

Ranking the Factors Affecting Rice Losses and Prioritizing Strategies for Rice Loss Reduction in Guilan Province Using a Hybrid FAHP–TOPSIS Model

ABSTRACT

Rice losses throughout the production-to-post-harvest chain represent one of the most critical agricultural challenges in Gilan Province, Iran, leading to reductions in both product quality and productivity. The present study aimed to identify and rank the factors affecting rice losses and to prioritize mitigation strategies. In terms of purpose, the study was applied research, while methodologically it adopted a descriptive–analytical approach. Given the multidimensional nature of the problem and the existence of both qualitative and quantitative criteria, a Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) framework was employed. In this regard, the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) was utilized to determine the weights of criteria and sub-criteria, whereas the TOPSIS technique was applied to prioritize mitigation strategies. The statistical population consisted of 20 experts and specialists in rice production, harvesting, and processing in Gilan Province, selected through purposive sampling.

The FAHP results revealed that the post-harvest criterion received the highest weight (0.321), while product drying as a sub-criterion obtained the highest global weight (0.124). Managerial and human-related factors were also identified as highly influential determinants of rice losses. The TOPSIS analysis indicated that the most effective mitigation strategies were the development of mechanized and standardized dryers ($CC_i = 0.6075$), modernization of harvesting and rice milling machinery ($CC_i = 0.5712$), and enhancement of farmers' technical knowledge and training ($CC_i = 0.5677$). The findings demonstrate that reducing rice losses requires an integrated technical, managerial, and educational approach. Policymakers should therefore prioritize investments and planning efforts toward post-harvest management, farmer training, and optimized mechanization systems.

Keywords:

Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP), Multi-Criteria Decision Making (MCDM), Post-harvest Management, Rice Losses, Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS).

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rice losses along the production-to-postharvest chain represent a significant challenge in Gilan province, leading to reduced product quality, lower yield, and economic losses for farmers. The issue of rice losses is complex and influenced by multiple interrelated factors, including managerial, human, technical, agronomic, climatic, and economic conditions. Efficient management of these factors is essential for sustainable rice production and food security. Despite the critical importance of postharvest management and mechanization, a comprehensive scientific analysis of factors influencing rice losses and systematic prioritization of practical reduction strategies in Gilan province has been lacking. Therefore, this study aimed to identify and rank the key factors affecting rice losses and to prioritize actionable strategies to mitigate these losses using a multi-criteria decision-making approach.

Method

This research is applied in purpose and descriptive-analytical in methodology. Given the multidimensional nature of the problem and the presence of both quantitative and qualitative criteria, a combination of Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) was employed. FAHP was used to determine the weights of main criteria and sub-criteria influencing rice losses, while TOPSIS was applied to rank ten practical strategies for reducing these losses. The statistical population included 20 experts and specialists in rice production, harvesting, and postharvest processing in Gilan province, selected via purposive sampling to ensure sufficient practical knowledge across all stages of the rice production chain. Data were collected through structured questionnaires, pairwise comparisons for FAHP, and performance evaluations for TOPSIS. A hierarchical framework consisting of four levels (goal, main criteria, sub-criteria, and alternatives) was established to structure the decision-making process.

Results

The FAHP analysis revealed that the postharvest stage (C6, weight = 0.321) had the greatest impact on rice losses, with the sub-criterion drying (C61, weight = 0.124) being the most influential factor. Managerial and human factors (C1, weight = 0.279), particularly technical knowledge, water management, and scheduling operations, were identified as the second most important determinants, highlighting the need for farmer training and capacity building. Technical and mechanization factors (C2, weight = 0.155), including machine wear and dryer quality, also significantly affected rice losses, especially when combined with appropriate training and postharvest management. Climatic and agronomic factors had moderate influence, serving as enhancing or constraining factors, while economic and structural factors had the lowest weights but were necessary as supporting conditions for successful implementation of main strategies. TOPSIS results indicated that the most effective strategies for reducing rice losses were: developing mechanized and standardized dryers ($CC_i = 0.6075$), renewing harvesting and processing machinery ($CC_i = 0.5712$), and enhancing farmers' technical knowledge and training ($CC_i = 0.5677$). Strategies such as improving storage infrastructure, providing advisory services, and financial support had lower ranks and were considered

complementary measures. The analysis underscores the importance of a combined technical, managerial, and educational approach, suggesting that focusing exclusively on a single intervention is insufficient to achieve significant reduction in rice losses. These findings provide a clear, evidence-based framework for policymakers and stakeholders to prioritize interventions, allocate resources efficiently, and design effective postharvest management programs.

Conclusions

The study demonstrates that a multi-criteria decision-making approach combining FAHP and TOPSIS is a robust tool for evaluating complex agricultural problems like rice losses. Effective reduction of rice losses in Gilan province requires integrated strategies emphasizing postharvest management, farmer training, and mechanization improvements, supported by complementary measures such as storage infrastructure and financial facilitation. Implementing these prioritized strategies can enhance product quality, increase farmer income, and serve as a model for other regions and crops where postharvest losses are significant. The results provide actionable insights for policymakers, extension services, and agricultural managers to optimize decision-making and maximize the efficiency of interventions aimed at minimizing rice losses.

Author Contributions

XX: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing–review & editing, Project administration, Writing-Original Draft.

YY: Data curation, review & editing, Investigation.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical considerations

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

رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش ضایعات در استان گیلان با مدل ترکیبی FAHP-TOPSIS

چکیده

ضایعات برنج در زنجیره تولید تا پس از برداشت یکی از مهم‌ترین مسائل کشاورزی در استان گیلان است که موجب کاهش کیفیت و بهره‌وری محصول می‌شود. هدف این پژوهش، شناسایی و رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش آن بود. این مطالعه از نظر هدف کاربردی و از نظر روش، توصیفی-تحلیلی محسوب می‌شود و با توجه به چندبعدی بودن مسئله و وجود معیارهای کمی و کیفی، از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) بهره گرفت. در این راستا، روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) برای تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها و تکنیک TOPSIS برای رتبه‌بندی راهکارهای اجرایی به کار گرفته شد. جامعه آماری شامل ۲۰ نفر از خبرگان و متخصصان حوزه تولید، برداشت و فرآوری برنج در استان گیلان بود که با روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شدند. نتایج FAHP نشان داد که بیشترین وزن به معیار پس از برداشت (۰/۳۲۷) و زیرمعیار خشک کردن محصول (۰/۱۲۴) اختصاص دارد و معیارهای مدیریتی و انسانی نیز اهمیت بالایی دارند. تحلیل TOPSIS مؤثرترین راهکارها را شامل توسعه خشک‌کن‌های مکانیزه و استاندارد ($CC_i = 0.6075$)، نوسازی ماشین‌آلات برداشت و شالیکوبی ($CC_i = 0.5712$) و ارتقای دانش فنی و آموزش کشاورزان ($CC_i = 0.5677$) معرفی کرد. یافته‌ها نشان می‌دهد که کاهش ضایعات برنج نیازمند رویکرد ترکیبی فنی، مدیریتی و آموزشی است و سیاست‌گذاران باید سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی خود را بر مدیریت پس از برداشت، آموزش کشاورزان و مکانیزاسیون بهینه متمرکز کنند. این مطالعه می‌تواند به عنوان الگوی علمی و عملی برای مدیریت ضایعات محصولات کشاورزی در سایر استان‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها:

تصمیم‌گیری چندمعیاره، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تکنیک شباهت به گزینه ایده‌آل، ضایعات برنج، مدیریت پس از برداشت.

مجله علمی کشاورزی

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات راهبردی و تأمین‌کننده اصلی امنیت غذایی جهان است و غذای اصلی بخش قابل توجهی از جمعیت دنیا را تشکیل می‌دهد. افزایش تقاضا برای برنج باکیفیت، ضرورت بهبود مدیریت تولید، کاهش ضایعات و ارتقای بهره‌وری زنجیره تولید این محصول را بیش از پیش آشکار ساخته است (Okpala et al., 2020). در ایران نیز برنج پس از گندم، از مهم‌ترین محصولات غذایی محسوب می‌شود و استان گیلان به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی تولید برنج کشور، سهم قابل توجهی در تولید شلتوک و تأمین نیاز غذایی جامعه دارد. شرایط اقلیمی مناسب، سطح وسیع زیرکشت و وابستگی بخشی از اقتصاد کشاورزی استان به تولید برنج، اهمیت برنامه‌ریزی و مدیریت کارآمد در این بخش را دوچندان می‌کند (طاهرزاده شالمائی و همکاران، ۱۳۹۹).

با این حال، بخشی از محصول تولیدی در مراحل کاشت، برداشت و پس از برداشت دچار ضایعات می‌شود که علاوه بر کاهش درآمد کشاورزان، موجب اتلاف منابعی نظیر آب، خاک و انرژی و افزایش فشار بر منابع طبیعی می‌گردد. ضایعات برنج می‌تواند در مراحل برداشت، حمل‌ونقل، خشک‌کردن، فرآوری، انبارداری و توزیع رخ دهد و پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه داشته باشد.

در سال‌های اخیر، کاهش اتلاف و هدررفت مواد غذایی به یکی از اولویت‌های اصلی نظام‌های غذایی پایدار در جهان تبدیل شده است. بر اساس مطالعات بین‌المللی، بخش قابل توجهی از تولیدات کشاورزی در مراحل مختلف زنجیره تأمین، از تولید و برداشت تا فرآوری، نگهداری و مصرف، از چرخه بهره‌برداری خارج می‌شود. این مسئله علاوه بر کاهش دسترسی مؤثر به غذا، موجب هدررفت منابع ارزشمندی مانند آب، انرژی، نهاده‌های کشاورزی و نیروی انسانی می‌شود و آثار اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه دارد.

در محصولات غلات، به‌ویژه برنج، بخش مهمی از ضایعات در مراحل پس از برداشت شامل برداشت، حمل‌ونقل، خشک‌کردن، فرآوری و نگهداری رخ می‌دهد. مطالعات جهانی نشان داده‌اند که بهبود فناوری‌های پس از برداشت، توسعه مکانیزاسیون مناسب و ارتقای دانش بهره‌برداران از مهم‌ترین راهکارهای کاهش هدررفت و ضایعات محصول در زنجیره تولید برنج محسوب می‌شوند. با توجه به پیچیدگی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و ارتباط متقابل عوامل فنی، مدیریتی، اقتصادی و محیطی، شناسایی عوامل کلیدی و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش ضایعات نیازمند استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. از این‌رو، در پژوهش حاضر تلاش شده است با استفاده از مدل ترکیبی FAHP-TOPSIS، عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و راهکارهای کاهش آن در استان گیلان شناسایی و اولویت‌بندی شود.

اگرچه مطالعات متعددی درباره ضایعات محصولات کشاورزی و برنج انجام شده است، بیشتر پژوهش‌ها بر یک یا چند عامل خاص تمرکز داشته‌اند و بررسی هم‌زمان عوامل مدیریتی، فنی، اقتصادی، انسانی و محیطی و نیز اولویت‌بندی راهکارهای کاهش ضایعات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند چارچوب مناسبی برای تحلیل جامع این مسئله فراهم کند.

بیشتر تصمیم‌گیری‌ها در بخش کشاورزی تحت تأثیر عوامل کمی و کیفی متعددی قرار دارند که اغلب با یکدیگر در تعارض هستند (قدسی پور، ۱۳۹۸). به همین دلیل، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ (MCDM) به‌عنوان ابزارهایی کارآمد برای تحلیل مسائل پیچیده و اولویت‌بندی گزینه‌ها توسعه یافته‌اند. این روش‌ها امکان ارزیابی هم‌زمان معیارهای مختلف و انتخاب بهترین گزینه را فراهم ساخته و در مسائل کشاورزی و مدیریت منابع کاربرد گسترده‌ای دارند (Zhang & You, 2014). در این میان، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی^۲ (FAHP) و تکنیک رتبه‌بندی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل^۳ (TOPSIS) از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌شوند. روش FAHP با بهره‌گیری از نظریه مجموعه‌های فازی، عدم قطعیت و ابهام موجود در

1 - Multi-Criteria Decision Making

2 - Fuzzy Analytic Hierarchy Process

3 - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

قضاوت‌های انسانی را مدل‌سازی می‌کند و نسبت به روش AHP کلاسیک، توانایی بیشتری در مواجهه با داده‌های زبانی و قضاوت‌های ذهنی دارد (Chang, 1996). همچنین، روش TOPSIS گزینه‌ها را بر اساس فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی رتبه‌بندی کرده و گزینه‌ای را به‌عنوان بهترین انتخاب معرفی می‌کند که کمترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی داشته باشد (Hwang & Yoon, 1981).

