام هم‌زمان عملیات برش، انتقال، کوبش، جداسازی و تمیزکردن، نقش مهمی در کاهش زمان برداشت، کاهش نیاز به نیروی کار و کنترل ضایعات دارند. با این حال، عملکرد یک کمباین را نمی‌توان تنها بر اساس ظرفیت کاری ارزیابی کرد؛ زیرا عملکرد واقعی ماشین حاصل تعامل مجموعه‌ای از شاخص‌های فنی، عملیاتی و کیفی شامل ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، راندمان مزرعه‌ای، مصرف سوخت، تلفات برداشت، خلوص شلتوک و شکستگی دانه است. بنابراین، مقایسه کمباین‌های برداشت برنج باید بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی انجام شود، زیرا برتری یک ماشین در یک شاخص الزاماً به معنی عملکرد بهتر آن در سایر شاخص‌ها نیست (Kyani et al., 2025; Wagiman et al., 2019).

با وجود مطالعات انجام‌شده، بیشتر پژوهش‌های پیشین بر مقایسه مستقیم تعداد محدودی ماشین یا بررسی یک یا چند شاخص منفرد تمرکز داشته‌اند؛ در حالی که انتخاب کمباین مناسب ماهیتی چندمعیاره دارد، زیرا معیارهای ارزیابی دارای واحدهای اندازه‌گیری متفاوت بوده و اهمیت آنها نیز یکسان نیست. برای مثال، افزایش ظرفیت برداشت ممکن است با افزایش مصرف سوخت یا کاهش کیفیت محصول همراه باشد. بنابراین، نیاز به چارچوبی وجود دارد که بتواند معیارهای مختلف را به‌صورت هم‌زمان در ارزیابی وارد کرده و گزینه‌ها را رتبه‌بندی کند. چنین رویکردی به‌ویژه برای مقایسه تعداد زیادی از مدل‌های کمباین با ویژگی‌های عملکردی متفاوت اهمیت دارد.

برای ارزیابی هم‌زمان معیارهای کمی و کیفی مؤثر بر عملکرد کمباین‌های برداشت برنج، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[1] (MCDM) می‌توانند چارچوبی مناسب برای مقایسه و اولویت‌بندی گزینه‌ها فراهم کنند (قدسی‌پور، ۱۳۹۸). در این میان، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی[2](FAHP) با تلفیق ساختار مقایسات زوجی روش AHP و مفاهیم مجموعه‌های فازی، امکان در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های کارشناسی را در تعیین وزن معیارها فراهم می‌سازد. از سوی دیگر، تکنیک رتبه‌بندی بر اساس تشابه با راه‌حل ایده‌آل[3](TOPSIS) گزینه‌ها را بر اساس فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی رتبه‌بندی می‌کند؛ به‌گونه‌ای که گزینه مطلوب‌تر، فاصله کمتری از ایده‌آل مثبت و فاصله بیشتری از ایده‌آل منفی دارد (Saaty, 1980; Saaty & Vargas, 2012; Hwang & Yoon, 1981; Tzeng & Huang, 2011). ترکیب FAHP و TOPSIS امکان تعیین وزن معیارها با لحاظ عدم قطعیت قضاوت‌های کارشناسی و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس معیارهای سود و هزینه را فراهم می‌کند. همچنین، روش VIKOR با تمرکز بر راه‌حل سازشی، امکان بررسی توافق نتایج رتبه‌بندی را فراهم می‌سازد (Opricovic & Tzeng, 2004).

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر، ارزیابی و رتبه‌بندی عملکرد ۱۷ مدل کمباین برداشت برنج با استفاده از روش ترکیبی FAHP–TOPSIS است. در این راستا، ابتدا وزن معیارهای ارزیابی شامل ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، راندمان مزرعه‌ای، مصرف سوخت سطحی، تلفات کل برداشت، خلوص شلتوک و شکستگی شلتوک با استفاده از FAHP تعیین شد و سپس مدل‌های مختلف کمباین با روش TOPSIS رتبه‌بندی شدند. همچنین، به‌منظور بررسی پایداری نتایج، تحلیل حساسیت وزن معیارها انجام و رتبه‌بندی حاصل با روش VIKOR اعتبارسنجی شد.

ویرایش اولیه نشده

---

1 - Multi-Criteria Decision Making

2 - Fuzzy Analytic Hierarchy Process

3 - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

پیشینهٔ پژوهش

در ایران، مطالعات مختلفی برای ارزیابی روش‌ها و ماشین‌های برداشت برنج انجام شده است. بررسی پنج روش مختلف برداشت برنج در استان گیلان نشان داده است که روش‌های برداشت از نظر ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر و میزان تلفات کمی و کیفی محصول تفاوت دارند. همچنین، نتایج نشان داد که استفاده از کمباین‌های مخصوص برداشت برنج می‌تواند در مقایسه با روش‌های غیرمستقیم برداشت موجب کاهش تلفات کل محصول شود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که انتخاب روش برداشت یا ماشین مناسب باید بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی انجام شود (Allameh & Alizadeh, 2020).

مقایسه سه نوع کمباین متداول برداشت برنج در منطقه مازندران نشان داد که معیارهایی مانند ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، راندمان مزرعه‌ای، مصرف سوخت، تلفات برداشت و هزینه عملیات می‌توانند موجب تفاوت قابل توجهی بین مدل‌های مختلف کمباین از نظر عملکرد فنی و اقتصادی شوند. نتایج این مطالعه نشان داد که یک کمباین ممکن است از نظر یک شاخص عملکردی مطلوب باشد، اما در معیارهای دیگر عملکرد متفاوتی داشته باشد؛ بنابراین، انتخاب کمباین بر اساس یک معیار منفرد نمی‌تواند تصمیم‌گیری مناسبی را تضمین کند و ارزیابی هم‌زمان چندین شاخص عملکردی ضروری است (صفری و همکاران، ۱۳۹۲).

علاوه بر مطالعات مقایسه‌ای، آزمون‌های عملکردی مدل‌های مختلف کمباین برداشت برنج نیز در شرایط واقعی مزرعه انجام شده است. این مطالعات نشان داده‌اند که شاخص‌هایی مانند ظرفیت مزرعه‌ای، راندمان مزرعه‌ای، مصرف سوخت، تلفات برداشت و خلوص شلتوک از معیارهای مهم ارزیابی عملکرد کمباین هستند (Goto et al., 1992; Roy et al., 2001 ؛ طباطبایی کلور و همکاران، ۱۳۹۱).

مطالعات جدیدتر نیز اهمیت ارزیابی چندبعدی عملکرد کمباین‌های برداشت برنج را تأیید کرده‌اند. مقایسه عملکرد میدانی کمباین‌های مختلف نشان داده است که شاخص‌هایی مانند ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، راندمان مزرعه‌ای، مصرف سوخت و تلفات برداشت می‌توانند تحت تأثیر نوع ماشین و شرایط کاری قرار گیرند. همچنین، بررسی شرایط عملیاتی نشان داده است که پارامترهایی مانند سرعت پیشروی کمباین می‌توانند بر میزان تلفات دانه اثر معنی‌داری داشته باشند و تنظیم مناسب شرایط کاری ماشین برای کاهش ضایعات ضروری است. افزون بر این، ارزیابی یک کمباین نیمه‌تغذیه در شرایط مزرعه‌ای نشان داد که تنظیم مناسب سرعت پیشروی و ارتفاع برش می‌تواند موجب بهبود ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، افزایش راندمان و کاهش تلفات و شکستگی دانه شود (Elsoragaby et al., 2019; Wagiman et al., 2019; Mokhtor et al., 2020; Khan et al., 2024).

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر عملکرد و کیفیت برداشت، ویژگی‌های طراحی و شرایط کاری سامانه‌های کوبش و جداسازی کمباین است. مطالعات انجام‌شده درباره کمباین‌های جریان محوری نشان داده‌اند که پارامترهای طراحی و عملیاتی سامانه کوبش و جداسازی می‌توانند بر توان موردنیاز و میزان تلفات دانه اثرگذار باشند. در کمباین‌های برداشت برنج نیز طراحی سامانه کوبش و جداسازی و شرایط عملیاتی ماشین از عوامل مؤثر بر تلفات و شکستگی دانه محسوب می‌شوند. همچنین، بررسی کمباین‌های مختلف برداشت برنج نشان داده است که نوع کمباین و شرایط رطوبتی محصول می‌توانند بر میزان تلفات برداشت اثرگذار باشند (Harrison, 1991; Ichikawa & Sujiyama, 1986; Chuanu-dom & Chinsuwan, 2011 ؛ علی‌محمدزاده و همکاران، ۱۳۹۴).

علاوه بر شاخص‌های فنی و عملیاتی، جنبه‌های اقتصادی و عوامل مؤثر بر توسعه و پذیرش فناوری برداشت مکانیزه نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعات جدید نشان داده‌اند که استفاده از کمباین برداشت برنج می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های تولید، کاهش وابستگی به نیروی کار و افزایش بازده اقتصادی عملیات برداشت شود؛ با این حال، عواملی مانند دسترسی به ماشین، خدمات تعمیر و نگهداری و شرایط بهره‌برداری می‌توانند بر استفاده مؤثر از این فناوری اثرگذار باشند (Sujan et al., 2025).

در زمینه کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در انتخاب فناوری برداشت برنج نیز پژوهش‌هایی انجام شده است. در پژوهشی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی، انتخاب فناوری پایدار برداشت برنج بررسی شد (بنائیان و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، روش تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل رابطه خاکستری برای انتخاب ترکیب مناسب ماشین‌آلات در زراعت برنج به کار گرفته شد و معیارهای مرتبط با پایداری در فرایند تصمیم‌گیری مورد توجه قرار گرفتند (Qane'ei Kenarsari

ویرایش اولیه

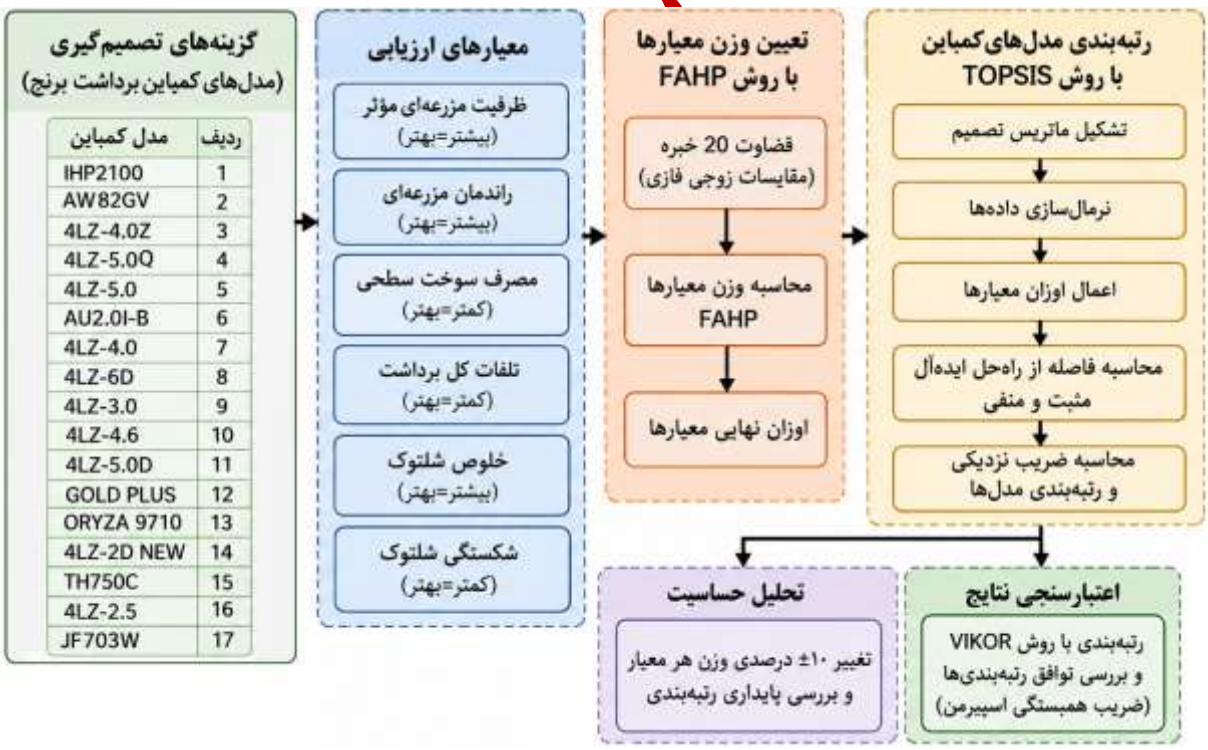
et al., 2024). افزون بر این، استفاده از رویکرد ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی و TOPSIS فازی برای تصمیم‌گیری درباره انتخاب ماشین‌آلات کشاورزی با درنظرگرفتن معیارهای پایداری نیز گزارش شده است (Banaeian & Pourhejazy, 2020).

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پژوهش‌های تجربی عمدتاً بر آزمون یا مقایسه تعداد محدودی از کمباین‌ها و بررسی شاخص‌های عملکردی تمرکز داشته‌اند، درحالی‌که مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره بیشتر به انتخاب فناوری برداشت یا ترکیب ماشین‌آلات کشاورزی با تأکید بر معیارهای پایداری پرداخته‌اند. در پژوهش حاضر، تمرکز بر مقایسه عملکرد ۱۷ مدل مشخص کمباین برداشت برنج بر اساس شش معیار فنی، مصرف سوخت و کیفیت برداشت است. بدین منظور، علاوه بر تعیین وزن معیارها با روش FAHP و رتبه‌بندی مدل‌ها با روش TOPSIS، پایداری نتایج در برابر تغییر وزن معیارها و میزان توافق رتبه‌بندی با روش VIKOR بررسی شد. بنابراین، سهم اصلی پژوهش حاضر نه معرفی یک روش تصمیم‌گیری جدید، بلکه کاربرد و ارزیابی استحکام یک چارچوب چندمعیاره برای مقایسه عملکرد مدل‌های کمباین در محدوده داده‌ها و معیارهای منتخب است.

روش‌شناسی پژوهش

مدل مفهومی پژوهش

بر مبنای مبانی نظری و یافته‌های مطالعات پیشین، مدل مفهومی پژوهش حاضر برای ارزیابی و رتبه‌بندی عملکرد ۱۷ مدل کمباین برداشت برنج بر اساس شش معیار تدوین شد. در این مدل، ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، راندمان مزرعه‌ای، مصرف سوخت سطحی، تلفات کل برداشت، خلوص شلتوک و شکستگی شلتوک به‌عنوان معیارهای ارزیابی در نظر گرفته شدند. وزن نسبی معیارها با استفاده از روش FAHP و بر اساس قضاوت خبرگان تعیین و مدل‌های کمباین با روش TOPSIS رتبه‌بندی شدند. همچنین، تحلیل حساسیت برای بررسی پایداری رتبه‌بندی و روش VIKOR همراه با ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن برای اعتبارسنجی و بررسی توافق نتایج به‌کار گرفته شد. مدل مفهومی و مراحل کلی فرایند ارزیابی و رتبه‌بندی کمباین‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. مدل مفهومی پژوهش (منبع: نویسنده)

گردآوری داده‌ها و گزینه‌های مورد ارزیابی

داده‌های فنی و عملکردی کمباین‌های برداشت برنج در این پژوهش از اندازه‌گیری‌های میدانی و نتایج مطالعات پیشین به دست آمد. داده‌های مورد استفاده مربوط به بررسی‌های انجام‌شده طی سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۵ در مزارع مختلف و با ارقام متفاوت برنج بودند. برای تشکیل ماتریس تصمیم، داده‌های عملکردی ۱۷ مدل متمایز کمباین برداشت برنج مورد استفاده قرار گرفت.

برای هر یک از مدل‌های مورد ارزیابی، داده‌های عملکردی مربوط به یک دستگاه کمباین مورد استفاده قرار گرفت؛ بنابراین، تکرار مستقل در سطح دستگاه وجود نداشت. تعداد تکرارهای اندازه‌گیری برای معیارهای مختلف یکسان نبود؛ به‌طوری‌که برخی معیارها در چند تکرار و برخی دیگر تنها در یک نوبت اندازه‌گیری شدند. تکرارهای انجام‌شده مربوط به اندازه‌گیری عملکرد همان دستگاه بوده و به‌عنوان تکرار مستقل دستگاه‌های مختلف یک مدل تلقی نشدند.

داده‌های عملکردی مورد استفاده از آزمون‌هایی در سال‌ها و شرایط متفاوت برداشت برنج به دست آمده‌اند و تمامی مدل‌های کمباین در شرایط یکسان و به‌صورت هم‌زمان مورد آزمون قرار نگرفته‌اند. عواملی مانند رقم برنج، رطوبت و وضعیت رسیدگی محصول، شرایط آب‌وهوایی هنگام برداشت، رطوبت و وضعیت خاک، اندازه و شکل قطعات زراعی، وضعیت تسطیح مزرعه، تراکم و خوابیدگی بوته‌ها، عملکرد محصول در واحد سطح، سال ساخت و وضعیت فنی دستگاه، تنظیمات بخش‌های مختلف کمباین، سرعت پیشروی، مهارت راننده و نحوه مدیریت عملیات برداشت می‌توانند بر شاخص‌های عملکردی تأثیرگذار باشند. برای مثال، اندازه قطعات زراعی و زمان‌های توقف و دورزدن می‌توانند بر ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر و راندمان مزرعه‌ای، شرایط محصول و تنظیمات دستگاه بر تلفات برداشت و کیفیت شلتوک و وضعیت خاک، سرعت پیشروی و بار کاری دستگاه بر مصرف سوخت سطحی تأثیر بگذارند. ازآنجاکه این عوامل در آزمون‌های مورد استفاده به‌صورت یکسان کنترل نشده‌اند، نمی‌توان تمام تفاوت‌های مشاهده‌شده در مقادیر معیارهای عملکردی را صرفاً به ویژگی‌های فنی یا طراحی مدل‌های کمباین نسبت داد.

برای تشکیل ماتریس تصمیم، شش شاخص مشترک شامل ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، راندمان مزرعه‌ای، مصرف سوخت در واحد سطح، تلفات کل برداشت، خلوص شلتوک و شکستگی شلتوک انتخاب شدند. این شاخص‌ها از نظر تعریف و واحد اندازه‌گیری قابلیت مقایسه عددی داشتند؛ بااین‌حال، یکسان بودن تعریف و واحد شاخص‌ها به معنای حذف اثر تفاوت شرایط آزمون نیست.

معیارهای اقتصادی مانند هزینه مالکیت، تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری، به دلیل در دسترس نبودن داده‌های مستند و قابل مقایسه برای تمامی مدل‌های مورد بررسی و تفاوت شرایط اقتصادی در سال‌های گردآوری داده‌ها، در ماتریس تصمیم وارد نشدند. ازاین‌رو، نتایج پژوهش حاضر به ارزیابی عملکرد مدل‌ها بر اساس شش معیار منتخب محدود است و بیانگر ارزیابی جامع اقتصادی کمباین‌ها نیست.

بر این اساس، داده‌های ثبت‌شده به‌عنوان ورودی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد استفاده قرار گرفتند. وزن نسبی معیارها با روش FAHP تعیین شد و رتبه‌بندی مدل‌های کمباین با روش TOPSIS انجام گرفت.

معیارهای ارزیابی و روش اندازه‌گیری و محاسبه آن‌ها

روش اندازه‌گیری و محاسبه شش معیار ارزیابی به شرح زیر است:

ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (C1): ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، بیانگر سطح واقعی برداشت‌شده در واحد زمان است و بر حسب هکتار بر ساعت از رابطه (۱) تعیین شد (الماسی، ۱۳۹۳). با توجه به مطلوب بودن ظرفیت بیشتر، این شاخص به‌عنوان معیار سود در نظر گرفته شد.

بازده مزرعه‌ای (C2): بازده مزرعه‌ای، نسبت ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر به ظرفیت مزرعه‌ای نظری است و آثار زمان‌های تلف‌شده و استفاده‌نشدن از عرض کامل کار دستگاه را منعکس می‌کند. این شاخص بر حسب درصد از رابطه (۲) محاسبه شد (الماسی، ۱۳۹۳). ظرفیت مزرعه‌ای نظری، بیانگر ظرفیت کارکرد دستگاه بدون احتساب زمان‌های تلف‌شده است و بر حسب هکتار بر ساعت از رابطه (۲-۱) به دست آمد.

برای تعیین سرعت پیشروی کمباین، زمان پیمودن مسافت ۲۰ متری در حین عملیات برداشت، با استفاده از کرنومتر و در چهار تکرار اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از میانگین زمان‌های اندازه‌گیری‌شده، سرعت پیشروی بر حسب کیلومتر بر ساعت از رابطه (۲-۲) محاسبه شد (PNS/PAES 225:2015). با توجه به مطلوب بودن راندمان بیشتر، C2 به‌عنوان معیار سود در نظر گرفته شد.