بر این اساس، خلأ اصلی پژوهش حاضر، نبود یک چارچوب تحلیلی جامع برای شناسایی، وزن‌دهی و رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و راهکارهای کاهش آن با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای شناسایی، وزن‌دهی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و راهکارهای کاهش آن در استان گیلان است. در این چارچوب، عوامل مدیریتی و انسانی، فنی و مکانیزاسیون، زراعی و بیولوژیکی، اقلیمی و محیطی، اقتصادی و ساختاری و پس از برداشت به‌صورت هم‌زمان ارزیابی شده و راهکارهای کاهش ضایعات بر اساس دیدگاه خبرگان و معیارهای چندگانه اولویت‌بندی شده‌اند. همچنین، استفاده از تحلیل حساسیت، امکان بررسی پایداری نتایج حاصل از مدل تصمیم‌گیری را فراهم کرده است.

بنابراین، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و دسته‌بندی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج، تعیین وزن و اهمیت نسبی این عوامل با استفاده از روش FAHP و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش ضایعات برنج با بهره‌گیری از تکنیک TOPSIS در استان گیلان انجام شد.

پیشینه پژوهش

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که عوامل فنی و مکانیزاسیونی نقش مهمی در ایجاد ضایعات برنج دارند. روش نامناسب برداشت، فرسودگی ماشین‌آلات، تنظیم نادرست کمباین‌ها، ضعف عملکرد خشک‌کن‌ها و ناکارآمدی تجهیزات تبدیل از مهم‌ترین عوامل افزایش ضایعات در مراحل برداشت و پس از برداشت برنج محسوب می‌شوند (عسکری اصل‌ارده و راسخ، ۱۳۸۶) (Masato, 1980; Matthews & Spadaro, 1975). همچنین، زمان برداشت و میزان رطوبت دانه، تأثیر مستقیمی بر شکستگی و افت کیفیت برنج دارند و برداشت در رطوبت نامناسب می‌تواند میزان تلفات را افزایش دهد (Siebmorgen et al., 1995; Sajwan et al., 1992). افزون بر این، درصد خرد شدن برنج می‌تواند تحت تأثیر زمان و روش‌های برداشت، خشک کردن و فرایند تبدیل قرار گیرد (شاکر و همکاران، ۱۳۷۷). همچنین مدیریت و بهره‌برداری صحیح از ماشین‌آلات کشاورزی نیز نقش مهمی در کاهش ضایعات دارد؛ به‌طوری‌که انتخاب مناسب تجهیزات برداشت، نگهداری صحیح ماشین‌ها و تنظیم دقیق ادوات می‌تواند میزان افت محصول را کاهش دهد (مدرس رضوی، ۱۳۷۵) (Hunt, 1983; Srivastava et al., 1993).

مطالعه‌ای در استان گیلان نشان داد که عوامل زراعی، فنی، مهارتی، اقتصادی و سیاست‌گذاری در ایجاد ضایعات شکستگی برنج مؤثر هستند و رعایت زمان مناسب برداشت، استفاده از ماشین‌آلات مناسب، ارتقای مهارت اپراتورها و نوسازی تجهیزات شالیکوبی از مهم‌ترین راهکارهای کاهش ضایعات به‌شمار می‌روند. همچنین، عوامل اقتصادی بیشترین تأثیر را بر میزان ضایعات داشتند و ضرورت حمایت‌های مالی و آموزشی برای کاهش ضایعات برنج مورد تأکید قرار گرفت (Gourabjin et al., 2017).

پژوهش‌ها همچنین نشان داده‌اند که عوامل مدیریتی و انسانی نظیر سطح آگاهی، آموزش، دسترسی به ماشین‌آلات، اعتبارات و مدیریت مزرعه نقش مهمی در کاهش ضایعات محصولات کشاورزی دارند و در میان آن‌ها، آموزش و ارتقای دانش فنی کشاورزان بیشترین تأثیر را ایفا می‌کند (Omidi et al., 2014). علاوه بر این، توسعه فناوری‌های نگهداری، بهبود زیرساخت‌های ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل و بهبود مدیریت زنجیره تأمین از مهم‌ترین راهکارهای کاهش ضایعات محصولات غذایی معرفی شده‌اند (Martins et al., 2014; Bokusheva et al., 2012; Luo et al., 2020).

برخی مطالعات نشان داده‌اند که افزایش سطح مکانیزاسیون و یکپارچه‌سازی اراضی موجب افزایش کارایی عملیات برداشت و کاهش ضایعات می‌شود (Luo et al., 2022; Qu et al., 2021). همچنین، عواملی نظیر نوع و روش برداشت، شرایط آب‌وهوایی،

کمبود نیروی کار، کیفیت مدیریت مزرعه و میزان مکانیزاسیون از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ضایعات برداشت برنج هستند (Wu et al., 2017; Chegere, 2018; Hodges et al., 2011).

در سال‌های اخیر، مدل ترکیبی FAHP-TOPSIS در مطالعات مختلف کشاورزی، مدیریت منابع و ارزیابی سامانه‌های تولید مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های ترکیبی FAHP و TOPSIS می‌توانند در تحلیل مسائل پیچیده کشاورزی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی کاربرد مؤثری داشته باشند و دقت ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌ها را افزایش دهند (Özkan et al., 2019). همچنین، پژوهش‌هایی در زمینه مکانیزاسیون کشاورزی، پایداری نظام‌های زراعی، ارزیابی روش‌های وچین‌کاری و طرح‌های آبیاری و زهکشی، کارایی بالای این مدل‌ها را در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و کشاورزی تأیید کرده‌اند (حسن شاهی و همکاران، ۱۳۹۵؛ طاهرزاده شالمائی و همکاران، ۱۳۹۹؛ کشوری و مرزبان، ۱۳۹۸، نیک‌مهر و زیبایی، ۱۳۹۵). در پژوهشی دیگر، بهینه‌سازی سامانه‌های مکانیزاسیون پایدار در مزارع برنج با ترکیب روش‌های AHP و TOPSIS انجام شد و نتایج نشان داد این مدل توانایی بالایی در ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دارد (هرمزی و همکاران، ۱۴۰۱). همچنین، استفاده از ترکیب روش‌های Fuzzy AHP، Fuzzy TOPSIS و FMEA در مدیریت ریسک پروژه‌های کشاورزی نشان داد که مدل‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره و منطق فازی، توانایی بالایی در شناسایی، اولویت‌بندی و تحلیل ریسک‌های پیچیده بخش کشاورزی دارند (Zandi et al., 2020).

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف شناسایی و رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و اولویت‌بندی گزینه‌های (راهکارهای) کاهش آن در استان گیلان با استفاده از مدل ترکیبی فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) و تکنیک TOPSIS انجام شد.

معیارها و زیرمعیارهای مورد استفاده در این پژوهش از طریق مرور مطالعات علمی داخلی و خارجی مرتبط با ضایعات برنج، مدیریت پس از برداشت، مکانیزاسیون برداشت و فرآوری، عوامل مدیریتی و انسانی، شرایط اقلیمی و اقتصادی استخراج و سپس با نظر خبرگان بومی‌سازی شدند. با توجه به چندبعدی بودن مفهوم ضایعات برنج و نبود یک چارچوب واحد مورد توافق در مطالعات پیشین، فرایند استخراج و نهایی‌سازی معیارها و زیرمعیارها در دو مرحله انجام شد. چارچوب اولیه بر اساس مطالعات پیشین در زمینه ضایعات برنج، مدیریت پس از برداشت، مکانیزاسیون برداشت و فرآوری تدوین شد. مهم‌ترین منابع مورد استفاده شامل مطالعات (Araullo et al. (1976, Matthews & Spadaro (1975, Hunt (1983, Lu et al. (1995, Sajwan et al. (1992, Hodges et al. (2011, Martins et al. (2014, Wu et al. (2017, Gorabjiri et al. (2017, Luo et al. (2020, Luo et al. (2022), Stathers et al. (2025) و Castelein et al. (2022) بود.

در مرحله دوم، چارچوب اولیه استخراج‌شده از منابع علمی در اختیار ۲۰ نفر از خبرگان حوزه تولید، برداشت و فرآوری برنج استان گیلان قرار گرفت و پس از بررسی میزان ارتباط، جامعیت و تناسب معیارها با شرایط منطقه، اصلاحات پیشنهادی اعمال و ساختار نهایی معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌های تصمیم‌گیری تعیین شد.

بر این اساس، عوامل مؤثر بر ضایعات برنج در قالب شش معیار اصلی شامل مدیریتی و انسانی، فنی و مکانیزاسیون، زراعی و بیولوژیکی، اقلیمی و محیطی، اقتصادی و ساختاری و پس از برداشت طبقه‌بندی شدند. در مجموع، ۲۴ زیرمعیار مؤثر بر ضایعات و ۱۰ راهکار اجرایی کاهش ضایعات به‌عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری تعیین گردید. راهکارهای کاهش ضایعات بر اساس عوامل شناسایی‌شده در معیارها و زیرمعیارهای پژوهش و با تمرکز بر مراحل مختلف زنجیره تولید، برداشت و فرآوری برنج در استان گیلان تدوین شدند؛ بنابراین، گزینه‌های تصمیم‌گیری متناسب با عوامل مؤثر بر ضایعات برنج در منطقه مورد مطالعه بوده و صرفاً مجموعه‌ای از راهکارهای عمومی مدیریت کشاورزی نیستند.

ساختار معیارها و زیرمعیارهای پژوهش بر اساس ماهیت چندعاملی ضایعات برنج و ارتباط عوامل مؤثر در مراحل مختلف زنجیره تولید، برداشت و پس از برداشت طراحی شد. به عبارت دیگر، زیرمعیارهای هر دسته به‌عنوان مصادیق عملیاتی همان معیار اصلی در نظر گرفته شدند؛ به‌گونه‌ای که هر زیرمعیار نشان‌دهنده یک عامل قابل کنترل یا اثرگذار در همان حوزه بوده و ارتباط آن با

ایجاد، تشدید یا کاهش ضایعات برنج در مراحل مختلف زنجیره تولید، برداشت و فراوری بررسی شده است. معیار مدیریتی و انسانی بیانگر نقش دانش فنی، مهارت، آموزش و نحوه مدیریت عملیات تولید، برداشت و پس از برداشت توسط بهره‌برداران است که می‌تواند بر تصمیم‌گیری صحیح و کاهش خطاهای عملیاتی مؤثر باشد. معیار فنی و مکانیزاسیون شامل عوامل مرتبط با وضعیت، تنظیم، کارایی و تناسب ماشین‌آلات برداشت و فراوری برنج است که بر ریزش محصول، شکستگی دانه و کاهش کیفیت اثرگذار هستند. معیار زراعی و بیولوژیکی عوامل مرتبط با ویژگی‌های رقم، ورس، آفات و بیماری‌ها را شامل می‌شود که از طریق اثرگذاری بر استقرار بوته، مقاومت گیاه، سهولت برداشت و کیفیت محصول می‌توانند میزان تلفات پیش از برداشت و هنگام برداشت را تحت تأثیر قرار دهند. معیار اقلیمی و محیطی نقش شرایط آب‌وهوایی، به‌ویژه بارندگی، رطوبت و دمای محیط را در مراحل برداشت، خشک‌کردن و نگهداری محصول منعکس می‌کند. معیار اقتصادی و ساختاری نیز عوامل مرتبط با هزینه‌های تولید، دسترسی به خدمات، زیرساخت‌ها و شرایط اقتصادی مؤثر بر امکان اجرای مدیریت مناسب ضایعات را دربر می‌گیرد. در نهایت، معیار پس از برداشت شامل فرآیندهای خشک‌کردن، نگهداری، حمل‌ونقل و تبدیل برنج است که به‌طور مستقیم با ایجاد ضایعات کمی و کیفی محصول ارتباط دارد.

با توجه به ماهیت چندمعیاره مسئله ضایعات برنج و وجود معیارهای کمی و کیفی، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) ضروری بود. در این راستا، از روش FAHP برای وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها و مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان و از تکنیک TOPSIS برای رتبه‌بندی راهکارهای اجرایی بر اساس فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی استفاده شد. ترکیب این دو روش امکان وزن‌دهی معیارها با در نظر گرفتن عدم قطعیت قضاوت‌های خبرگان و اولویت‌بندی گزینه‌ها بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای چندگانه را فراهم ساخت. ساختار کلی مدل مفهومی پژوهش و مراحل اجرای فرآیند ترکیبی FAHP-TOPSIS در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. چارچوب مفهومی پژوهش و مراحل اجرای مدل ترکیبی FAHP-TOPSIS برای اولویت‌بندی راهکارهای کاهش ضایعات برنج (مجمع: نویسنده)

جامعه آماری پژوهش شامل کارشناسان سازمان جهاد کشاورزی، اعضای هیئت علمی دانشگاه‌ها و مؤسسات تحقیقاتی، متخصصان مکانیزاسیون و مدیران شالیکوبی و همچنین کشاورزان پیشرو استان گیلان بود که به‌صورت هدفمند انتخاب شدند. در مجموع، ۲۰ نفر از خبرگان دارای تجربه علمی و عملی در زمینه تولید، برداشت، فراوری و مدیریت برنج، هر دو پرسشنامه تخصصی پژوهش شامل پرسشنامه مقایسه زوجی فازی (FAHP) و پرسشنامه ارزیابی گزینه‌ها در روش TOPSIS را تکمیل نمودند. انتخاب خبرگان بر اساس هدف پژوهش، ضرورت پوشش دیدگاه‌های تخصصی مرتبط با مراحل مختلف زنجیره تولید، برداشت و فراوری برنج و ماهیت مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر قضاوت کارشناسی انجام شد. با توجه به ماهیت مطالعات تصمیم‌گیری

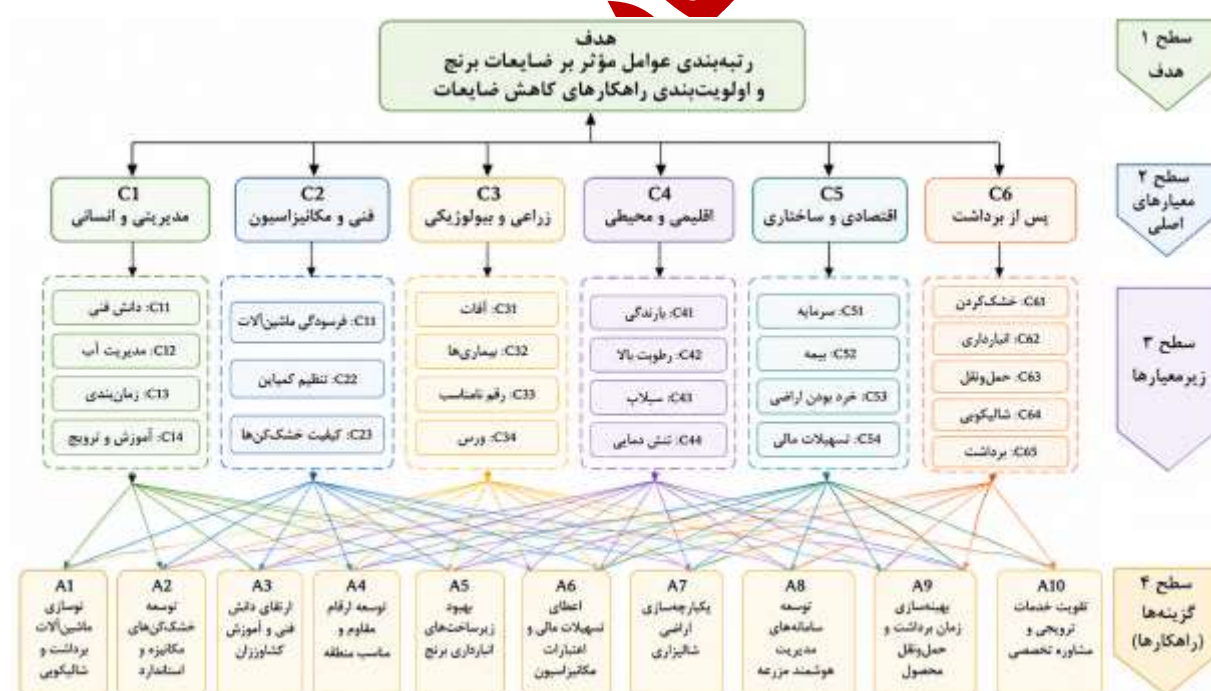
چندمعیاره مبتنی بر قضاوت خبرگان، تأکید اصلی بر تخصص و تنوع تجربی اعضای گروه خبرگان قرار دارد؛ از این رو، تلاش شد ترکیبی از تخصص‌های علمی، اجرایی و تجربی در گروه خبرگان لحاظ شود.

به منظور دستیابی به قضاوت گروهی و کاهش اثر تفاوت دیدگاه‌های تخصصی خبرگان، مقایسات زوجی ارائه‌شده توسط ۲۰ نفر از خبرگان با استفاده از روش میانگین هندسی تجمع گردید. در این روش، برای هر مقایسه زوجی بین دو معیار یا زیرمعیار، مقادیر ترجیحی ارائه‌شده توسط تمامی خبرگان ترکیب و ماتریس مقایسات زوجی گروهی تشکیل شد. استفاده از میانگین هندسی در مطالعات مبتنی بر AHP و FAHP به دلیل حفظ ویژگی‌های مقیاس ترجیحی و مناسب بودن برای تجمع قضاوت‌های گروهی، روشی متداول محسوب می‌شود.

داده‌های موردنیاز از طریق مطالعات اسنادی، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و پرسشنامه‌های تخصصی جمع‌آوری شد. روایی محتوایی چارچوب پیشنهادی و ابزارهای پژوهش با استفاده از نظر خبرگان حوزه تولید، برداشت و فرآوری برنج بررسی و تأیید گردید. همچنین، سازگاری قضاوت‌های زوجی با استفاده از نرخ ناسازگاری ($CR < 0.1$) ارزیابی شد.

ساختار مدل تصمیم‌گیری

به منظور تحلیل عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش آن، یک ساختار سلسله‌مراتبی چهارسطحی بر پایه مدل ترکیبی FAHP-TOPSIS طراحی شد (شکل ۲). در سطح نخست، هدف اصلی پژوهش شامل رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش ضایعات تعریف گردید. در سطح دوم، شش معیار اصلی پژوهش قرار گرفتند و در سطح سوم، ۲۴ زیرمعیار مرتبط با آن‌ها بر اساس مطالعات اسنادی و نظر خبرگان شناسایی شدند. در سطح چهارم نیز ۱۰ راهکار اجرایی کاهش ضایعات برنج به عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری انتخاب گردید.



شکل ۲. ساختار سلسله‌مراتبی مدل تصمیم‌گیری FAHP-TOPSIS برای رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش ضایعات (منبع: نویسنده)

در این ساختار، وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش FAHP و بر اساس قضاوت خبرگان انجام شد و سپس گزینه‌های اجرایی با بهره‌گیری از تکنیک TOPSIS رتبه‌بندی شدند.

تجمیع قضاوت‌های خبرگان و تشکیل ماتریس مقایسات زوجی گروهی

با توجه به تفاوت دیدگاه‌ها و تجربیات تخصصی اعضای گروه خبرگان، قضاوت‌های فردی ۲۰ خبره به‌منظور تشکیل ماتریس مقایسات زوجی گروهی تجمیع شد. در این پژوهش، برای ترکیب قضاوت‌های فردی و تشکیل ماتریس گروهی از میانگین هندسی استفاده گردید. به این صورت که برای هر مقایسه زوجی بین دو معیار یا زیرمعیار، مقادیر ترجیحی ارائه‌شده توسط تمامی خبرگان با استفاده از رابطه (۱) ترکیب شد:

$$a_{ij}^G = (a_{ij}^1 \times a_{ij}^2 \times \dots \times a_{ij}^n)^{1/n} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، a_{ij}^G مقدار ترجیح گروهی بین عنصر i و j ، a_{ij}^k قضاوت خبره k -ام و n تعداد خبرگان شرکت‌کننده در ارزیابی است.

استفاده از میانگین هندسی در پژوهش‌های مبتنی بر AHP و FAHP برای تجمیع قضاوت‌های گروهی و حفظ مقیاس ترجیحی مقایسات زوجی متداول است. پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسات زوجی گروهی، مراحل فازی‌سازی، محاسبه وزن‌های محلی و جهانی معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی انجام شد.

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)

با توجه به ماهیت چندمعیاره مسئله ضایعات برنج و وجود معیارهای کمی و کیفی همراه با عدم قطعیت در قضاوت‌های انسانی، از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) برای تعیین وزن نسبی معیارها و زیرمعیارهای مؤثر بر ضایعات برنج استفاده شد. این روش، توسعه‌یافته فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) ارائه شده توسط Saaty (1980) است که با تلفیق منطق فازی، امکان مدل‌سازی بهتر ابهام و عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان را فراهم می‌کند.

پس از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی گروهی، وزن نسبی معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش تحلیل گستره‌چانگ (Chang, 1996) محاسبه شد. در این فرآیند، قضاوت‌های زبانی خبرگان به اعداد فازی مثلثی تبدیل و وزن‌های محلی و جهانی عناصر تصمیم استخراج گردید.

برای بررسی میزان سازگاری قضاوت‌های خبرگان، نرخ ناسازگاری (CR) محاسبه شد و ماتریس‌هایی که مقدار CR آن‌ها کمتر از ۰/۱ بود، به‌عنوان ماتریس‌های قابل قبول در نظر گرفته شدند.

در پژوهش حاضر، FAHP به عنوان ابزاری برای تعیین اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و استخراج وزن معیارهای مورد استفاده در مرحله رتبه‌بندی گزینه‌ها به کار گرفته شد. بنابراین، نوآوری پژوهش حاضر در توسعه یک الگوریتم جدید تصمیم‌گیری نیست، بلکه در به کارگیری یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تحلیل هم‌زمان عوامل مؤثر بر ضایعات برنج، تعیین اهمیت نسبی آن‌ها و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش ضایعات در شرایط واقعی استان گیلان است.

در این پژوهش، برای انجام مقایسات زوجی معیارها و زیرمعیارها، از مقیاس ۹ درجه‌ای زبانی فازی استفاده شد که هر عبارت زبانی به یک عدد فازی مثلثی متناظر تبدیل گردید (جدول ۱).

جدول ۱. مقیاس زبانی و اعداد فازی مثلثی مورد استفاده در مقایسات زوجی FAHP (Ishizaka, 2014)

وضعیت مقایسه	اهمیت برابر	اهمیت کم تا متوسط	اهمیت متوسط	اهمیت متوسط تا زیاد	اهمیت زیاد	اهمیت زیاد تا خیلی زیاد	اهمیت خیلی زیاد	اهمیت کاملاً زیاد
عدد مثلثی (L,M,U)	(۱,۱,۱)	(۱,۲,۳)	(۲,۳,۴)	(۳,۴,۵)	(۴,۵,۶)	(۵,۶,۷)	(۶,۷,۸)	(۷,۸,۹)

تکنیک رتبه‌بندی ترجیحی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS)

پس از تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP)، از تکنیک رتبه‌بندی ترجیحی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل⁵ (TOPSIS) برای اولویت‌بندی راهکارهای کاهش ضایعات برنج استفاده شد. این روش توسط هوانگ و یون (Hwang and Yoon, 1981) ارائه شده و یکی از روش‌های پرکاربرد تصمیم‌گیری چندمعیاره برای رتبه‌بندی گزینه‌ها در شرایط وجود معیارهای متعدد است.

در روش TOPSIS، بهترین راهکار، گزینه‌ای است که کمترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی داشته باشد. بر این اساس، پس از تشکیل ماتریس تصمیم و اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده از روش FAHP، فاصله هر گزینه از راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه و ضریب نزدیکی نسبی هر گزینه (CC_i) تعیین گردید. در این پژوهش، وزن‌های استخراج‌شده از FAHP به‌عنوان وزن معیارهای تصمیم در مرحله TOPSIS استفاده شد تا اولویت‌نهایی راهکارهای کاهش ضایعات بر اساس اهمیت نسبی عوامل تعیین‌شده انجام گیرد.

در نهایت، گزینه‌ها بر اساس مقدار CC_i به‌صورت نزولی رتبه‌بندی شدند؛ به‌گونه‌ای که گزینه دارای بیشترین مقدار ضریب نزدیکی به‌عنوان مؤثرترین راهکار کاهش ضایعات برنج انتخاب شد.

یافته‌های پژوهش

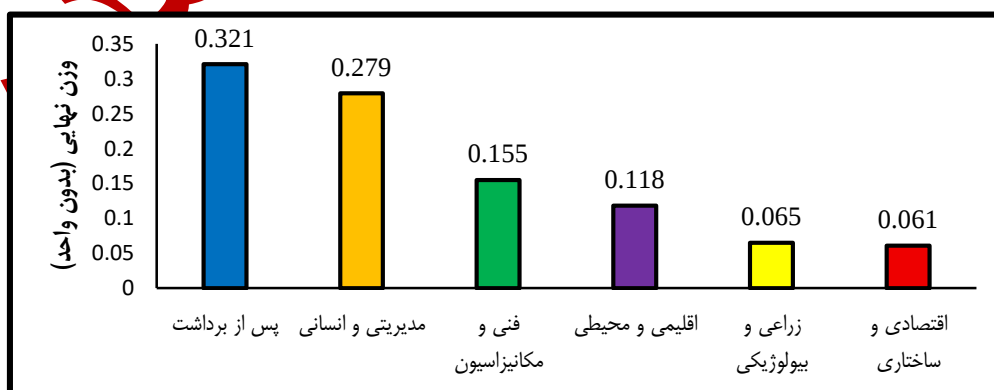
نتایج FAHP

وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها

با استفاده از روش FAHP و بر اساس قضاوت ۲۰ نفر از خبرگان حوزه کشاورزی و برنج، وزن‌نهایی معیارهای اصلی و زیرمعیارهای مؤثر بر ضایعات برنج در استان گیلان محاسبه شد. نرخ سازگاری (CR) ماتریس‌های مقایسات زوجی پس از تجمیع نظرات خبرگان محاسبه شد. در تمامی ماتریس‌ها، مقدار CR کمتر از ۰/۱۰ به دست آمد که نشان‌دهنده سازگاری قابل قبول قضاوت‌های زوجی خبرگان است. در ماتریس اصلی معیارها، مقدار CR برابر ۰/۰۹۴ به دست آمد. همچنین، در مرحله بررسی سازگاری ماتریس قطعی‌شده حاصل از تبدیل اعداد فازی، مقدار CR برابر با ۰/۰۳۴ محاسبه شد که هر دو مقدار کمتر از حد آستانه تعیین‌شده در فرآیند FAHP هستند.