ویرایش نشده

مصرف سوخت سطحی (C3): مصرف سوخت با استفاده از روش باک پُر تعیین شد. در این روش، مخزن سوخت پیش از شروع آزمون تا سطح مشخصی پُر شد و پس از پایان عملیات برداشت، حجم سوخت لازم برای بازگرداندن سطح آن به وضعیت اولیه با ظرف مدرج اندازه‌گیری شد. حجم سوخت افزوده‌شده، معادل سوخت مصرفی در طول عملیات در نظر گرفته شد. سپس مصرف سوخت در واحد سطح، بر حسب لیتر بر هکتار، از رابطهٔ (۳) محاسبه شد (PNS/PAES 225:2015). با توجه به مطلوب بودن مصرف سوخت کمتر، C3 به‌عنوان معیار هزینه در نظر گرفته شد.

تلفات کل برداشت (C4): تلفات کل برداشت از مجموع تلفات خالص واحد برداشت (هد) و تلفات انتهای کمباین، مطابق رابطه (۴)، تعیین شد. برای اندازه‌گیری تلفات هد، دانه‌ها و خوشه‌های باقی‌مانده در سطح یک مترمربع پس از عبور واحد برداشت جمع‌آوری و مقدار تلفات طبیعی پیش از برداشت از آن کسر شد (PNS/PAES 225:2015). سپس تلفات خالص هد از رابطه (۱–۴) محاسبه شد.

تلفات انتهای کمباین نیز با جمع‌آوری مواد خروجی پشت دستگاه در کادری به ابعاد ۱× ۱ متر، جداسازی و توزین شلتوک و تبدیل مقدار حاصل به واحد سطح، از رابطه (۴–۲) تعیین شد. عملکرد محصول نیز از طریق برداشت دستی، بوجاری و توزین محصول در سطح یک مترمربع معرف مزرعه به دست آمد. با توجه به مطلوب بودن تلفات کمتر، C4 به‌عنوان معیار هزینه در نظر گرفته شد.

خلوص شلتوک (C5): برای ارزیابی ترکیب محصول برداشت‌شده، سه نمونه (وزن هر نمونه ۱۰۰ گرم) از شلتوک موجود در مخزن کمباین تهیه شد. اجزای هر نمونه شامل شلتوک سالم، دانه‌های شکسته، شلتوک پوست‌کنده و شکسته و مواد خارجی، به‌صورت دستی تفکیک و توزین شدند. خلوص شلتوک از نسبت جرم شلتوک سالم به جرم کل نمونه و بر حسب درصد، مطابق رابطه (۵)، محاسبه شد (PNS/PAES 225:2015). با توجه به مطلوب بودن خلوص بیشتر، C5 به‌عنوان معیار سود در نظر گرفته شد.

شکستگی شلتوک (C6): برای تعیین این معیار، از همان سه نمونه ۱۰۰ گرمی مورد استفاده در ارزیابی خلوص شلتوک استفاده شد. پس از تفکیک اجزای نمونه، دانه‌های شکسته توزین و نسبت جرم آنها به جرم کل نمونه، بر حسب درصد، مطابق رابطه (۶)، محاسبه شد (PNS/PAES 225:2015). با توجه به مطلوب بودن شکستگی کمتر، C6 به‌عنوان معیار هزینه در نظر گرفته شد.

روابط محاسباتی، واحدهای اندازه‌گیری، تعریف متغیرها و جهت مطلوبیت معیارها در جدول (۱) ارائه شده است. روابط اصلی (۱) تا (۶) به‌ترتیب برای محاسبه ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، راندمان مزرعه‌ای، مصرف سوخت در واحد سطح، تلفات کل برداشت، خلوص شلتوک و شکستگی شلتوک به کار گرفته شدند.

جدول ۱. معیارها، روابط محاسباتی و جهت مطلوبیت شاخص‌های ارزیابی عملکرد کمباین‌های برداشت برنج

شماره رابطه	معیار	رابطه محاسباتی	واحد	تعریف متغیرها	ماهیت
۱	ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (C1)	$EFC = A / T$	hah^{-1}	EFC: ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (hah^{-1})؛ A: مساحت واقعی برداشت‌شده (ha)؛ T: زمان کل عملیات برداشت شامل زمان برداشت مؤثر و زمان‌های تلف شده عملیاتی (h)	سود
۲	بازده مزرعه‌ای (C2)	$FE = (EFC / TFC) \times 100$	٪	FE: بازده مزرعه‌ای (٪)؛ EFC: ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (hah^{-1})؛ TFC: ظرفیت مزرعه‌ای نظری (hah^{-1})؛ S: سرعت پیشروی (kmh^{-1})؛ W: عرض کار مؤثر (m)	سود
۲–۱	ظرفیت مزرعه‌ای نظری	$TFC = (S \times W) / 10$	hah^{-1}		
۲–۲	سرعت پیشروی	$S = \frac{3.6 \times 20}{t}$	kmh^{-1}	t: زمان صرف شده برای طی کردن مسافت ۲۰ متر (s)	

ویرایش اولیه

۳	مصرف سوخت سطحی (C3)	$FC = F / A$	Lha^{-1}	FC: مصرف سوخت سطحی (Lha^{-1})؛ F: حجم سوخت مصرف‌شده طی آزمون (L)؛ A: مساحت واقعی برداشت‌شده (ha)	هزینه
۴	تلفات کل برداشت (C4)	$TL = HL + RL$	٪	TL: تلفات کل برداشت (٪)؛HL: افت هد برداشت (٪)؛ RL: افت انتهای کمباین (٪)؛ L_h: مقدار افت خالص هد در واحد سطح پس از کسر افت طبیعی پیش از برداشت؛ L_r: مقدار افت انتهای کمباین در واحد سطح؛Y: عملکرد واقعی محصول در همان واحد سطح.	هزینه
۴-۱	افت هد برداشت	$HL = (L_h / Y) \times 100$	٪		
۴-۲	افت انتهای کمباین	$RL = (L_r / Y) \times 100$	٪		
۵	خلوص شلتوک (C5)	$PP = (M_h / M_t) \times 100$	٪	PP: خلوص شلتوک (٪)؛ M_h: جرم شلتوک سالم در نمونه (g)؛ M_t: جرم کل نمونه مخزن (g)	سود
۶	شکستگی شلتوک (C6)	$BG = (M_\beta / M_t) \times 100$	٪	BG: درصد شکستگی شلتوک (٪)؛ M_β: جرم دانه‌های شکسته در نمونه (g)؛ M_t: جرم کل نمونه مخزن (g)	هزینه

وزن‌دهی معیارهای ارزیابی با روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)

با توجه به یکسان نبودن اهمیت معیارهای ارزیابی عملکرد کمباین‌های برداشت برنج، وزن نسبی معیارها با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) تعیین شد. بدین منظور، مقایسات زوجی شش معیار شامل ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (C1)، راندمان مزرعه‌ای (C2)، مصرف سوخت سطحی (C3)، تلفات کل برداشت (C4)، خلوص شلتوک (C5) و شکستگی شلتوک (C6)، در فرایندی جدا از اندازه‌گیری عملکرد کمباین‌ها و بر اساس قضاوت ۲۰ خبره انجام شد.

خبرگان به روش هدفمند انتخاب شدند. معیارهای انتخاب شامل داشتن تحصیلات دانشگاهی مرتبط، حداقل پنج سال سابقه فعالیت علمی، پژوهشی یا اجرایی مرتبط با مکانیزاسیون کشاورزی و تولید برنج و تجربه در زمینه ارزیابی، بهره‌برداری یا مدیریت ماشین‌آلات کشاورزی بود. گروه خبرگان شامل اعضای هیئت‌علمی دانشگاه‌ها، پژوهشگران مؤسسه تحقیقات برنج کشور، متخصصان مکانیزاسیون کشاورزی و کارشناسان مرتبط بخش کشاورزی بود. پرسش‌نامه مقایسات زوجی پس از تشریح هدف پژوهش در اختیار خبرگان قرار گرفت و قضاوت‌های آنان برای تعیین وزن معیارها به‌کار گرفته شد.

برای بیان عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان، مقایسات زوجی با استفاده از مقیاس ۹ درجه‌ای AHP و با استفاده از اعداد فازی مثلثی به‌صورت $\tilde{M}=(l,m,u)$ انجام شد که در آن l، m و u به‌ترتیب حد پایین، مقدار میانی و حد بالای عدد فازی را نشان می‌دهند (Saaty, 1980; Ishizaka, 2014).

پس از تبدیل قضاوت‌های خبرگان به اعداد فازی مثلثی، برای هر مقایسه زوجی، مؤلفه‌های حد پایین، مقدار میانی و حد بالای اعداد فازی به‌صورت جداگانه با استفاده از میانگین حسابی تجمیع شدند. بدین‌ترتیب، ماتریس مقایسات زوجی فازی گروهی تشکیل شد. عناصر قطر اصلی ماتریس برابر (۱،۱،۱) در نظر گرفته شدند و برای حفظ خاصیت تقابلی، معکوس عدد فازی $\tilde{M}=(l,m,u)$ به‌صورت $\tilde{M}^{-1}=(1/u,1/m,1/l)$ محاسبه شد. در ادامه، مجموع فازی عناصر هر سطر محاسبه و با استفاده از مجموع کل عناصر ماتریس، وزن‌های فازی معیارها تعیین شد. وزن‌های فازی با استفاده از روش مرکز ثقل غیرفازی‌سازی و سپس نرمال‌سازی شدند تا مجموع وزن‌های نهایی برابر یک شود. همچنین سازگاری ماتریس مقایسات زوجی فازی گروهی با استفاده از روش گوگوس و بوچر بررسی شد. وزن‌های نهایی حاصل از این فرایند به‌عنوان ورودی مرحله رتبه‌بندی مدل‌های کمباین با روش TOPSIS مورد استفاده قرار گرفتند.