وزن و تحلیل اهمیت معیارهای اصلی مؤثر بر ضایعات برنج

در شکل ۳ وزن‌نهایی و رتبه معیارهای اصلی مؤثر بر ضایعات برنج ارائه شده است.



شکل ۳. نمودار وزن معیارهای اصلی مؤثر بر ضایعات برنج

نتایج نشان داد که معیار پس از برداشت (C6) با وزن ۰/۳۲۱ بیشترین اهمیت را در میان معیارهای مورد بررسی دارد. این نتیجه بیانگر آن است که از دیدگاه خبرگان، مراحل پس از برداشت شامل خشک کردن، نگهداری، حمل و نقل و فرآوری، بیشترین ظرفیت ایجاد یا کاهش ضایعات برنج در استان گیلان را دارند. شرایط اقلیمی مرطوب استان گیلان، وابستگی بخش زیادی از شالیکاران به مراکز خدماتی خشک کنی و شالیکوبی و همچنین حساسیت دانه برنج به شکستگی در فرآیند تبدیل، سبب می شود که مدیریت صحیح عملیات پس از برداشت نقش تعیین کننده ای در کاهش ضایعات داشته باشد. بنابراین، بهبود فناوری های خشک کردن، تنظیم صحیح فرآیند تبدیل و ارتقای شرایط نگهداری می تواند بیشترین اثر را در کاهش ضایعات برنج داشته باشد.

معیار مدیریتی و انسانی (C1) با وزن ۰/۲۷۹ در رتبه دوم قرار گرفت. اهمیت بالای این معیار نشان می دهد که تصمیمات مدیریتی و نحوه اجرای عملیات توسط بهره برداران نقش قابل توجهی در ایجاد یا کاهش ضایعات برنج دارد. در این معیار، عواملی مانند مدیریت آب، زمان بندی عملیات و دانش و مهارت بهره برداران مورد توجه قرار گرفته اند. مدیریت نامناسب آب در مراحل مختلف رشد گیاه می تواند موجب ورس، تأخیر در رسیدگی محصول یا افزایش حساسیت بوته ها به خوابیدگی شده و در نهایت با دشوار کردن برداشت، میزان ریزش و تلفات محصول را افزایش دهد. همچنین، زمان بندی نامناسب عملیات، به ویژه تأخیر در برداشت، می تواند باعث افزایش بیش رسیدگی، ترک خوردگی دانه، افزایش ریزش پیش از برداشت و کاهش کیفیت محصول شود. از سوی دیگر، آشنایی ناکافی بهره برداران با اصول مدیریت مزرعه، زمان مناسب برداشت، نحوه آماده سازی مزرعه و نظارت بر عملیات برداشت و پس از برداشت می تواند احتمال بروز خطاهای عملیاتی و افزایش ضایعات را افزایش دهد. بنابراین، نقش عامل انسانی در این پژوهش به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر کیفیت تصمیم گیری و اجرای صحیح عملیات در زنجیره تولید برنج در نظر گرفته شده است.

معیار فنی و مکانیزاسیون (C2) با وزن ۰/۱۵۵ در رتبه سوم قرار گرفت. این معیار شامل عوامل مرتبط با عملکرد و وضعیت ماشین آلات مورد استفاده در مراحل برداشت و فرآوری برنج، از جمله کمباین های برداشت برنج، تجهیزات انتقال شلتوک و ماشین آلات شالیکوبی است. نتایج نشان می دهد که فرسودگی ماشین آلات، تنظیم نامناسب اجزای کاری کمباین (مانند ارتفاع برش، سرعت واحد کوبنده و فاصله کوبنده-ضد کوبنده) و استفاده از تجهیزات نامتناسب با شرایط مزرعه می تواند موجب افزایش ریزش مزرعه ای، آسیب مکانیکی دانه و افزایش درصد شکستگی در فرآیند فرآوری شود. همچنین، عملکرد نامناسب تجهیزات شالیکوبی و خشک کردن می تواند کیفیت محصول نهایی و میزان ضایعات پس از برداشت را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، بهبود تنظیم و نگهداری ماشین آلات، استفاده از تجهیزات متناسب با شرایط تولید برنج در استان گیلان و ارتقای فناوری های برداشت و فرآوری، از جمله اقدامات مؤثر برای کاهش ضایعات در زنجیره تولید برنج محسوب می شود.

معیار اقلیمی و محیطی (C4) با وزن ۰/۱۱۸ در رتبه چهارم قرار گرفت. این معیار شامل عواملی مانند بارندگی، رطوبت نسبی بالا و شرایط دمایی نامناسب در مراحل برداشت و پس از برداشت است. بارندگی در زمان برداشت می تواند موجب تأخیر در برداشت، افزایش رطوبت دانه، دشوار شدن ورود ماشین آلات به مزرعه و افزایش ریزش محصول در هنگام برداشت شود. همچنین، رطوبت بالای دانه پس از برداشت، در صورت نبود ظرفیت کافی خشک کردن یا تأخیر در فرآیند خشک سازی، احتمال کاهش کیفیت، افزایش ترک خوردگی دانه در مراحل بعدی و ایجاد ضایعات کمی و کیفی را افزایش می دهد. تنش های دمایی نیز می تواند با تأثیر بر زمان رسیدگی محصول و شرایط نگهداری، بر کیفیت دانه و میزان ضایعات اثر گذار باشند. بنابراین، اگرچه عوامل اقلیمی خارج از کنترل مستقیم بهره برداران هستند، اما اثر آن ها بر ضایعات می تواند از طریق تصمیم گیری صحیح در زمان برداشت، هماهنگی ظرفیت برداشت و خشک کردن، و انتخاب روش های مناسب مدیریت محصول پس از برداشت کاهش یابد.

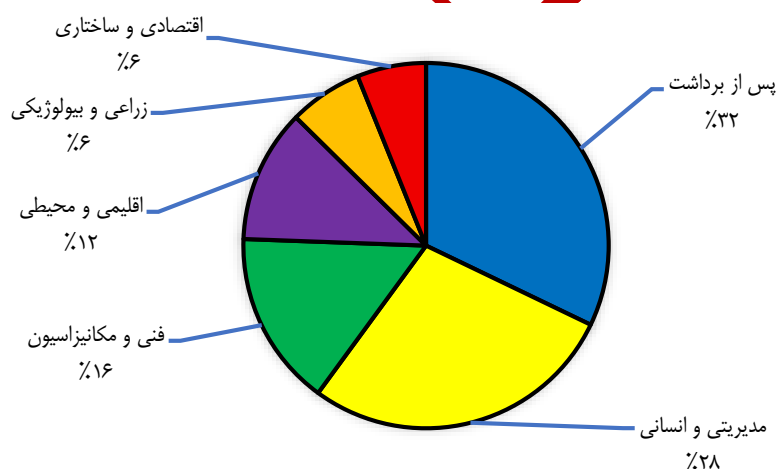
معیار زراعی و بیولوژیکی (C3) با وزن ۰/۰۶۵ در رتبه پنجم قرار گرفت. این معیار شامل عواملی نظیر ویژگی های رقم، ورس، آفات و بیماری ها است که مستقیماً با ویژگی های گیاه، شرایط زیستی محصول و فرآیند تولید در مزرعه ارتباط دارند. اگرچه مدیریت صحیح این عوامل (مانند انتخاب رقم مناسب، کنترل آفات و بیماری ها و مدیریت تغذیه و آب) توسط بهره بردار می تواند بر میزان اثرگذاری آن ها تأثیر بگذارد، اما در این پژوهش ماهیت اصلی این عوامل به عنوان عوامل زراعی و بیولوژیکی در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال، ورس می تواند با افزایش دشواری برداشت مکانیزه، موجب افزایش ریزش محصول شود؛ همچنین، حساسیت

رقم به خوابیدگی، آفات یا بیماری‌ها می‌تواند کیفیت دانه و قابلیت برداشت محصول را تحت تأثیر قرار دهد. وزن کمتر این معیار نسبت به عوامل مدیریتی و پس از برداشت نشان می‌دهد که در شرایط استان گیلان، اثر مستقیم این عوامل بر ضایعات نهایی در مقایسه با مشکلات مدیریتی، برداشت و فرآوری کمتر ارزیابی شده است، هرچند نقش آن‌ها در ایجاد زمینه برای افزایش ضایعات قابل توجه است.

در نهایت، معیار اقتصادی و ساختاری (C5) با وزن ۰/۰۶۱ کمترین اهمیت نسبی را در مدل به خود اختصاص داد. با وجود وزن کمتر، این معیار نقش زمینه‌ای و پشتیبان دارد؛ زیرا دسترسی به سرمایه، خدمات مکانیزاسیون، زیرساخت‌های فرآوری و شرایط اقتصادی می‌تواند امکان اجرای راهکارهای کاهش ضایعات را فراهم یا محدود کند.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در شرایط استان گیلان، بخش قابل توجهی از ضایعات برنج بیش از آنکه صرفاً ناشی از عوامل زراعی باشد، تحت تأثیر فرآیندهای پس از برداشت، مدیریت عملیات و نحوه استفاده از فناوری‌ها قرار دارد. از این رو، سیاست‌های کاهش ضایعات باید بر بهبود زنجیره پس از برداشت، آموزش بهره‌برداران و ارتقای مدیریت ماشین‌آلات و فرآیندهای فرآوری متمرکز شود.

شکل ۴ نشان می‌دهد که توزیع اهمیت معیارهای مؤثر بر ضایعات برنج متوازن نیست و بخش عمده وزن مدل به تعداد محدودی از عوامل اختصاص یافته است. نتایج سهم معیارها نشان داد که معیارهای پس از برداشت (۳۲/۱ درصد) و مدیریتی و انسانی (۲۷/۹ درصد) در مجموع حدود ۶۰ درصد از وزن کل مدل را به خود اختصاص داده‌اند. این موضوع بیانگر آن است که در شرایط تولید برنج استان گیلان، بخش مهمی از ظرفیت کاهش ضایعات در مراحل پس از برداشت و در نحوه تصمیم‌گیری و اجرای عملیات توسط بهره‌برداران و عوامل زنجیره تولید قرار دارد.



شکل ۴. نمودار سهم معیارهای اصلی مؤثر بر ضایعات برنج

این توزیع نشان می‌دهد که بیشترین وزن تصمیم‌گیری مدل به عوامل مرتبط با پس از برداشت و مدیریت بهره‌برداران اختصاص یافته است. همچنین، وزن بالای معیار مدیریتی و انسانی بیانگر نقش تصمیمات مدیریتی، از جمله زمان‌بندی برداشت، مدیریت شرایط مزرعه، انتخاب روش مناسب برداشت و نظارت بر فرآیندهای پس از برداشت در کاهش یا تشدید ضایعات است.

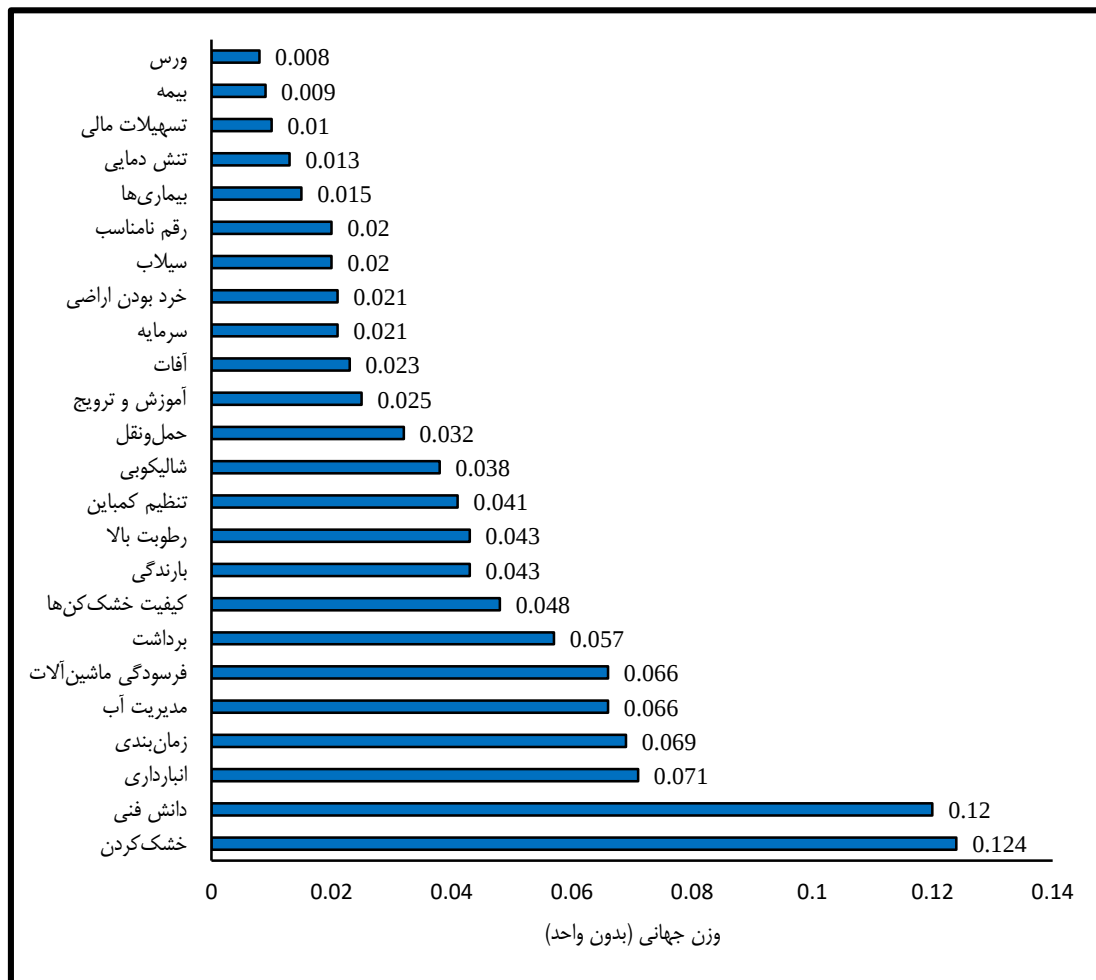
در مقابل، معیارهای فنی و مکانیزاسیون (۱۶ درصد)، اقلیمی و محیطی (۱۲ درصد)، زراعی و بیولوژیکی (۶ درصد) و اقتصادی و ساختاری (۶ درصد) اگرچه در ایجاد ضایعات مؤثر هستند، اما بر اساس وزن‌دهی خبرگان، نقش مستقیم و تعیین‌کننده کمتری نسبت به دو معیار اصلی ذکر شده دارند و بیشتر به‌عنوان عوامل پشتیبان یا تشدیدکننده عمل می‌کنند.

بنابراین، نتایج مدل نشان می‌دهد که برنامه‌های کاهش ضایعات برنج در استان گیلان باید در درجه نخست بر بهبود مدیریت عملیات پس از برداشت، ارتقای فرآیندهای خشک‌کردن و فرآوری، و افزایش دقت تصمیم‌گیری در مراحل تولید و برداشت متمرکز

شوند. این اولویت‌بندی بر اساس وزن‌دهی FAHP حاصل شده و نشان‌دهنده حوزه‌هایی است که بیشترین ظرفیت اثرگذاری بر کاهش ضایعات را دارند.

وزن و تحلیل اهمیت زیرمعیارهای مؤثر بر ضایعات برنج

در شکل ۵ وزن جهانی و رتبه‌بندی زیرمعیارهای مؤثر بر ضایعات برنج ارائه شده است.



شکل ۵. وزن جهانی و رتبه‌بندی زیرمعیارهای مؤثر بر ضایعات

نتایج حاصل از تحلیل زیرمعیارها نشان داد که خشک کردن محصول (C61) با وزن جهانی ۰/۱۲۴ مهم‌ترین عامل مؤثر بر ضایعات برنج در استان گیلان است. این یافته بیانگر اهمیت بالایی مرحله خشک کردن در مدیریت پس از برداشت بوده و نشان می‌دهد که ضعف در کنترل رطوبت شلتوک، تأخیر در فرآیند خشک‌سازی و استفاده از روش‌های نامناسب خشک کردن می‌تواند زمینه افزایش ضایعات کمی و کیفی محصول را فراهم کند. این نتیجه نشان می‌دهد که کنترل دقیق رطوبت شلتوک و بهبود فرآیند خشک کردن، از مهم‌ترین نقاط مداخله برای کاهش ضایعات در زنجیره تولید برنج استان گیلان محسوب می‌شود.

دانش فنی کشاورزان (C11) با وزن ۰/۱۲۰ در رتبه دوم قرار گرفت. اهمیت بالایی این زیرمعیار نشان می‌دهد که میزان آشنایی بهره‌برداران با اصول فنی عملیات مختلف زنجیره تولید، برداشت و پس از برداشت می‌تواند بر میزان ضایعات برنج اثرگذار باشد. این زیرمعیار شامل توانایی بهره‌برداران در تشخیص زمان مناسب برداشت، آماده‌سازی مزرعه، استفاده صحیح از ماشین‌آلات برداشت، انتقال و نگهداری مناسب شلتوک و رعایت الزامات اولیه فرآوری است.

تفاوت این زیرمعیار با معیار مدیریتی و انسانی در آن است که معیار مدیریتی و انسانی بیشتر به نحوه برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری و سازماندهی عملیات تولید و پس از برداشت مربوط می‌شود، در حالی که زیرمعیار دانش فنی کشاورزان بر سطح آگاهی و توانایی کاربرد دانش تخصصی در اجرای صحیح عملیات تمرکز دارد. بنابراین، ضعف دانش فنی می‌تواند موجب انتخاب نامناسب زمان برداشت، تنظیم نادرست یا استفاده غیرصحیح از تجهیزات برداشت و افزایش خطاهای عملیاتی شده و در نهایت میزان ضایعات را افزایش دهد.

زیرمعیار انبارداری (C62) با وزن ۰/۰۷۱ در رتبه سوم قرار گرفت که بیانگر اهمیت شرایط نگهداری شلتوک و برنج سفید پس از برداشت است. کنترل رطوبت محصول، تهویه مناسب و جلوگیری از نگهداری طولانی‌مدت در شرایط نامناسب می‌تواند از افت کیفیت، فساد و افزایش ضایعات کمی و کیفی جلوگیری کند. با وجود اینکه انبارداری در رتبه سوم زیرمعیارها قرار گرفت، این نتیجه نشان‌دهنده اهمیت بالای آن در حفظ کیفیت محصول پس از برداشت است، زیرا شرایط نامناسب نگهداری می‌تواند اثرات نامطلوب مراحل قبلی زنجیره را تشدید کند.

همچنین زیرمعیارهای زمان‌بندی عملیات (C13، وزن ۰/۰۶۹) به زمان انجام فعالیت‌های کلیدی در زنجیره تولید برنج، شامل زمان مناسب برداشت، انتقال سریع شلتوک برداشت‌شده و شروع به‌موقع فرآیند خشک‌کردن اشاره دارد. تأخیر در برداشت می‌تواند موجب افزایش ریزش دانه، بیش‌رسیدگی و کاهش کیفیت محصول شود؛ همچنین تأخیر در انتقال و خشک‌کردن شلتوک پس از برداشت، به‌ویژه در شرایط رطوبتی استان گیلان، احتمال افت کیفیت و افزایش ضایعات پس از برداشت را افزایش می‌دهد.

زیر معیار مدیریت آب (C12، وزن ۰/۰۶۶) نیز به نحوه مدیریت آب آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه، به‌ویژه در دوره نزدیک برداشت، مربوط است. مدیریت نامناسب آب می‌تواند موجب افزایش ورس (خوابیدگی بوته‌ها)، دشوار شدن عملیات برداشت مکانیزه، افزایش ریزش محصول در زمان برداشت و کاهش کارایی برداشت کمباین شود. در مقابل، مدیریت صحیح آب می‌تواند با کاهش ورس و فراهم کردن شرایط مناسب‌تر برای برداشت، میزان ضایعات مزرعه‌ای را کاهش دهد.

زیر معیار فرسودگی ماشین‌آلات (۰/۰۶۶) نیز به وضعیت فنی ماشین‌آلات مورد استفاده در زنجیره تولید و فرآوری برنج، شامل کمباین‌های برداشت برنج، تجهیزات انتقال شلتوک و ماشین‌آلات شالیکوبی (مانند پوست‌کن، سفیدکن و تجهیزات جداسازی و درجه‌بندی) اشاره دارد. فرسودگی یا تنظیم نامناسب این تجهیزات می‌تواند موجب افزایش ریزش محصول در مرحله برداشت، آسیب مکانیکی دانه، افزایش درصد شکستگی و کاهش کیفیت محصول نهایی شود.

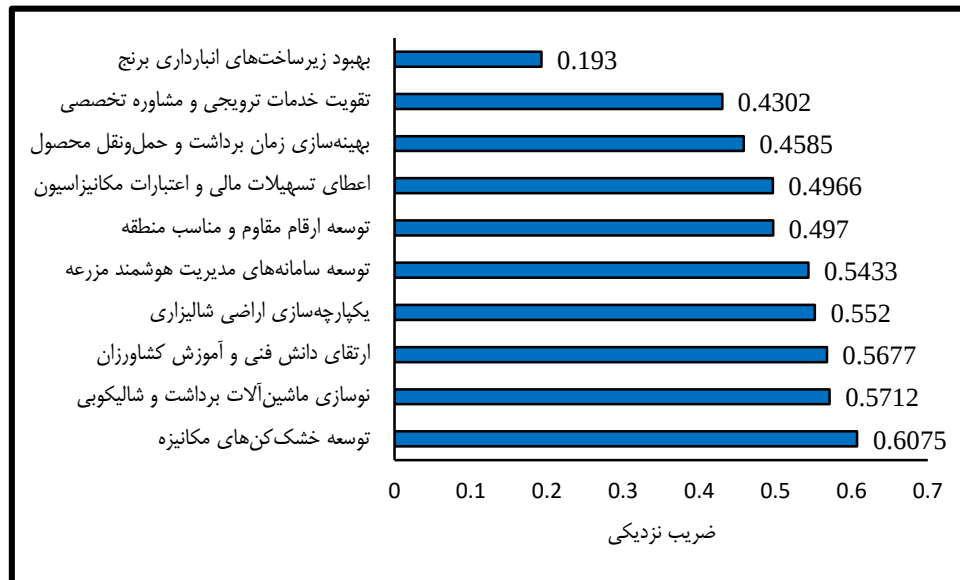
نتایج همچنین نشان داد که زیرمعیارهایی مانند برداشت (۰/۰۵۷)، کیفیت خشک‌کن‌ها (۰/۰۴۸)، بارندگی و رطوبت بالا (۰/۰۴۳)، تنظیم کمباین (۰/۰۴۱) و شالیکوبی (۰/۰۳۸) در میان عوامل مؤثر بر ضایعات برنج دارای اهمیت قابل توجهی هستند. در این میان، زیرمعیار خشک‌کردن محصول (C61) بیانگر اهمیت کلی فرآیند خشک‌سازی پس از برداشت بوده، در حالی که زیرمعیار کیفیت خشک‌کن‌ها به وضعیت فنی و عملکرد تجهیزات خشک‌کن مربوط است. به عبارت دیگر، ممکن است حتی در صورت انجام فرآیند خشک‌کردن، استفاده از خشک‌کن‌های نامناسب یا عملکرد نامطلوب تجهیزات موجب افزایش شکستگی دانه و کاهش کیفیت محصول شود.

در مقابل، زیرمعیارهایی مانند بیمه و تسهیلات مالی وزن کمتری را به خود اختصاص دادند. این عوامل به‌عنوان عوامل مستقیم ایجاد ضایعات در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه نقش زمینه‌ای و پشتیبان دارند؛ به‌گونه‌ای که دسترسی مناسب به پوشش‌های بیمه‌ای و منابع مالی می‌تواند توان بهره‌برداران برای استفاده از ماشین‌آلات مناسب، خدمات فنی و فناوری‌های کاهش ضایعات را افزایش دهد. بنابراین، اثر این عوامل بیشتر غیرمستقیم و از طریق تسهیل اجرای اقدامات اصلاحی قابل تبیین است.

به‌طور کلی، نتایج زیرمعیارها بیانگر آن است که عوامل مرتبط با مدیریت پس از برداشت، دانش فنی کشاورزان و وضعیت تجهیزات و ماشین‌آلات، بیشترین اهمیت نسبی را در چارچوب مدل تصمیم‌گیری ارائه‌شده دارند و تمرکز بر این حوزه‌ها می‌تواند بیشترین اثربخشی را در کاهش ضایعات و بهبود کیفیت محصول ایجاد کند.

رتبه بندی گزینه های (راهکارهای) کاهش ضایعات

با استفاده از وزن های حاصل از FAHP و تکنیک TOPSIS، راهکارهای کاهش ضایعات برنج در استان گیلان رتبه بندی شدند. در شکل ۶ رتبه بندی راهکارها نشان داده شده است.