بررسی سازگاری مقایسات زوجی فازی

به‌منظور بررسی سازگاری ماتریس مقایسات زوجی فازی گروهی حاصل از تجمیع قضاوت‌های خبرگان، از روش گوگوس و بوچر (۱۹۹۷) استفاده شد. در این روش، ماتریس مقایسات زوجی فازی به دو ماتریس قطعی A^m و A^g تبدیل شد؛ ماتریس A^m از مقادیر میانی اعداد فازی مثلثی و ماتریس A^g از میانگین هندسی حدود پایین و بالای آنها تشکیل شد. سپس برای هر ماتریس، مقدار ویژه بیشینه λmax با استفاده از میانگین نسبت مؤلفه‌های حاصل‌ضرب ماتریس در بردار وزن به مؤلفه‌های متناظر بردار

ویرایشگاری نشده

وزن تقریب زده شد و شاخص ناسازگاری (CI) بر اساس تعداد معیارها محاسبه شد. نرخ ناسازگاری (CR) نیز از نسبت CI به شاخص تصادفی متناظر (RI) به دست آمد. با توجه به وجود شش معیار، مقادیر RI برای ماتریس‌های A^m و A^g به‌ترتیب ۱/۱۹۹۶ و ۰/۳۸۱۸ در نظر گرفته شد (Gogus & Boucher, 1997). در نهایت، دو نرخ ناسازگاری CRm و CRg محاسبه شد و مقادیر کمتر از ۰/۱۰ به‌عنوان نشان‌دهنده سازگاری قابل قبول ماتریس مقایسات زوجی فازی گروهی در نظر گرفته شدند.

رتبه‌بندی مدل‌های کمباین با استفاده از روش TOPSIS

پس از تعیین وزن معیارهای ارزیابی با روش FAHP، رتبه‌بندی ۱۷ مدل کمباین برداشت برنج با استفاده از تکنیک رتبه‌بندی ترجیح بر اساس تشابه با راه‌حل ایده‌آل[4] (TOPSIS) انجام شد (Hwang & Yoon, 1981; Tzeng & Huang, 2011; Taherdoost & Madanchian, 2024). ابتدا ماتریس تصمیم بر اساس مقادیر واقعی عملکرد مدل‌های کمباین تشکیل و با استفاده از روش نرمال‌سازی برداری بدون بعد شد. سپس با اعمال وزن‌های حاصل از FAHP، ماتریس نرمال موزون تشکیل گردید. برای تعیین راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی، ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، راندمان مزرعه‌ای و خلوص شلتوک به‌عنوان معیارهای سود و مصرف سوخت سطحی، تلفات کل برداشت و شکستگی شلتوک به‌عنوان معیارهای هزینه در نظر گرفته شدند. در ادامه، فاصله هر گزینه از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه و ضریب نزدیکی نسبی (CC_i) تعیین شد. مدل‌های کمباین بر اساس مقادیر نزولی CC_i رتبه‌بندی شدند؛ به‌گونه‌ای که مقدار بیشتر این ضریب، نشان‌دهنده نزدیکی بیشتر گزینه به راه‌حل ایده‌آل و در نتیجه مطلوبیت نسبی بیشتر آن بر اساس مجموعه معیارهای وزنی بود.

تحلیل حساسیت

به‌منظور بررسی پایداری نتایج حاصل از مدل ترکیبی FAHP–TOPSIS، تحلیل حساسیت نسبت به وزن معیارها انجام شد. در این تحلیل، وزن هر یک از شش معیار به‌طور جداگانه به میزان ±۱۰ درصد نسبت به مقدار اولیه تغییر داده شد و وزن سایر معیارها پیش از نرمال‌سازی بدون تغییر در نظر گرفته شد. پس از اعمال هر تغییر، مجموعه وزن‌ها مجدداً نرمال‌سازی و فرایند TOPSIS تکرار شد. در هر سناریو، تغییرات ضریب نزدیکی (CC_i) و رتبه مدل‌های کمباین بررسی و میزان جابه‌جایی رتبه‌ها و پایداری جایگاه گزینه‌ها به‌عنوان مبنای ارزیابی حساسیت نتایج در نظر گرفته شد.

بررسی استحکام و توافق نتایج با روش VIKOR

به‌منظور بررسی اعتبار رتبه‌بندی حاصل از روش FAHP–TOPSIS، روش VIKOR با استفاده از همان ماتریس تصمیم، وزن معیارهای حاصل از FAHP و ماهیت سود یا هزینه هر معیار به‌کار گرفته شد (Opricovic & Tzeng, 2004). برای هر معیار، بهترین و بدترین مقدار تعیین و بر این اساس، شاخص مطلوبیت گروهی (S_i) و شاخص بیشینه نارضایتی (R_i) برای هر مدل محاسبه شد. سپس شاخص مصالحه‌ای (Q_i) با در نظر گرفتن پارامتر $v=0.5$ تعیین شد که بیانگر اهمیت برابر مطلوبیت گروهی و حداقل‌سازی بیشینه نارضایتی است. مدل‌های کمباین بر اساس مقادیر صعودی Q_i رتبه‌بندی شدند؛ به‌گونه‌ای که مقدار کمتر این شاخص نشان‌دهنده نزدیکی بیشتر گزینه به راه‌حل سازشی VIKOR بود. همچنین، شرایط پذیرش راه‌حل سازشی شامل مزیت قابل قبول و پایداری قابل قبول در تصمیم‌گیری بر اساس ضوابط روش VIKOR بررسی شد.

برای ارزیابی میزان توافق بین رتبه‌بندی‌های حاصل از TOPSIS و VIKOR، ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (r_s) بر اساس اختلاف رتبه ۱۷ مدل در دو روش محاسبه شد. مقادیر بیشتر و نزدیک‌تر r_s به یک، نشان‌دهنده توافق بیشتر بین دو رتبه‌بندی در نظر گرفته شد.

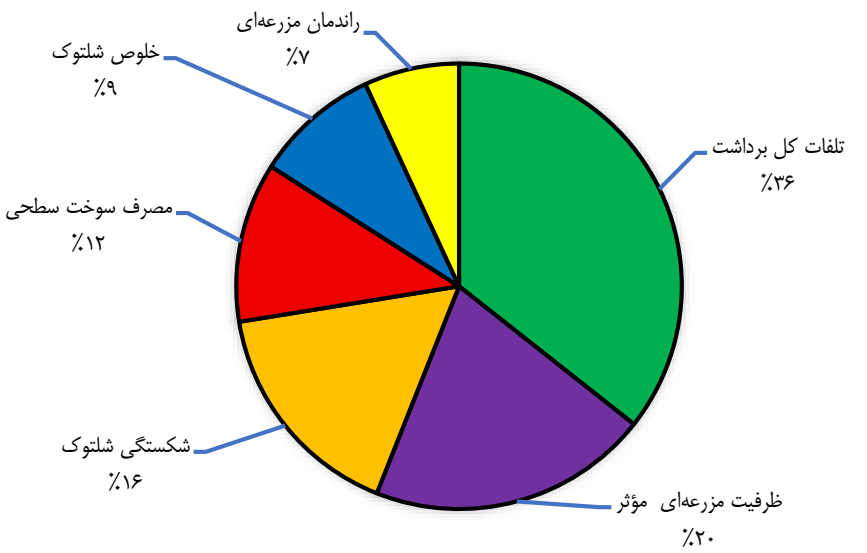
یافته‌های پژوهش

4 -Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

ویرایشاری نشده

وزن‌دهی معیارهای ارزیابی کمباین با روش FAHP

نتایج وزن‌دهی معیارهای ارزیابی کمباین‌های برداشت برنج با استفاده از روش FAHP نشان داد که اهمیت معیارهای مورد بررسی یکسان نبوده و تفاوت قابل‌توجهی میان وزن نسبی آنها وجود دارد. از میان شش معیار مورد بررسی، تلفات کل برداشت (C4) با وزن ۰/۳۵۶۳ بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داد. پس از آن، ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (C1) با وزن ۰/۲۰۳۹ و شکستگی شلتوک (C6) با وزن ۰/۱۶۴۳ به‌ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. مصرف سوخت سطحی (C3) با وزن ۰/۱۱۵۸ و خلوص شلتوک (C5) با وزن ۰/۰۹۰۷ در رتبه‌های بعدی قرار داشتند و راندمان مزرعه‌ای (C2) با وزن ۰/۰۶۹۰ کمترین وزن را در میان معیارهای ارزیابی به دست آورد. این وزن‌ها در مراحل بعدی برای تشکیل ماتریس نرمال موزون و رتبه‌بندی کمباین‌ها به روش TOPSIS مورد استفاده قرار گرفتند. سهم نسبی معیارها در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. نمودار سهم نسبی معیارهای منتخب ارزیابی عملکرد کمباین‌های برداشت برنج بر اساس وزن‌های حاصل از FAHP

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، توزیع اهمیت معیارها متوازن نبود؛ به‌طوری‌که تلفات کل برداشت بیش از یک‌سوم وزن کل تصمیم‌گیری را به خود اختصاص داد و سه معیار تلفات کل برداشت، ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر و شکستگی شلتوک در مجموع حدود ۷۲ درصد از وزن کل را شامل شدند. در مقابل، راندمان مزرعه‌ای با حدود ۷ درصد کمترین سهم را داشت.

بیشتر بودن وزن تلفات کل برداشت در نتایج FAHP نشان می‌دهد که این معیار، بر اساس قضاوت خبرگان مشارکت‌کننده و در میان شش معیار منتخب پژوهش، بیشترین اهمیت نسبی را داشته است. این نتیجه بیانگر برتری اقتصادی تلفات برداشت نسبت به سایر عوامل نیست؛ زیرا معیارهای اقتصادی مانند هزینه مالکیت، تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری در فرایند وزن‌دهی وارد نشده‌اند. بااین‌حال، توجه به تلفات محصول از نظر عملکردی اهمیت دارد؛ زیرا ارزیابی یک کمباین صرفاً بر مبنای سرعت انجام عملیات یا ظرفیت کاری آن نمی‌تواند بیانگر کیفیت کلی عملکرد دستگاه باشد و میزان محصول از دست‌رفته در جریان برداشت نیز باید هم‌زمان مورد توجه قرار گیرد. قرار گرفتن ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر در رتبه دوم وزن‌دهی معیارهای منتخب نیز نشان‌دهنده اهمیت توانایی کمباین در برداشت سطح بیشتری از مزرعه در واحد زمان از دیدگاه خبرگان این پژوهش است.

همچنین، وزن نسبتاً بالای شکستگی شلتوک و قرار گرفتن آن در رتبه سوم نشان می‌دهد که کیفیت محصول برداشت‌شده در کنار کاهش تلفات، یکی از مؤلفه‌های مهم ارزیابی عملکرد کمباین‌ها بوده است. در مقابل، اگرچه مصرف سوخت سطحی، خلوص شلتوک و راندمان مزرعه‌ای وزن‌های کمتری دریافت کردند، این معیارها نیز در ارزیابی نهایی حذف نشده و متناسب با وزن خود در محاسبه مطلوبیت هر مدل تأثیر داشته‌اند. بنابراین، ساختار وزن‌ها بیانگر ارزیابی هم‌زمان جنبه‌های مرتبط با ظرفیت عملیاتی، مصرف سوخت، کمیت تلفات و کیفیت محصول برداشت‌شده است.