شکل ۶. رتبه بندی گزینه های (راهکارهای) کاهش ضایعات برنج با روش TOPSIS

نتایج حاصل از روش TOPSIS نشان داد که سه راهکار توسعه خشک کن های مکانیزه و استاندارد (A2)، نوسازی ماشین آلات برداشت و شالیکوبی (A1) و ارتقای دانش فنی و آموزش کشاورزان (A3) بیشترین اثربخشی نسبی را در کاهش ضایعات برنج در استان گیلان دارند. این نتایج با یافته های مرحله FAHP نیز همخوانی داشت؛ زیرا زیرمعیارهای خشک کردن محصول (C61)، دانش فنی کشاورزان (C11)، انبارداری (C62)، فرسودگی ماشین آلات و تنظیم کمباین از مهم ترین عوامل مؤثر شناسایی شدند. بر اساس ضریب نزدیکی به راه حل ایده آل مثبت (CC_i)، گزینه توسعه خشک کن های مکانیزه و استاندارد (A2) با مقدار ۰/۶۰۷۵ در رتبه نخست قرار گرفت. این نتیجه بیانگر آن است که در شرایط تولید برنج در استان گیلان، مدیریت صحیح فرآیند خشک کردن، شامل کنترل شرایط دما و رطوبت، کاهش زمان توقف شلتوک پس از برداشت و استفاده از تجهیزات مناسب خشک کنی، از مهم ترین اقدامات اجرایی برای کاهش ضایعات محسوب می شود. خشک کردن نامناسب می تواند موجب ایجاد ترک های داخلی در دانه، افزایش درصد شکستگی در فرآیند تبدیل و کاهش کیفیت برنج سفید شود. نتایج این پژوهش با یافته های مطالعات پیشین در زمینه ضایعات پس از برداشت برنج هم راستا است. مطالعات مختلف نشان داده اند که مرحله خشک کردن یکی از مراحل بحرانی زنجیره پس از برداشت برنج بوده و شرایط نامناسب خشک کردن، شامل کنترل نامناسب دما، سرعت بالای کاهش رطوبت و دستیابی به رطوبت نهایی نامناسب، می تواند موجب افزایش ترک خوردگی دانه، شکستگی در فرآیند تبدیل و کاهش کیفیت آسیابانی برنج شود (Araullo et al., 1976; Matthews & Spadaro, 1975; Hodges et al., 2011).

همچنین، مطالعات انجام شده در داخل کشور نیز اهمیت مدیریت فرآیند خشک کردن را تأیید کرده اند. لطیفی (۱۳۹۳) نشان داد که دمای خشک کن و رطوبت نهایی شلتوک اثر معنی داری بر میزان شکستگی دانه و کیفیت آسیابانی ارقام مختلف برنج دارد. همچنین راینی مقبلی و همکاران (۱۴۰۰) گزارش کردند که تنظیم مناسب پارامترهای فرآیند خشک کردن با خشک کن مادون قرمز می تواند در حفظ کیفیت شلتوک و کاهش اثرات نامطلوب خشک کردن مؤثر باشد. بنابراین، رتبه نخست گزینه توسعه خشک کن های مکانیزه و استاندارد (A2) در پژوهش حاضر با نتایج مطالعات پیشین مطابقت داشته و نقش تعیین کننده مدیریت صحیح خشک کردن در کاهش ضایعات برنج را تأیید می کند.

گزینه نوسازی ماشین آلات برداشت و شالیکوبی (A1) با ضریب نزدیکی ۰/۵۷۱۲ در رتبه دوم قرار گرفت. این نتیجه نشان می‌دهد که در شرایط تولید برنج استان گیلان، بهبود وضعیت تجهیزات برداشت و فرآوری یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش ضایعات محسوب می‌شود. فرسودگی ماشین آلات برداشت، تنظیم نامناسب کمباین و عملکرد نامطلوب تجهیزات فرآوری می‌تواند موجب افزایش ریزش مزرعه‌ای، آسیب مکانیکی دانه، افزایش شکستگی در فرآیند تبدیل و کاهش کیفیت محصول نهایی شود. این یافته با نتایج مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد. شاکر و همکاران (۱۳۷۷) در بررسی میزان شکستگی برنج در کارخانه‌های شالیکوبی منطقه کربال مروشد، نقش شرایط عملکرد و تجهیزات فرآوری را در میزان شکستگی دانه مورد تأکید قرار دادند. همچنین، گورابجیری و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه عوامل مؤثر بر ضایعات شکستگی برنج در استان گیلان، عوامل مرتبط با فرآوری و تجهیزات شالیکوبی را از عوامل اثرگذار بر ضایعات برنج معرفی کردند. عسکری اصل‌ارده و راسخ (۱۳۸۶) نیز نشان دادند که تنظیمات فنی ماشین‌های برداشت، از جمله سرعت استوانه کوبنده، می‌تواند بر میزان تلفات و ضایعات خرمن‌کوبی برنج اثرگذار باشد. بنابراین، رتبه دوم گزینه نوسازی ماشین آلات برداشت و شالیکوبی (A1) در پژوهش حاضر با نتایج مطالعات پیشین مطابقت داشته و اهمیت ارتقای وضعیت مکانیزاسیون برداشت و فرآوری در کاهش ضایعات برنج را تأیید می‌کند.

گزینه ارتقای دانش فنی و آموزش کشاورزان (A3) با ضریب نزدیکی ۰/۵۶۷۷ در رتبه سوم قرار گرفت. این نتیجه بیانگر نقش مهم عوامل انسانی و مدیریتی در کاهش ضایعات است. آموزش بهره‌برداران در زمینه زمان مناسب برداشت، مدیریت صحیح آب، استفاده مناسب از ماشین آلات برداشت و نگهداری محصول می‌تواند در کاهش خطاهای مدیریتی و عملیاتی مؤثر باشد. به عنوان مثال، مدیریت نامناسب آب در مراحل مختلف رشد برنج می‌تواند موجب افزایش ورس، تأخیر در رسیدگی محصول، افزایش رطوبت بوته و دشوار شدن عملیات برداشت مکانیزه شود که در نهایت با افزایش ریزش مزرعه‌ای و تلفات برداشت همراه است. همچنین، آشنایی کشاورزان با زمان مناسب قطع آبیاری، آماده‌سازی مزرعه برای ورود ماشین برداشت، تنظیم شرایط برداشت و مدیریت اولیه شل‌توک پس از برداشت می‌تواند از افزایش ضایعات کمی و کیفی محصول جلوگیری کند. بنابراین، ارتقای دانش فنی بهره‌برداران در این پژوهش به معنای افزایش آگاهی عمومی نبوده، بلکه بهبود توان تصمیم‌گیری و اجرای صحیح عملیات مؤثر بر ضایعات در زنجیره تولید، برداشت و پس از برداشت برنج است.

گزینه یکپارچه‌سازی اراضی شالیزاری (A7) و توسعه سامانه‌های مدیریت هوشمند مزرعه (A8) به ترتیب با قرارگیری در رتبه‌های چهارم و پنجم، در گروه راهکارهای با اهمیت متوسط قرار گرفتند. رتبه این گزینه‌ها نشان می‌دهد که اگرچه این اقدامات می‌توانند برخی عوامل مؤثر بر ضایعات را تحت تأثیر قرار دهند، اما اثر آن‌ها در مقایسه با راهکارهای مستقیم‌تر مانند توسعه خشک‌کن‌های مکانیزه و نوسازی ماشین آلات برداشت و فرآوری، کمتر ارزیابی شده است.

یکپارچه‌سازی اراضی شالیزاری (A7) از طریق افزایش سطح قطعات، کاهش پراکندگی مزارع و فراهم کردن امکان استفاده مؤثرتر از ماشین آلات برداشت می‌تواند شرایط انجام عملیات مکانیزه را بهبود دهد و به طور غیرمستقیم بر کاهش تلفات برداشت اثرگذار باشد. با این حال، در شرایط فعلی تولید برنج در استان گیلان، این راهکار به دلیل وابستگی به مسائل مالکیت، ساختار اراضی و عوامل اجتماعی، اثر کوتاه‌مدت کمتری بر کاهش ضایعات نسبت به اقدامات فنی پس از برداشت دارد.

توسعه سامانه‌های مدیریت هوشمند مزرعه (A8) نیز با هدف بهبود تصمیم‌گیری در عملیات زراعی، از جمله پایش شرایط مزرعه، مدیریت مصرف آب و تعیین زمان مناسب انجام عملیات، می‌تواند بر برخی عوامل مدیریتی مؤثر بر ضایعات اثرگذار باشد. با این حال، با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از ضایعات برنج در استان گیلان در مراحل برداشت، خشک‌کردن و فرآوری ایجاد می‌شود، اثر مستقیم این فناوری‌ها بر کاهش ضایعات نسبت به راهکارهای مرتبط با پس از برداشت محدودتر ارزیابی شده است.

گزینه توسعه ارقام مقاوم و مناسب منطقه (A4) و اعطای تسهیلات مالی و اعتبارات مکانیزاسیون (A6) به ترتیب در رتبه‌های ششم و هفتم قرار گرفتند. رتبه پایین‌تر این گزینه‌ها نسبت به راهکارهای مرتبط با پس از برداشت و مکانیزاسیون نشان می‌دهد که اثر مستقیم آن‌ها بر کاهش ضایعات در شرایط مطالعه حاضر کمتر ارزیابی شده است، با این حال نقش پشتیبان آن‌ها در بهبود شرایط تولید قابل توجه است.

توسعه ارقام مقاوم و مناسب منطقه (A4) می‌تواند از طریق کاهش حساسیت گیاه به عواملی مانند ورس، آفات و بیماری‌ها و همچنین افزایش سازگاری رقم با شرایط اقلیمی و عملیات برداشت مکانیزه، زمینه کاهش برخی ضایعات پیش از برداشت و هنگام برداشت را فراهم کند. با این حال، نتایج این پژوهش نشان داد که در استان گیلان، عوامل مرتبط با مدیریت پس از برداشت، ماشین‌آلات برداشت و فرآوری، سهم بیشتری در ایجاد ضایعات دارند؛ بنابراین اثر این راهکار نسبت به گزینه‌هایی مانند توسعه خشک‌کن‌های مکانیزه و نوسازی ماشین‌آلات برداشت محدودتر ارزیابی شده است.

همچنین، گزینه اعطای تسهیلات مالی و اعتبارات مکانیزاسیون (A6) اگرچه به‌طور مستقیم موجب کاهش ضایعات نمی‌شود، اما می‌تواند امکان دسترسی بهره‌برداران به ماشین‌آلات مناسب، تجهیزات برداشت و فناوری‌های کاهش‌دهنده ضایعات را فراهم کند. بنابراین، نقش این گزینه بیشتر به‌عنوان عامل تسهیل‌کننده برای اجرای سایر راهکارهای فنی و مدیریتی در نظر گرفته می‌شود.

گزینه بهینه‌سازی زمان برداشت و حمل‌ونقل محصول (A9) در رتبه هشتم قرار گرفت. با وجود اولویت نسبی پایین‌تر این گزینه در مقایسه با سایر راهکارهای مورد بررسی در مدل TOPSIS، مدیریت صحیح زمان برداشت یکی از عوامل مؤثر بر کاهش ضایعات برداشت و حفظ کیفیت شلتوک محسوب می‌شود. برداشت زود هنگام می‌تواند موجب افزایش رطوبت شلتوک، کاهش کیفیت تبدیل و افزایش نیاز به خشک‌کردن شود؛ در مقابل، تأخیر در برداشت ممکن است سبب افزایش ریزش پیش از برداشت، ورس، ترک‌خوردگی دانه و کاهش کیفیت محصول گردد. همچنین، انتقال سریع شلتوک پس از برداشت به مراکز خشک‌کنی و فرآوری، از افزایش رطوبت، افت کیفیت و ایجاد ضایعات کیفی جلوگیری می‌کند.

با این حال، بر اساس نتایج حاصل از مدل TOPSIS در شرایط مطالعه حاضر، این گزینه نسبت به راهکارهایی مانند توسعه خشک‌کن‌های مکانیزه و استاندارد، نوسازی ماشین‌آلات برداشت و فرآوری و ارتقای دانش فنی بهره‌برداران، نزدیکی کمتری به راه‌حل ایده‌آل داشته است. این موضوع می‌تواند ناشی از وابستگی اثرگذاری زمان برداشت و حمل‌ونقل به سایر اجزای زنجیره پس از برداشت، از جمله ظرفیت خشک‌کنی، تجهیزات فرآوری و هماهنگی بین عملیات برداشت و تبدیل باشد. بنابراین، رتبه هشتم این گزینه نشان‌دهنده کم‌اهمیت بودن زمان برداشت نیست، بلکه بیانگر اولویت نسبی کمتر آن در مقایسه با گزینه‌هایی است که در مدل حاضر اثر مستقیم‌تر و گسترده‌تری بر کاهش ضایعات برنج نشان داده‌اند.

همچنین، گزینه تقویت خدمات ترویجی و مشاوره تخصصی (A10) در رتبه نهم قرار گرفت. نتایج نشان داد که آموزش و مشاوره تخصصی، در صورت همراهی با توسعه فناوری‌ها و تجهیزات مناسب، می‌تواند در ارتقای آگاهی کشاورزان و بهبود مدیریت تولید و پس از برداشت مؤثر باشد، اما به‌تنهایی نقش محدودی در کاهش ضایعات دارد. در نهایت، گزینه بهبود زیرساخت‌های انبارداری برنج (A5) کمترین رتبه را در میان گزینه‌های مورد بررسی کسب کرد. این رتبه نشان‌دهنده اولویت پایین‌تر این گزینه نسبت به اقدامات بحرانی‌تر مانند خشک‌کردن و مکانیزاسیون در شرایط مطالعه حاضر است؛ با این حال، اثرگذاری انبارداری استاندارد در کاهش ضایعات زمانی بیشینه می‌شود که عملیات پیش از آن، شامل برداشت صحیح و خشک‌کردن مناسب، به‌درستی انجام شده باشد؛ زیرا نگهداری محصول با رطوبت نامناسب می‌تواند موجب کاهش کیفیت و افزایش ضایعات شود.