بررسی سازگاری قضاوت‌های خبرگان

نتایج بررسی سازگاری مقایسات زوجی فازی به روش گوگوس و بوچر (۱۹۹۷) نشان داد که برای ماتریس مقادیر میانی (A^m)، مقدار ویژه بیشینه (λmax)، شاخص ناسازگاری (CI_m) و نرخ ناسازگاری (CR_m) به‌ترتیب برابر با ۶/۰۵۶۸، ۰/۰۱۱۴ و ۰/۰۰۹۵ و برای ماتریس میانگین هندسی کران‌های پایین و بالا (A^g) به‌ترتیب برابر با ۶/۰۵۸۵، ۰/۰۱۱۷ و ۰/۰۳۰۶ بود. با توجه به اینکه مقادیر CR در هر دو ماتریس کمتر از حد قابل قبول ۰/۱۰ بودند، سازگاری ماتریس مقایسات زوجی فازی گروهی قابل قبول ارزیابی شد و وزن‌های حاصل از FAHP برای رتبه‌بندی مدل‌های کمباین مورد استفاده قرار گرفتند.

نتایج ارزیابی و رتبه بندی کمباین‌ها با روش TOPSIS

رتبه‌بندی ۱۷ مدل کمباین با روش TOPSIS و بر اساس وزن‌های حاصل از FAHP انجام شد. نتایج رتبه‌بندی و مقادیر ضریب نزدیکی (CC_i) مدل‌های مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان داد که جایگاه نهایی مدل‌ها بیش از آنکه تابع برتری در یک معیار منفرد باشد، از ترکیب عملکرد آنها در مجموعه معیارها و اهمیت نسبی هر معیار تأثیر پذیرفته است. مدل دارای رتبه نخست، با وجود نداشتن بیشترین ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، در دو معیار هزینه‌ای تلفات کل برداشت و شکستگی شلتوک کمترین مقادیر را در میان گزینه‌های مورد بررسی داشت. از آنجا که این دو معیار در مجموع ۵۲/۰۶ درصد از وزن کل تصمیم‌گیری را به خود اختصاص دادند، عملکرد مطلوب در آنها نقش تعیین‌کننده‌ای در نزدیکی این گزینه به راه‌حل ایده‌آل داشت. بنابراین، ظرفیت کاری بیشتر به‌تنهایی برای دستیابی به جایگاه بالاتر کافی نبوده و عملکرد متوازن، به‌ویژه در معیارهای دارای وزن بیشتر، در تعیین رتبه نهایی مؤثر بوده است.

جدول ۲. رتبه‌بندی مدل‌های کمباین برداشت برنج بر اساس روش FAHP–TOPSIS

رتبه	مدل کمباین	کشور سازنده	توان (KW)	فاصله از ایده‌آل مثبت D_i^+	فاصله از ایده‌آل منفی D_i^-	ضریب نزدیکی CC_i
۱	4LZ-4.0Z	چین	۷۲	۰/۰۳۱۲۲	۰/۱۵۹۲۷	۰/۸۳۵۸۹
۲	4LZ-5.0	چین	۷۳	۰/۰۶۴۶۸	۰/۱۲۱۱۰	۰/۶۵۱۸۶
۳	4LZ-4.6	چین	۸۹	۰/۰۷۶۲۷	۰/۱۱۸۱۹	۰/۶۰۷۷۹
۴	TH750C	کره جنوبی	۵۵	۰/۰۷۵۵۱	۰/۱۱۵۲۹	۰/۶۰۴۲۶
۵	4LZ-2.5	چین	۵۵	۰/۰۸۱۴۳	۰/۱۱۳۵۴	۰/۵۸۲۳۷
۶	ORYZA 9710	ایران	۸۸/۲	۰/۰۸۳۰۳	۰/۱۱۳۸۹	۰/۵۷۸۳۶
۷	4LZ-6D	چین	۱۱۰	۰/۰۸۷۵۶	۰/۱۱۹۰۵	۰/۵۷۶۱۹
۸	GOLD PLUS	چین	۷۳	۰/۰۸۴۵۴	۰/۱۱۴۱۵	۰/۵۷۲۵۲
۹	JF703W	چین	۷۵	۰/۰۸۴۶۹	۰/۱۱۴۰۲	۰/۵۷۳۸۰
۱۰	4LZ-4.0	چین	۸۱	۰/۰۸۶۹۳	۰/۱۱۵۶۲	۰/۵۷۰۸۴
۱۱	IHP2100	ایران	۷۴/۶	۰/۰۸۳۵۴	۰/۱۰۹۹۲	۰/۵۶۸۱۹
۱۲	4LZ-2D NEW	ایران	۸۸/۹	۰/۰۸۹۰۹	۰/۱۱۴۴۸	۰/۵۶۲۳۷
۱۳	AU2.0I-B	چین	۶۳	۰/۰۸۷۱۵	۰/۱۱۱۸۵	۰/۵۶۲۰۶
۱۴	4LZ-3.0	چین	۷۵	۰/۰۹۴۰۵	۰/۱۱۳۲۲	۰/۵۴۶۲۴
۱۵	4LZ-5.0D	چین	۸۱	۰/۰۹۱۹۴	۰/۱۰۹۰۰	۰/۵۴۲۴۵
۱۶	4LZ-5.0Q	چین	۷۳	۰/۱۰۶۹۷	۰/۱۰۴۳۳	۰/۴۹۳۷۶
۱۷	AW82GV	چین	۶۲/۱	۰/۱۴۶۹۶	۰/۰۳۰۲۴	۰/۱۷۰۶۵

این الگو با نتایج مطالعات پیشین درباره عملکرد کمباین‌های برداشت برنج همخوانی دارد. Mokhtor et al. (2020) نشان دادند که افزایش سرعت پیشروی، اگرچه می‌تواند ظرفیت انجام عملیات را افزایش دهد، با افزایش تلفات دانه همراه است و کمترین تلفات در سرعت پایین‌تر مشاهده شد. همچنین، Khan et al. (2024) ارزیابی عملکرد کمباین را بر پایه مجموعه‌ای از شاخص‌ها

ویرایش نشده

شامل ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای، راندمان مزرعه‌ای، تلفات دانه، شکستگی و مصرف سوخت انجام دادند و شرایط عملکردی مطلوب را حالتی گزارش کردند که ظرفیت و راندمان مناسب با تلفات و شکستگی کمتر همراه باشد. ازاین‌رو، نتایج پژوهش حاضر نیز مؤید آن است که ارزیابی عملکرد کمباین باید علاوه بر شاخص‌های ظرفیت و راندمان، پیامدهای کمی و کیفی برداشت را نیز به‌طور هم‌زمان در نظر گیرد.

در سوی دیگر رتبه‌بندی، قرار گرفتن برخی مدل‌ها در جایگاه‌های پایین با عملکرد نامطلوب‌تر در معیارهای دارای اهمیت بیشتر، به‌ویژه تلفات کل برداشت و شکستگی شلتوک، و در برخی موارد خلوص پایین‌تر محصول همراه بود. این یافته نیز بر نقش کیفیت فرایند برداشت در کنار ظرفیت عملیاتی تأکید دارد. مطالعات مزرعه‌ای پیشین نشان داده‌اند که تلفات برداشت به شرایط و تنظیمات عملیاتی کمباین وابسته است و تغییر پارامترهای کاری می‌تواند تلفات محصول را به‌طور معنی‌داری تغییر دهد؛ بنابراین اختلاف عملکرد مدل‌ها را نمی‌توان صرفاً بر مبنای ظرفیت کاری آنها تفسیر کرد.

نکته دیگر، فشردگی ضرایب نزدیکی در بخش میانی رتبه‌بندی بود. نزدیکی مقادیر CC_i در این بخش نشان می‌دهد که جابه‌جایی چند رتبه میان برخی مدل‌ها الزاماً بیانگر اختلاف چشمگیر در عملکرد کلی آنها نیست. در مقابل، فاصله بیشتر گزینه نخست و همچنین گزینه‌های انتهایی از مجموعه میانی، تمایز روشن‌تری را در مطلوبیت نسبی آنها نشان می‌دهد. ازاین‌رو، رتبه‌های ترتیبی، به‌ویژه برای گزینه‌هایی با ضرایب نزدیکی بسیار نزدیک، باید همراه با مقدار CC_i و نتایج تحلیل حساسیت تفسیر شوند.

طبقه‌بندی سطح عملکرد نسبی کمباین‌های برداشت برنج

به‌منظور تسهیل تفسیر مقادیر ضریب نزدیکی و پرهیز از اتکای صرف به رتبه ترتیبی، مدل‌های مورد بررسی بر اساس مقدار CC_i در پنج سطح عملکرد نسبی شامل خیلی بالا، بالا، متوسط، پایین و خیلی پایین طبقه‌بندی شدند. این طبقه‌بندی ماهیت توصیفی داشت و با تقسیم دامنه مقادیر مشاهده‌شده CC_i، از ۰/۱۷۰۶۵ تا ۰/۸۳۵۸۹، به پنج بازه مساوی با عرض ۰/۱۳۳۰۵ انجام شد. حدود طبقات و توزیع مدل‌ها در هر سطح در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. حدود و توزیع سطوح توصیفی عملکرد نسبی کمباین‌های برداشت برنج بر اساس ضریب نزدیکی

سطح عملکرد نسبی	دامنه CC_i	تعداد کمباین	سهم از کل (درصد)
خیلی بالا	۰/۷۰۲۸۴ < CC_i ≤ ۰/۸۳۵۸۹	۱	۵/۸۸
بالا	۰/۵۶۹۷۹ < CC_i ≤ ۰/۷۰۲۸۴	۹	۵۲/۹۴
متوسط	۰/۴۳۶۷۵ < CC_i ≤ ۰/۵۶۹۷۹	۶	۳۵/۲۹
پایین	۰/۳۰۳۷۰ < CC_i ≤ ۰/۴۳۶۷۵	۰	۰
خیلی پایین	۰/۱۷۰۶۵ ≤ CC_i ≤ ۰/۳۰۳۷۰	۱	۵/۸۸

الگوی توزیع نشان داد که عملکرد نسبی مدل‌ها عمدتاً در سطوح بالا و متوسط متمرکز است. قرار گرفتن تنها یک مدل در سطح خیلی بالا، همراه با تمرکز نزدیک به نیمی از مدل‌ها در سطح بالا، بیانگر تمایز گزینه برتر از بخش عمده گزینه‌ها و در عین حال نزدیکی عملکرد نسبی تعداد زیادی از مدل‌های میانی است. خالی ماندن سطح پایین نیز ناشی از فاصله موجود در توزیع مقادیر CC_i بین مدل دارای رتبه آخر و سایر مدل‌ها است. مدل‌های قرارگرفته در هر یک از سطوح عملکرد نسبی در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۴. مدل‌های کمباین در سطوح مختلف عملکرد نسبی

مدل‌های کمباین	سطح عملکرد نسبی
4LZ-4.0Z	خیلی بالا
4LZ-5.0, 4LZ-4.6, TH750C, 4LZ-2.5, ORYZA 9710, 4LZ-6D, GOLD PLUS, JF703W, 4LZ-4.0	بالا
IHP2100, 4LZ-2D NEW, AU2.0I-B, 4LZ-3.0, 4LZ-5.0D, 4LZ-5.0Q	متوسط
--	پایین
AW82GV	خیلی پایین

ویرایشی نشده

همان‌گونه که طبقه‌بندی مدل‌ها نشان می‌دهد، تفاوت رتبه‌های ترتیبی در بخش میانی لزوماً به معنای تفاوت چشمگیر در عملکرد نسبی نیست؛ زیرا چندین مدل با رتبه‌های متفاوت در یک سطح عملکرد قرار گرفتند. ازاین‌رو، استفاده هم‌زمان از رتبه TOPSIS و سطح عملکرد نسبی، امکان تمایز میان ترتیب اولویت و میزان تفاوت عملکردی گزینه‌ها را فراهم می‌کند. با این حال، این طبقه‌بندی صرفاً بر اساس دامنه مقادیر CC_i در میان ۱۷ مدل مورد بررسی تعریف شده است و نباید به‌عنوان ارزیابی مطلق کیفیت یا مناسب‌بودن مدل‌ها برای شرایط بهره‌برداری خاص تفسیر شود.

نتایج تحلیل حساسیت مدل ترکیبی FAHP–TOPSIS

نتایج تحلیل حساسیت با تغییر جداگانه ±۱۰ درصدی وزن هر یک از شش معیار در جدول ۵ ارائه شده است. بررسی سناریوها نشان داد که ساختار رتبه‌بندی، به‌ویژه در رأس آن، در برابر تغییرات اعمال‌شده پایدار بود؛ به‌طوری‌که گزینه دارای رتبه نخست (4LZ-4.0Z) در تمام سناریوها جایگاه خود را حفظ کرد. دامنه تغییر ضریب نزدیکی این گزینه نیز محدود بود و بین ۰/۸۲۳۲۱ و ۰/۸۴۸۹۰ قرار گرفت. ثبات رتبه نخست در همه سناریوها نشان می‌دهد که برتری این گزینه صرفاً ناشی از مقادیر اولیه وزن‌های FAHP نبوده و در دامنه تغییرات بررسی‌شده پایدار است.

جدول ۵. نتایج تحلیل حساسیت رتبه گزینه برتر (4LZ-4.0Z) با تغییر ±۱۰ درصدی وزن معیارها

سناریو	معیار تغییر یافته	تغییر وزن	ضریب نزدیکی (CC_i)	رتبه 4LZ-4.0Z
S0	حالت پایه FAHP	بدون تغییر	۰/۸۳۵۸۹	۱
S1	ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (C1)	+۱۰ درصد	۰/۸۲۳۲۱	۱
S2	ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (C1)	−۱۰ درصد	۰/۸۴۸۹۰	۱
S3	راندمان مزرعه‌ای(C2)	+۱۰ درصد	۰/۸۳۵۸۳	۱
S4	راندمان مزرعه‌ای(C2)	−۱۰ درصد	۰/۸۳۵۹۴	۱
S5	مصرف سوخت سطحی(C3)	+۱۰ درصد	۰/۸۳۵۱۴	۱
S6	مصرف سوخت سطحی(C3)	−۱۰ درصد	۰/۸۳۶۵۷	۱
S7	تلفات کل برداشت(C4)	+۱۰ درصد	۰/۸۴۱۰۶	۱
S8	تلفات کل برداشت(C4)	−۱۰ درصد	۰/۸۳۰۷۲	۱
S9	خلوص شلتوک(C5)	+۱۰ درصد	۰/۸۳۵۸۹	۱
S10	خلوص شلتوک(C5)	−۱۰ درصد	۰/۸۳۵۸۹	۱
S11	شکستگی شلتوک(C6)	+۱۰ درصد	۰/۸۴۴۰۵	۱
S12	شکستگی شلتوک(C6)	−۱۰ درصد	۰/۸۲۷۱۹	۱

میزان تأثیر تغییر وزن معیارها بر CC_i یکسان نبود. بیشترین تغییر در ضریب نزدیکی گزینه نخست در اثر تغییر وزن ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (C1) مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که افزایش وزن این معیار موجب کاهش و کاهش وزن آن موجب افزایش CC_i شد. این الگو با عملکرد گزینه نخست در C1 قابل تبیین است، زیرا این مدل در این معیار دارای بهترین عملکرد نبود؛ درنتیجه افزایش سهم C1 در ساختار وزن‌ها از مزیت نسبی آن کاست. در مقابل، افزایش وزن تلفات کل برداشت (C4) و شکستگی شلتوک (C6) موجب افزایش CC_i گزینه نخست شد که با عملکرد مطلوب آن در این دو معیار و اهمیت آنها در ساختار تصمیم‌گیری سازگار است. تغییر وزن سایر معیارها اثر محدودتری بر ضریب نزدیکی گزینه نخست داشت.

در مجموع، حفظ رتبه نخست در تمامی سناریوها و محدود بودن دامنه تغییرات CC_i بیانگر پایداری رتبه گزینه برتر نسبت به تغییرات ±۱۰ درصدی وزن معیارها است. با این حال، این نتیجه باید در محدوده سناریوهای بررسی‌شده تفسیر شود و به معنای عدم حساسیت مدل در برابر تغییرات بزرگ‌تر یا الگوهای متفاوت تغییر وزن‌ها نیست.

بررسی استحکام و توافق نتایج با روش VIKOR

ویرایشاری نشده

به‌منظور بررسی استحکام رتبه‌بندی حاصل از FAHP–TOPSIS، ۱۷ مدل کمباین با روش VIKOR نیز رتبه‌بندی شدند. برای امکان مقایسه مستقیم، همان ماتریس تصمیم، ماهیت معیارها و وزن‌های حاصل از FAHP در هر دو روش به‌کار گرفته شد. در محاسبات VIKOR با در نظر گرفتن ضریب سازش $v = ۰/۵$، شاخص‌های مطلوبیت گروهی (S_i)، بیشینه نارضایتی (R_i) و شاخص سازشی (Q_i) محاسبه شدند؛ در این روش، مقدار کمتر Q_i نشان‌دهنده اولویت بیشتر گزینه است. نتایج VIKOR و مقایسه رتبه‌های حاصل از آن با TOPSIS در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. نتایج رتبه‌بندی مدل‌های کمباین برداشت برنج با روش VIKOR و مقایسه با TOPSIS

رتبه VIKOR	مدل کمباین	S_i	R_i	Q_i	رتبه TOPSIS	اختلاف رتبه
۱	4LZ-4.0Z	۰/۲۸۶۰	۰/۱۵۳۲	۰/۰۰۰۰	۱	۰
۲	4LZ-5.0	۰/۴۵۰۸	۰/۲۱۴۶	۰/۳۳۳۳	۲	۰
۳	4LZ-4.6	۰/۳۹۲۵	۰/۲۶۸۸	۰/۴۰۲۵	۳	۰
۴	TH750C	۰/۴۹۹۵	۰/۲۵۱۰	۰/۴۷۶۹	۴	۰
۵	IHP2100	۰/۴۷۲۷	۰/۲۸۷۵	۰/۵۳۶۹	۱۱	۶
۶	4LZ-2.5	۰/۵۰۲۵	۰/۲۷۹۴	۰/۵۵۰۰	۵	۱
۷	GOLD PLUS	۰/۴۷۵۸	۰/۲۹۵۶	۰/۵۶۰۳	۸	۱
۸	ORYZA 9710	۰/۵۱۸۵	۰/۲۸۱۸	۰/۵۷۳۷	۶	۲
۹	4LZ-4.0	۰/۴۸۱۴	۰/۳۰۴۹	۰/۵۸۹۵	۱۰	۱
۱۰	4LZ-6D	۰/۴۷۱۲	۰/۳۱۱۸	۰/۵۹۵۱	۷	۳
۱۱	4LZ-2D NEW	۰/۵۳۳۷	۰/۲۹۲۷	۰/۶۲۸۴	۱۲	۱
۱۲	AU2.0I-B	۰/۵۴۵۸	۰/۲۹۵۶	۰/۶۳۷۷	۱۳	۱
۱۳	JF703W	۰/۵۸۳۴	۰/۲۸۳۴	۰/۶۴۹۴	۹	۴
۱۴	4LZ-5.0D	۰/۶۱۶۲	۰/۳۰۳۷	۰/۷۳۵۵	۱۵	۱
۱۵	AW82GV	۰/۷۳۸۲	۰/۲۵۵۱	۰/۷۵۰۸	۱۷	۲
۱۶	4LZ-3.0	۰/۶۶۷۹	۰/۲۹۹۶	۰/۷۸۲۸	۱۴	۲
۱۷	4LZ-5.0Q	۰/۶۸۰۷	۰/۳۵۶۳	۰/۹۳۶۴	۱۶	۱

بررسی الگوی رتبه‌بندی نشان داد که نتایج دو روش در بخش بالایی رتبه‌بندی از ثبات زیادی برخوردار است؛ چهار گزینه نخست در هر دو روش ترتیب یکسانی داشتند. در مقابل، جابه‌جایی‌هایی در بخش میانی مشاهده شد که بیشترین آن مربوط به IHP2100 و JF703W بود. این تفاوت‌ها را می‌توان ناشی از منطق متفاوت دو روش در تجمیع عملکرد معیارها دانست؛ TOPSIS مطلوبیت گزینه‌ها را بر اساس نزدیکی همزمان به راه‌حل ایده‌آل مثبت و دوری از راه‌حل ایده‌آل منفی تعیین می‌کند، در حالی‌که VIKOR بر ایجاد سازش میان مطلوبیت گروهی و بیشینه نارضایتی استوار است. بنابراین، تغییرات محدود در رتبه‌های میانی، در کنار ثبات گزینه‌های بالای رتبه‌بندی، نشان‌دهنده تأثیر روش تجمیع بر گزینه‌هایی است که از نظر عملکرد چندمعیاره به یکدیگر نزدیک‌ترند.