به‌طور کلی، نتایج TOPSIS نشان داد که در شرایط مورد مطالعه، گزینه‌های توسعه خشک‌کن‌های مکانیزه و استاندارد (A2)، نوسازی ماشین‌آلات برداشت و شالیکوبی (A1) و ارتقای دانش فنی کشاورزان (A3) بیشترین نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل را داشته‌اند. این نتایج با یافته‌های مرحله FAHP نیز مطابقت داشت؛ به‌طوری‌که مهم‌ترین زیرمعیارهای مؤثر شناسایی شده شامل خشک‌کردن محصول (C61)، دانش فنی کشاورزان (C11)، انبارداری (C62)، فرسودگی ماشین‌آلات و تنظیم کمباین بودند. بنابراین، همگرایی نتایج دو روش FAHP و TOPSIS نشان‌دهنده اهمیت بالاتر عوامل مرتبط با مدیریت پس از برداشت، عملکرد تجهیزات و عوامل انسانی در تبیین الگوی ضایعات برنج در استان گیلان است.

تحلیل حساسیت و بررسی پایداری نتایج مدل

به منظور ارزیابی پایداری نتایج حاصل از مدل ترکیبی FAHP-TOPSIS و بررسی میزان حساسیت رتبه‌بندی گزینه‌ها نسبت به تغییر وزن معیارهای اصلی، تحلیل حساسیت سناریویی انجام شد. از آنجا که وزن معیارها در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تأثیر مستقیمی بر اولویت‌بندی گزینه‌ها دارد، بررسی تغییرات احتمالی در اهمیت معیارها می‌تواند میزان اعتمادپذیری نتایج را مشخص نماید.

در این تحلیل، سه معیار اصلی شامل معیار پس از برداشت، معیار مدیریتی و انسانی و معیار فنی و مکانیزاسیون که بیشترین تأثیر را در ساختار تصمیم‌گیری پژوهش داشتند، انتخاب شدند. در هر سناریو، وزن معیار منتخب به میزان ۱۰ درصد افزایش یافت و سایر وزن‌ها به صورت متناسب تعدیل شدند، به گونه‌ای که مجموع وزن معیارها برابر با یک باقی بماند. سپس ماتریس تصمیم اصلاح‌شده و مقادیر ضریب نزدیکی نسبی (CCi) در روش TOPSIS مجدداً محاسبه و رتبه‌بندی گزینه‌ها انجام شد.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر وزن معیارهای اصلی، اگرچه موجب تغییر محدود در مقدار ضریب نزدیکی (CCi) گزینه‌ها شد، اما تغییر معنی‌داری در ترتیب کلی اولویت راهکارهای کاهش ضایعات ایجاد نکرد. در تمامی سناریوهای بررسی‌شده، گزینه‌های توسعه خشک‌کن‌های مکانیزه و استاندارد، نوسازی ماشین‌آلات برداشت و شالیکوبی و ارتقای دانش فنی کشاورزان همچنان در رتبه‌های نخست قرار گرفتند.

ثبات رتبه‌بندی گزینه‌های اصلی در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که نتایج مدل ترکیبی FAHP-TOPSIS از پایداری مناسبی برخوردار است و اولویت‌بندی نهایی صرفاً ناشی از وزن یک معیار خاص نیست، بلکه حاصل تعامل مجموعه‌ای از عوامل مؤثر در زنجیره تولید، برداشت و پس از برداشت برنج است.

جدول ۲. نتایج تحلیل حساسیت رتبه‌بندی گزینه‌های کاهش ضایعات برنج تحت سناریوهای تغییر وزن معیارهای اصلی

سناریو	تغییر وزن	رتبه اول	رتبه دوم	رتبه سوم
حالت پایه	-	خشک‌کن مکانیزه	نوسازی ماشین‌آلات برداشت و شالیکوبی	آموزش کشاورزان
افزایش وزن پس از برداشت ۱۰٪	+ ۱۰٪	خشک‌کن مکانیزه	نوسازی ماشین‌آلات برداشت و شالیکوبی	آموزش کشاورزان
افزایش وزن مدیریتی و انسانی ۱۰٪	+ ۱۰٪	خشک‌کن مکانیزه	آموزش کشاورزان	نوسازی ماشین‌آلات
افزایش وزن فنی و مکانیزاسیون ۱۰٪	+ ۱۰٪	خشک‌کن مکانیزه	نوسازی ماشین‌آلات برداشت و شالیکوبی	آموزش کشاورزان

بحث

اهمیت بالایی مرحله پس از برداشت در مدل تصمیم‌گیری این پژوهش را می‌توان به نقش حساس عملیات خشک‌کردن، نگهداری و فرآوری در تعیین کیفیت نهایی شلتوک و میزان ضایعات برنج نسبت داد. در زنجیره تولید برنج، برخلاف بسیاری از عوامل مرحله تولید که اثر آن‌ها ممکن است به صورت تدریجی ظاهر شود، خطا در مدیریت رطوبت و شرایط فرآوری پس از برداشت می‌تواند به سرعت موجب کاهش کیفیت فیزیکی دانه، افزایش ترک‌خوردگی، شکستگی در مرحله تبدیل و کاهش ارزش اقتصادی محصول شود. این موضوع در استان گیلان به دلیل شرایط اقلیمی مرطوب، هم‌زمانی دوره برداشت با بارندگی‌های احتمالی و محدودیت زمانی برای کاهش رطوبت شلتوک، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین، برتری عوامل مرتبط با پس از برداشت در ساختار مدل حاضر را می‌توان ناشی از حساسیت بالای این مرحله به شرایط محیطی و مدیریتی دانست. این تفسیر با مطالعات پیشین که فرآیندهای خشک‌کردن، فرآوری و نگهداری را از مهم‌ترین نقاط ایجاد ضایعات در زنجیره پس از برداشت برنج معرفی کرده‌اند، همخوانی دارد (Siebemorger et al., 1995; Sajwan et al., 1992; Araullo et al., 1976; گورابجیری و همکاران، ۱۳۹۵).

اهمیت بالایی توسعه خشک‌کن‌های مکانیزه و استاندارد را می‌توان به نقش مستقیم این فناوری در کنترل رطوبت، کاهش زمان خشک‌کردن، ایجاد شرایط یکنواخت فرآیند و حفظ کیفیت فیزیکی و بازاریابی برنج نسبت داد. برخلاف روش‌های سنتی که تحت تأثیر نوسانات آب‌وهوایی قرار دارند، استفاده از سامانه‌های خشک‌کن مناسب امکان مدیریت بهتر فرآیند خشک‌کردن و کاهش آسیب‌های ناشی از تغییرات سریع رطوبت را فراهم می‌کند. ناهم‌زمانی نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که توسعه و بهبود زیرساخت‌های خشک‌کردن می‌تواند یکی از اولویت‌های مهم در برنامه‌های کاهش ضایعات برنج در استان گیلان باشد. این موضوع

با یافته‌های Luo et al. (2020) در خصوص نقش فناوری‌های نوین پس از برداشت در کاهش ضایعات محصولات کشاورزی مطابقت دارد. همچنین، مطالعات جدید نشان داده‌اند که بهبود فرآیندهای خشک کردن و استفاده از فناوری‌های مناسب پس از برداشت می‌تواند نقش مهمی در کاهش ترک‌خوردگی دانه، افزایش بازیابی برنج سالم و کاهش ضایعات کیفی داشته باشد (Hailemesikel et al., 2025).

نقش بالای عامل انسانی در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که حتی در صورت فراهم بودن تجهیزات مناسب، نحوه بهره‌برداری، تنظیم و مدیریت صحیح عملیات می‌تواند تعیین‌کننده میزان ضایعات باشد. بسیاری از خسارت‌های ایجادشده در مراحل برداشت، خشک کردن و نگهداری نه ناشی از نبود فناوری، بلکه ناشی از استفاده نادرست از فناوری موجود، انتخاب زمان نامناسب عملیات و ضعف در مدیریت فرآیند است. از این رو، آموزش بهره‌برداران باید به‌عنوان مکمل توسعه مکانیزاسیون مورد توجه قرار گیرد. این دیدگاه با مطالعات Omid et al. (2014) و Martins et al. (2014) که بر نقش انتقال دانش و خدمات ترویجی در بهبود مدیریت تولید و کاهش تلفات محصولات کشاورزی تأکید کرده‌اند، مطابقت دارد.

اهمیت مکانیزاسیون در کاهش ضایعات را می‌توان از دو جنبه مورد بررسی قرار داد. نخست، وضعیت فنی ماشین‌آلات برداشت و فرآوری بر میزان تلفات مستقیم محصول اثرگذار است؛ به‌گونه‌ای که تنظیم نامناسب کمباین، فرسودگی قطعات و شرایط نامناسب شالیکوبی می‌تواند موجب افزایش ریزش و شکستگی دانه شود. دوم، توسعه مکانیزاسیون مناسب امکان انجام عملیات در زمان مطلوب و شرایط کنترل‌شده را فراهم می‌کند. بنابراین، نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که هدف از توسعه مکانیزاسیون نباید صرفاً افزایش ظرفیت کاری باشد، بلکه باید کاهش آسیب‌های فیزیکی محصول و حفظ کیفیت نهایی نیز مدنظر قرار گیرد. این موضوع با یافته‌های Hunt (1983)، Srivastava et al. (1993)، عسکری اصل‌ارده و راسخ (۱۳۸۶) و Castelein et al. (2022) همخوانی دارد.

اگرچه عوامل اقلیمی در مدل حاضر وزن کمتری نسبت به عوامل مدیریتی و پس از برداشت داشتند، اما نقش آنها بیشتر به‌عنوان عوامل تشدیدکننده ضایعات قابل تفسیر است. در مناطق شمالی کشور، بارندگی و رطوبت نسبی بالا در زمان برداشت می‌تواند برنامه‌ریزی عملیات، امکان خشک کردن طبیعی و کیفیت نگهداری محصول را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، اثر عوامل اقلیمی عمدتاً از طریق افزایش وابستگی زنجیره پس از برداشت به تجهیزات خشک‌کن و مدیریت مناسب عملیات ظاهر می‌شود. این تفسیر با یافته‌های Wu et al. (2017)، Hodges et al. (2011) و Chegere (2018) که بر اثر شرایط محیطی بر افزایش تلفات پس از برداشت تأکید کرده‌اند، سازگار است. مطالعات جدید نیز تأکید کرده‌اند که رطوبت محصول هنگام برداشت و شرایط عملکرد ماشین برداشت، از عوامل مهم تعیین‌کننده شکستگی دانه و کاهش کیفیت برنج هستند (Kyani et al., 2025).

اهمیت کمتر نسبی عوامل زراعی و بیولوژیکی در مقایسه با عوامل پس از برداشت، مدیریتی و فنی در این پژوهش را نباید به معنی بی‌تأثیر بودن این عوامل در ایجاد ضایعات برنج تفسیر کرد. ویژگی‌های رقم، میزان حساسیت به ورس، مقاومت به آفات و بیماری‌ها و خصوصیات فیزیکی دانه، می‌توانند زمینه ایجاد ضایعات را در مراحل بعدی فراهم کنند؛ با این حال، اثر نهایی این عوامل در بسیاری از موارد از طریق تعامل با عوامل مدیریتی و فنی ظاهر می‌شود. به عنوان مثال، ورس علاوه بر اینکه یک ویژگی مرتبط با گیاه است، می‌تواند با افزایش دشواری برداشت مکانیزه، کاهش راندمان کمباین و افزایش ریزش محصول، موجب تشدید ضایعات برداشت شود. همچنین، انتخاب رقم مناسب منطقه می‌تواند با تأثیر بر زمان رسیدگی، مقاومت به خوابیدگی و ویژگی‌های کیفی دانه، بر قابلیت برداشت و فرآوری محصول اثرگذار باشد. بنابراین، در شرایط استان گیلان، عوامل زراعی را می‌توان بیشتر به‌عنوان عوامل زمینه‌ساز و تکمیل‌کننده در کنار مدیریت صحیح مزرعه، مکانیزاسیون و فناوری‌های پس از برداشت در نظر گرفت. این تفسیر با مطالعاتی که بر ارتباط ویژگی‌های رقم و مدیریت زراعی با کیفیت برداشت و کاهش ضایعات برنج تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد (شاگرد و همکاران، ۱۳۷۷).