بررسی شرایط راه‌حل سازشی VIKOR

برای تعیین راه‌حل سازشی، دو شرط مزیت قابل قبول و ثبات قابل قبول در تصمیم‌گیری بررسی شد. با توجه به ۱۷ گزینه، مقدار آستانه مزیت قابل قبول (DQ) برابر ۰/۰۶۲۵ بود. اختلاف Q_i میان دو گزینه نخست برابر ۰/۳۳۳۳ به دست آمد که بزرگ‌تر از DQ بود؛ بنابراین شرط مزیت قابل قبول برقرار شد. همچنین، گزینه نخست بر اساس Q_i، کمترین مقدار S_i را نیز داشت؛ در نتیجه شرط ثبات قابل قبول در تصمیم‌گیری نیز برقرار بود. بر این اساس، 4LZ-4.0Z به‌تنهایی به‌عنوان راه‌حل سازشی VIKOR تعیین شد.

ویراستاری نشده

توافق رتبه‌بندی‌های TOPSIS و VIKOR

برای ارزیابی کمی میزان توافق دو رتبه‌بندی، ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن محاسبه شد. مقدار r_s =۰/۹۰۱۹۶ نشان‌دهنده همبستگی مثبت و قوی میان رتبه‌های حاصل از TOPSIS و VIKOR بود. این میزان توافق، همراه با یکسان بودن چهار رتبه نخست و حفظ گزینه نخست در هر دو روش، نشان می‌دهد که ساختار کلی اولویت‌بندی نسبت به تغییر روش تصمیم‌گیری از TOPSIS به VIKOR از استحکام مناسبی برخوردار بوده است.

بحث

نتایج وزن‌دهی معیارها بر اساس قضاوت خبرگان نشان داد که در چارچوب ارزیابی چندمعیاره این پژوهش، معیارهای مرتبط با کاهش اتلاف محصول و حفظ کیفیت برداشت، در کنار ظرفیت انجام عملیات، از اهمیت زیادی برخوردارند. بیشترین اهمیت نسبی به تلفات کل برداشت اختصاص یافت و پس از آن ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای و شکستگی شلتوک قرار گرفتند. این الگو نشان‌دهنده اهمیت کاهش تلفات و حفظ کیفیت محصول در کنار ظرفیت عملیاتی است و با مطالعاتی که اثر شرایط برداشت بر تلفات و شکستگی دانه را بررسی کرده‌اند، همخوانی دارد. علی‌محمدزاده و همکاران (۱۳۹۴) تلفات کمی کمباین‌های مختلف را در رطوبت‌های متفاوت محصول بررسی کردند و Chuanu-dom & Chinsuwan (2011) نیز اثر عوامل عملیاتی کمباین جریان محوری بر شکستگی دانه را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین، Mokhtor et al. (2020) در شرایط شالیزاری مالزی رابطه‌ای خطی میان سرعت پیشروی کمباین و تلفات دانه گزارش کردند و کمترین تلفات را در پایین‌ترین سرعت بررسی‌شده مشاهده نمودند. از سوی دیگر، Khan et al. (2024) در ارزیابی یک کمباین نیمه‌تغذیه برداشت برنج، مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی شامل ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای، راندمان مزرعه‌ای، تلفات، شکستگی دانه و مصرف سوخت را به‌طور هم‌زمان بررسی کردند. مطالعات صفری و همکاران (۱۳۹۲)، Elsoragaby et al. (2019) و Wagiman et al. (2019) نیز عملکرد مزرعه‌ای انواع کمباین‌های مورد استفاده در برداشت برنج را به‌صورت مقایسه‌ای ارزیابی کرده‌اند. مزیت رویکرد پژوهش حاضر در این است که این شاخص‌ها علاوه بر بررسی هم‌زمان، بر اساس اهمیت نسبی حاصل از قضاوت خبرگان وزن‌دهی و در یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره تجمیع شدند.

در پژوهشی درباره ارزیابی فناوری برداشت برنج، وزن معیارهای تلفات برداشت، ظرفیت ماشین و مصرف سوخت به‌ترتیب ۰/۱۲۳۵، ۰/۱۰۷۸ و ۰/۰۵۹۵ گزارش شد؛ درحالی‌که در پژوهش حاضر، وزن این معیارها به‌ترتیب ۰/۳۵۶۳، ۰/۲۰۳۹ و ۰/۱۱۵۸ به دست آمد. با توجه به تفاوت مجموعه معیارها، گزینه‌های مورد ارزیابی و قضاوت خبرگان، این مقادیر صرفاً برای مقایسه توصیفی ارائه شده‌اند. همچنین، در مطالعه مذکور، امتیاز رابطه خاکستری برای برداشت با کمباین ۰/۹۹۹۵ و برای ترکیب دروگر و خرمن‌کوب ۰/۵۶۴۸ گزارش شد (Qane'ei Kenarsari et al., 2024). بااین‌حال، به دلیل تفاوت در اهداف، گزینه‌ها و روش‌های تصمیم‌گیری، مقایسه مستقیم این امتیازها با ضرایب نزدیکی TOPSIS پژوهش حاضر امکان‌پذیر نیست.

تمرکز مدل‌ها در طبقات عملکرد نسبی بالا و متوسط و نزدیک بودن مقادیر ضرایب نزدیکی در بخش میانی رتبه‌بندی نشان داد که اختلاف چند رتبه میان برخی مدل‌ها الزاماً بیانگر تفاوت چشمگیر در عملکرد کلی آنها نیست. ازاین‌رو، در تفسیر نتایج علاوه بر رتبه ترتیبی، مقدار ضریب نزدیکی و سطح عملکرد نسبی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. طبقه‌بندی توصیفی انجام‌شده در این پژوهش امکان تفکیک ترتیب اولویت از میزان تفاوت عملکرد نسبی را فراهم کرد. با این حال، از آنجا که حدود طبقات بر اساس دامنه مقادیر مشاهده‌شده در همین مجموعه گزینه‌ها تعیین شد، این طبقه‌بندی ماهیتی نسبی دارد و نباید به‌عنوان معیاری برای مناسب یا نامناسب بودن مطلق یک مدل کمباین تفسیر شود.

تحلیل حساسیت نیز پایداری جایگاه گزینه برتر را در برابر تغییرات محدود وزن معیارها نشان داد. حفظ رتبه نخست در تمام سناریوهای تغییر ±۱۰ درصدی نسبی وزن معیارها بیانگر آن است که نتیجه اصلی رتبه‌بندی در محدوده تغییرات بررسی‌شده، به یک ترکیب مشخص از وزن‌های حاصل از FAHP وابسته نبوده است. در عین حال، اثر تغییر وزن معیارها یکسان نبود؛ تغییر وزن ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای بیشترین تأثیر را بر ضریب نزدیکی گزینه نخست داشت، در حالی‌که تغییر وزن تلفات کل برداشت و

ویرایش اولیه

شکستگی شلتوک نیز، با توجه به اهمیت این معیارها و عملکرد مطلوب گزینه نخست در آنها، بر مقدار ضریب نزدیکی اثر گذاشت. این موضوع نشان می‌دهد که حتی در صورت حفظ رتبه نخست، مقدار ضریب نزدیکی گزینه برتر می‌تواند تحت تأثیر تغییر اهمیت معیارها قرار گیرد؛ بنابراین، پایداری رتبه به معنای بی‌تأثیر بودن وزن معیارها بر نتایج نیست.

یکسان بودن چهار رتبه نخست و توافق بالای رتبه‌ای میان نتایج TOPSIS و VIKOR نشان داد که تغییر روش تصمیم‌گیری، ساختار اصلی اولویت‌بندی را به‌طور اساسی تغییر نداده است. در مقابل، جابه‌جایی برخی گزینه‌های میانی را می‌توان با تفاوت منطق دو روش توضیح داد. TOPSIS بر ارزیابی گزینه‌ها بر اساس فاصله از راه‌حل‌های ایده‌آل استوار است، در حالی‌که VIKOR راه‌حل سازشی را با توجه به مطلوبیت گروهی و بیشینه نارضایتی فردی تعیین می‌کند (Opricovic & Tzeng, 2004). ازاین‌رو، جابه‌جایی برخی گزینه‌های میانی، به‌ویژه گزینه‌هایی که عملکرد آنها در معیارهای مختلف یکنواخت نیست، قابل انتظار است و لزوماً به معنای بی‌ثباتی ساختار کلی رتبه‌بندی نیست. برقراری هر دو شرط پذیرش راه‌حل سازشی VIKOR نیز انتخاب مدل 4LZ-4.0Z را به‌عنوان گزینه سازشی این روش تأیید کرد؛ بااین‌حال، توافق دو روش به‌تنهایی به معنای تأیید مستقل صحت داده‌های اولیه نیست.

با وجود پایداری جایگاه گزینه برتر در تحلیل حساسیت و توافق قابل‌توجه نتایج TOPSIS وVIKOR ، در تفسیر و تعمیم رتبه‌بندی باید محدودیت‌های ناشی از شرایط گردآوری داده‌ها مورد توجه قرار گیرد. ازآنجاکه مدل‌های کمباین در شرایط زراعی، محیطی و بهره‌برداری یکسان ارزیابی نشده‌اند و تکرار مستقل در سطح دستگاه وجود نداشته است، تفاوت‌های مشاهده‌شده در عملکرد آن‌ها را نمی‌توان صرفاً به ویژگی‌های فنی مدل‌ها نسبت داد. بنابراین، رتبه‌بندی حاصل نشان‌دهنده اولویت نسبی ۱۷ مدل کمباین در چارچوب شش معیار منتخب، وزن‌های تعیین‌شده و داده‌های موجود است و به‌تنهایی برتری قطعی یا ذاتی یک مدل را نسبت به سایر مدل‌ها در شرایط یکسان اثبات نمی‌کند. این محدودیت، ضرورت انجام آزمون‌های مقایسه‌ای با شرایط استاندارد و تکرارهای مستقل را برای دستیابی به نتایج قابل تعمیم‌تر نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، چارچوب ترکیبی FAHP–TOPSIS برای ارزیابی چندمعیاره ۱۷ مدل کمباین برداشت برنج به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که در ارزیابی عملکرد کمباین، کاهش تلفات محصول در کنار ظرفیت انجام عملیات و حفظ کیفیت شلتوک از اهمیت زیادی برخوردار است و اتکا به یک شاخص منفرد نمی‌تواند مبنای مناسبی برای مقایسه جامع مدل‌ها باشد. بر اساس مجموعه معیارها و وزن‌های مورد استفاده، کمباین برداشت برنج مدل 4LZ-4.0Z بالاترین اولویت نسبی را به دست آورد. حفظ جایگاه این مدل در تمام سناریوهای تحلیل حساسیت و کسب رتبه نخست در VIKOR و احراز شرایط پذیرش راه‌حل سازشی، همراه با ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن ۰/۹۰۱۹۶ میان دو رتبه‌بندی، از پایداری نسبی نتیجه اصلی در محدوده تحلیل‌های انجام‌شده حمایت کرد.

با توجه به تفاوت شرایط اندازه‌گیری و نبود تکرار مستقل در سطح دستگاه، نتایج رتبه‌بندی حاضر نباید به‌عنوان اثبات برتری قطعی یک مدل کمباین نسبت به سایر مدل‌ها در شرایط یکسان یا تمامی شرایط برداشت تفسیر شود. بااین‌حال، یکی از دستاوردهای اصلی پژوهش، به‌کارگیری چارچوبی نظام‌مند برای تعیین اهمیت نسبی معیارهای عملکردی و تجمیع آن‌ها به‌منظور اولویت‌بندی چندمعیاره مدل‌های کمباین برداشت برنج است. این چارچوب می‌تواند به‌عنوان ابزاری تصمیم‌یار در مطالعات آینده، با استفاده از داده‌های حاصل از آزمون‌های استاندارد، شرایط زراعی و بهره‌برداری همسان، آزمون چند دستگاه مستقل از هر مدل و انجام تکرارهای کافی اندازه‌گیری به کار گرفته شود. چنین رویکردی می‌تواند با کاهش تأثیر عوامل کنترل‌نشده، اعتبار مقایسه‌ها و قابلیت تعمیم نتایج را افزایش دهد.

همچنین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، علاوه بر معیارهای فنی و کیفی، شاخص‌های اقتصادی مانند هزینه مالکیت و بهره‌برداری، شاخص‌های قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری و معیارهای زیست‌محیطی نیز در چارچوب تصمیم‌گیری وارد شوند. بررسی عملکرد کمباین‌ها در ارقام مختلف برنج و شرایط متفاوت رطوبتی محصول و مزرعه نیز می‌تواند زمینه توسعه و به‌کارگیری جامع‌تر این چارچوب برای انتخاب کمباین متناسب با شرایط بهره‌برداری را فراهم کند.

ویرایش نشده

منابع

الماسی، مرتضی، کیانی، شهرام و لویمی، نعیم. (۱۳۹۳). *مبانی مکانیزاسیون کشاورزی*. چاپ پنجم. انتشارات گفتمان اندیشه معاصر.

بنائیان، نرگس، پیمان، سیدحسین، قانعی، حمیدرضا، بامداد، مهدی، مصری، آرش. و عزیزی، مهران. (۱۳۹۸). انتخاب تکنولوژی پایدار به کمک روش تلفیقی تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی؛ مطالعه موردی فناوری برداشت برنج. دوازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران.

حسن‌جانی، حسین، حسینی، مریم، خادم الحسینی، نصرت اله و علیزاده، محمد رضا. (۱۳۸۶). ارزیابی روشهای مختلف برداشت برنج در استان گیلان. *مجله کشاورزی*. ۹(۱)، ۲۳-۳۸.

صفری، محمود؛ علیزاده، محمدرضا و گرامی، کریم. (۱۳۹۲). مقایسه سه نوع کمباین متداول برنج در منطقه مازندران. *تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*. ۱۴(۴)، ۷۳-۸۶. doi: 10.22092/aridse.2014.102101

طباطبایی کلور، رضا؛ آقا گل‌زاده، حمید و بخشی، بهزاد. (شهریور، ۱۳۹۱). *آزمون و ارزیابی مزرعه ای کمباین خودگردان برداشت برنج از نوع تغذیه کامل مدل (4LZ-2A)*. هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، شیراز. https://civilica.com/doc/180858.

علی محمدزاده، سبلان؛ شمس آبادی، حسینعلی؛ آزادبخت، محسن و رزاقی، محمدحسین. (۱۳۹۴). مقایسه تلفات کمی کمباین‌های مختلف در برداشت برنج با رطوبت‌های مختلف. *یافته های تحقیقاتی در بهبود تولیدات گیاهان* زراعی. ۱(۱)، ۱۳-۲۸.

قدسی پور، حسن. (۱۳۹۸). *فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)*. چاپ سیزدهم. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

REFERENCES

Alimohammadzadeh, S., Shamsabadi, H., Azadbakht, M., & Razaghi, M. (2015). Comparison of different combines quantitative losses in rice harvesting with different humidity. *Research Achievement for Improvement Crop Production*, *1*(1), 13–28. (in Persian).

Allameh, A., & Alizadeh, M. R. (2020). Rice losses characteristics in various harvesting methods. *AGROFOR International Journal*, *5*(1), 94–103. https://doi.org/10.7251/AGRENG2001094A.

Almassi, M., Kiani, S., & Loveimi, N. (2015). *Principles of Agricultural Mechanization*. Gofteman Andishieh Maaser Press. Iran. (in Persian).

Banaeian, N., Payman, S. H., Qane'ei, H., Bamdad, M., Mesri, A., & Azizi, M. (2019). Choosing sustainable technology by using a fuzzy multi-criteria decision-making combined method – Case study of rice harvesting technology. *12th National Congress of Biosystems and Agricultural Mechanization Engineering of Iran*. (In Persian).

Banaeian, N., & Pourhejazy, P. (2020). Integrating sustainability into the machinery selection decisions in the agriculture sector. IEEE Engineering Management Review, 48(4), 167–173. https://doi.org/10.1109/EMR.2020.3008560.

Chuanu-dom, S., & Chinsuwan, W. (2011). Effects of operating factors of axial flow rice combine harvester on grain breakage. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, *33*(2), 221–225.

Elsoragaby, S., Yahya, A., Mahadi, M. R., Mat Nawi, N., & Mairghany, M. (2019). Comparative field performances between conventional combine and mid-size combine in wetland rice cultivation. *Heliyon*, *5*, e01427. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01427.

Ghodsipour, S. H. (2019). *Analytical hierarchy process (AHP)* (13th ed.). Amirkabir University Publication. (in Persian).

Gogus, O., & Boucher, T. O. (1997). A consistency test for rational weights in multi-criterion decision analysis with fuzzy pairwise comparisons. *Fuzzy Sets and Systems*, *86*(2), 129–138. https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00410-6

Goto, Y., Gonno, K., & Manthamkan, V. (1992). Performance test of rice combined harvesters. *Kasetsart Journal (Natural Sciences)*, *26*(5), 97–102.

Harrison, H. P. (1991). Rotor power and losses of an axial-flow combine. *Transactions of the ASAE*, *34*(1), 60–64. https://doi.org/10.13031/2013.31624.

Hasanjani, H., Hoseini, M., Khademolhosaini, N., & Alizadeh, M. (2007). Evaluation of harvesting methods of rice in Guilan province. *Journal of Agricultural Sciences*, *9*(1), 23–38. (in Persian).

Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981) *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag, New York. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9.

ویرایشاری

Ichikawa, T., & Sujiyama, T. (1986). Development of a new combine equipped with screw type threshing and separating mechanism. *Japan Agricultural Research Quarterly*, *20*, 31–37.

Ishizaka, A. (2014). Comparison of fuzzy logic, AHP, FAHP and hybrid fuzzy AHP for new supplier selection and its performance analysis. *International Journal of Integrated Supply Management*, *9*(1/2), 1–22. DOI: 10.1504/IJISM.2014.064353.

Khan, A. A., Haq, Z.-U., Asam, H. M., Khan, M. A., Zeeshan, A., Qamar, S., & Saad, A. (2024). Performance evaluation of half-feed rice combine harvester. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: A. Physical and Computational Sciences*, *61*(1), 81–88. https://doi.org/10.53560/PPASA(61-1)858.

Kyani, J., Ghasemi-Nejad-Raeini, M., & Marzban, A. (2025). Enhancing food security through reducing Champa rice losses: Assessing the impact of crop moisture and harvesting methods on yield quantity and quality. *PLOS ONE*, *20*(7), e0326846. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0326846.

Mokhtor, S. A., El Pebrian, D., & Johari, N. A. A. (2020). Actual field speed of rice combine harvester and its influence on grain loss in Malaysian paddy field. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *19*(6), 422–425. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.07.002.

Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, *156*(2), 445–455. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1.

Philippine National Standard (PNS/PAES 225:2015). Agricultural Machinery – Rice Combine Harvester – Methods of Test.

Qane'ei Kenarsari, H., Banaeian, N., & Khani, M. (2024). Selecting a sustainable array of machinery by integrating analytic hierarchy process with gray relational analysis. Operations Research and Decisions, 34(2), 109–119. https://doi.org/10.37190/ord240207.

Roy, S. K., Jusoff, K., Ismail, W. I. W., & Ahmad, D. (2001). Performance evaluation of a combine harvester in Malaysian paddy field. *Asia Pacific Advanced Network Meeting*, Penang, Malaysia.

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process.* McGraw-Hill.

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process* (2nd ed.). Springer**.** https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-3597-6.

Safari, M., Alizadeh, M., & Gerami, K. (2014). Comparison of three conventional rice combine harvesters in Mazandaran, Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, *14*(4), 73–86. https://doi.org/10.22092/aridse.2014.102101. (in Persian).

Sujan, M. H. K., Sarker, M. R., Sarkar, M. A. R., Sultana, M., Rahman, M. S., Ahammad, S., & Khan, M. (2025). Harnessing rice combine harvester adoption for sustainable agriculture in the Haor (wetland) ecosystem of Bangladesh. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, *69*(4), 836–854. https://doi.org/10.1111/1467-8489.70055.

Tabatabaei Kolour, R., Aghagolzadeh, H., & Bakhshi, B. (2012, September). *Field test and evaluation of a self-propelled full-feed rice combine harvester (Model 4LZ-2A). The 7th National Congress on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization, Shiraz, Iran.* https://civilica.com/doc/180858. (in Persian).

Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2024). A comprehensive survey and literature review on TOPSIS. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, *15*(1), 1–65. https://doi.org/10.4018/IJSSMET.347947.

Tzeng, G.-H., & Huang, J.-J. (2011). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. CRC Press.

Wagiman, N. A., Nawi, N. M., Yahya, A., Su, A. S. M., & Nasir, R. M. (2019). Field performance comparison of the combine harvesters utilized for rice harvesting in Malaysia. *Food Research*, *3*(2), 177–181.