برتری راهکارهای مرتبط با خشک کردن، مکانیزاسیون و آموزش بهره‌برداران در رتبه‌بندی TOPSIS نشان می‌دهد که ضایعات برنج در استان گیلان حاصل یک عامل منفرد نیست، بلکه نتیجه تعامل میان شرایط محیطی، سطح فناوری و نحوه مدیریت عملیات

است. از این دیدگاه، رتبه بالاتر این راهکارها بیانگر آن است که اقداماتی که همزمان قابلیت کنترل ریسک‌های پس از برداشت، کاهش خسارت‌های فیزیکی و بهبود مدیریت بهره‌بردار را دارند، از ظرفیت بیشتری برای کاهش ضایعات برخوردارند.

از سوی دیگر، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند FAHP و TOPSIS می‌توانند در شرایطی که عوامل مؤثر بر ضایعات دارای ماهیت چندبعدی و وابستگی متقابل هستند، چارچوب مناسبی برای ترکیب قضاوت خبرگان و اولویت‌بندی راهکارها فراهم کنند. در مقایسه با ارزیابی‌های تک‌عاملی، این رویکرد امکان در نظر گرفتن همزمان عوامل فنی، مدیریتی، اقتصادی، اقلیمی و پس از برداشت را فراهم می‌کند و می‌تواند به تصمیم‌گیری هدفمندتر در برنامه‌های کاهش ضایعات کمک نماید. این موضوع با مطالعات انجام‌شده در زمینه کاربرد روش‌های FAHP و TOPSIS در مسائل کشاورزی و اولویت‌بندی راهکارهای مدیریتی همخوانی دارد (هرمزی و همکاران، ۱۴۰۱؛ نیک‌مهر و زیبایی، ۱۳۹۵؛ Özkan et al., 2019).

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که حتی با تغییر اهمیت نسبی معیارهای اصلی، راهکارهای مرتبط با فناوری‌های پس از برداشت، مکانیزاسیون و ارتقای دانش فنی همچنان رتبه‌های بالای اولویت را حفظ کردند. این موضوع بیانگر آن است که کاهش ضایعات برنج نیازمند یک رویکرد تلفیقی بوده و تمرکز صرف بر یک عامل نمی‌تواند به کاهش پایدار ضایعات منجر شود. مطالعات مروری اخیر نیز نشان داده‌اند که موفقیت برنامه‌های کاهش ضایعات پس از برداشت معمولاً حاصل ترکیب فناوری، بهبود مدیریت و آموزش بهره‌برداران است و اجرای اقدامات منفرد اثربخشی محدودی دارد (Stathers et al., 2025).

با وجود تلاش برای طراحی یک چارچوب جامع جهت شناسایی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش آن، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. نخست، وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها در مدل FAHP بر اساس قضاوت خبرگان انجام شد؛ بنابراین، اگرچه استفاده از میانگین هندسی و تحلیل حساسیت به کاهش اثر عدم قطعیت کمک کرد، اما همچنان احتمال وجود تفاوت در دیدگاه‌ها و تجربیات تخصصی افراد وجود دارد. دوم، جامعه خبرگان پژوهش به استان گیلان محدود بود و نتایج به‌طور مستقیم بیانگر شرایط مدیریتی، فنی و اقلیمی این منطقه است؛ از این رو، تعمیم نتایج به سایر مناطق برنج‌خیز کشور باید با توجه به تفاوت‌های اقلیمی، ساختار تولید و سطح مکانیزاسیون انجام شود. سوم، در این پژوهش، ارزیابی عوامل مؤثر و راهکارهای کاهش ضایعات عمدتاً بر اساس قضاوت خبرگان و معیارهای تصمیم‌گیری انجام شد که از ویژگی‌های ذاتی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر نظر کارشناسان است؛ با این حال، اندازه‌گیری میدانی ضایعات در مراحل مختلف زنجیره تولید و پس از برداشت می‌تواند در پژوهش‌های آینده به تکمیل نتایج کمک کند. همچنین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، علاوه بر استفاده از داده‌های کمی حاصل از اندازه‌گیری مستقیم ضایعات، تحلیل هزینه-فایده اقتصادی راهکارها و ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با داده‌های میدانی واقعی برای افزایش جامعیت ارزیابی مورد توجه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که در چارچوب مدل تصمیم‌گیری ارائه‌شده، عوامل مرتبط با مراحل پس از برداشت، مدیریت بهره‌برداران و وضعیت مکانیزاسیون، بیشترین نقش نسبی را در تبیین عوامل مؤثر بر ضایعات برنج در استان گیلان دارند. در میان زیرمعیارها نیز خشک کردن محصول، دانش فنی کشاورزان و انبارداری بیشترین وزن را کسب کردند که نشان‌دهنده نقش مهم مدیریت رطوبت، آموزش بهره‌برداران و شرایط مناسب نگهداری محصول در کاهش ضایعات است. نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها با روش TOPSIS نشان داد که توسعه خشک‌کن‌های مکانیزه و استاندارد، نوسازی ماشین‌آلات برداشت و شالیکوبی و ارتقای دانش فنی و آموزش کشاورزان، مؤثرترین راهکارهای کاهش ضایعات برنج هستند. بنابراین، کاهش ضایعات نیازمند رویکردی تلفیقی شامل اقدامات فنی، مدیریتی و آموزشی است.

به طور کلی، مدل ترکیبی FAHP-TOPSIS چارچوبی مناسب برای شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر ضایعات برنج فراهم کرد و نتایج آن می‌تواند در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری بخش کشاورزی برای افزایش بهره‌وری و بهبود کیفیت زنجیره تولید برنج مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

- توسعه و تجهیز واحدهای شالیکوبی به خشک‌کن‌های مکانیزه و استاندارد برای کنترل فرآیند خشک‌کردن، کاهش شکستگی دانه و حفظ کیفیت برنج.
- نوسازی ماشین‌آلات برداشت و فرآوری برنج، به‌ویژه کمباین‌های برداشت، تجهیزات انتقال شلتوک و ماشین‌آلات شالیکوبی، همراه با ارائه تسهیلات مالی هدفمند برای جایگزینی تجهیزات فرسوده و ارتقای فناوری‌های مکانیزه.
- گسترش برنامه‌های آموزشی و ترویجی برای ارتقای دانش فنی بهره‌برداران در زمینه زمان مناسب برداشت، تنظیم ماشین‌آلات، مدیریت رطوبت شلتوک و نگهداری محصول.
- با توجه به اهمیت زیرمعیارهای مدیریت آب (C12) و زمان‌بندی (C13) در مدل FAHP، پیشنهاد می‌شود برنامه‌های مدیریتی مزرعه با تأکید بر بهینه‌سازی مصرف آب، تنظیم مناسب زمان عملیات زراعی و هماهنگی زمان برداشت با شرایط رطوبتی محصول توسعه یابد؛ زیرا مدیریت صحیح این عوامل می‌تواند از افزایش رطوبت شلتوک، تأخیر در برداشت و تشدید ضایعات کمی و کیفی محصول جلوگیری کند.
- با توجه به اهمیت زیرمعیار انبارداری (C62)، بهبود شرایط نگهداری شلتوک شامل کنترل رطوبت، تهویه مناسب و استانداردسازی محیط‌های ذخیره‌سازی پیشنهاد می‌شود.
- با توجه به نقش مکمل یکپارچه‌سازی اراضی در در افزایش کارایی مکانیزاسیون، اجرای طرح‌های منطقه‌ای یکپارچه‌سازی اراضی شالیزاری، متناسب با شرایط اجتماعی و اقتصادی مناطق تولیدکننده، پیشنهاد می‌شود.
- در پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود اثربخشی اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی راهکارهای منتخب کاهش ضایعات با استفاده از داده‌های میدانی و اندازه‌گیری مستقیم ضایعات در مراحل مختلف زنجیره تولید بررسی شود.

منابع

- حسن شاهی، هاجر؛ ایروانی، هوشنگ؛ دانشور عامری، ژیلا و کلاترئی، خلیل. (۱۳۹۵). عوامل موثر بر پایداری نظام‌های زراعی دشت مرودشت. فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات اقتصاد کشاورزی. ۸(۳۰): ۱۹۹-۲۱۳.
- راینی مقبلی، ح.، رحمتی، م.، ه.، تاش سمس‌آبادی، ح. ع. و علیزاده، م. ر. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن شلتوک برنج با خشک‌کن مادون قرمز. مجله علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۸(۱۱۸): ۳۱۷-۳۳۰.
- شاکر، محمد. افضل‌نیا، صادق و جمشیدی، علی. (۱۳۷۷). ارزیابی میزان شکستگی برنج در کارخانه‌های شالیکوبی منطقه کربال مرودشت. مجله مهندسی کشاورزی، ۱۱، ۴۶-۷۱.
- طاهرزاده شالمائی، ناهید؛ شریفی، محمد و قاسمی مبتکر، حسن. (۱۳۹۹). ارزیابی و انتخاب بهترین روش وجین‌کاری علف‌های هرز برنج با استفاده از تکنیک رتبه‌بندی تاپسیس. مهندسی بیوسیستم/ایران، ۵۱(۴): ۷۸۱-۷۹۱.
- عسکری اصل‌ارده، عزت‌اله و راسخ، منصور. (۱۳۸۶). بررسی اثر سرعت استوانه کوبنده بر تلفات و ضایعات خرمن‌کوبی در ارقام رایج برنج، سومین همایش ملی ضایعات محصولات کشاورزی، تهران، ایران.
- قدسی پور، حسن. (۱۳۹۸). فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP). چاپ سیزدهم. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- کشوری، آتنا و مرزبان، افشین. (۱۳۹۸). اولویت‌بندی ورود توان تراکتوری در کشاورزی استان خوزستان به روش‌های تاپسیس و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی ماشین‌های کشاورزی. ۹(۱): ۲۳۵-۲۵۱.
- گورابجیری، مجتبی؛ فیروزی، سعید و امین پناه، هاشم. (۱۳۹۵). تحلیل عوامل ضایعات شکستگی برنج در استان گیلان. مهندسی بیوسیستم/ایران، ۴۷(۴): ۷۴۷-۷۷۶۵.
- لطیفی، ع. (۱۳۹۳). اثر دمای خشک‌کن و رطوبت نهایی شلتوک بر شکستگی دانه سه رقم برنج. پژوهش‌های کاربردی زراعی، ۲۷(۱۰۲): ۷۱-۷۵.
- مدرس رضوی، مجتبی. (۱۳۷۵). ماشین‌های برداشت غلات و سایر دانه‌های گیاهی: شامل دروگرها، خرمن‌کوب‌ها و کمباین‌ها. مشهد: دانشگاه امام رضا(ع). ص ۷۴۶.
- نیک مهر، سیامک و زیبایی، منصور. (۱۳۹۵). ارزیابی طرح‌های آبیاری و زهکشی استان خوزستان: کاربرد تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و روش تاپسیس. اقتصاد کشاورزی. ۱۰(۲): ۱۷۳-۱۹۰.

هرمزی، محمدعلی؛ ذکی دیزجی، حسن؛ بهرامی، هوشنگ؛ شریف یزدی، مهدی و منجزی، نسیم. (۱۴۰۱). بهینه‌سازی چند هدفه تخصیص مکانیزاسیون پایدار در سامانه‌های محلول‌پاشی و برداشت محصول برنج. *مهندسی بیوسیستم/ایران*. ۵۳(۴): ۳۷۱-۳۷۸.

REFERENCES

- Araullo, E., De Padua, B., & Graham, M. (1976). *Rice post-harvesting technology*. International Development Research Centre.
- Askari-Asliardeh, E., & Rasekh, M. (2007). Study of drum speed effect on threshing losses and waste in rice common variety. In *Proceedings of the 3rd National Symposium on Losses of Agricultural Products*. Tehran, Iran. (in Persian).
- Bokusheva, R., Finger, R., Fischler, M., Berlin, R., Marín, Y., Pérez, F., & Paiz, F. (2012). Factors determining the adoption and impact of a postharvest storage technology. *Food Security*, 4(2), 279–293.
- Castelein, R. B., Broeze, J., Kok, M. G., Axmann, H. B., Guo, X., & Soethoudt, J. M. H. (2022). Mechanization in rice farming reduces greenhouse gas emissions, food losses, and constitutes a positive business case for smallholder farmers – Results from a controlled experiment in Nigeria. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100487. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100487>
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649–655.
- Chegere, M. J. (2018). Post-harvest losses reduction by small-scale maize farmers: The role of handling practices. *Food Policy*, 77, 103–115.
- Ghodsipour, S. H. (2019). *Analytical hierarchy process (AHP)* (13th ed.). Amirkabir University Publication. (in Persian).
- Gorabjiri, M., Firouzi, S., & Aminpanah, H. (2017). Analysis of factors affecting rice grain breakage losses in Guilan Province. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(4), 747–765. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.60272> (in Persian).
- Hailemesikel, S. T., Delele, M. A., Ali, A. N., Fanta, S. W., Kidanemariam, G., & Alebachew, M. (2025). Optimizing open-sun drying of paddy rice: Effects of drying floor type and layer thickness on milling quality. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2025, Article 9269672. <https://doi.org/10.1155/jfpp/9269672>
- Hassanshahi, H., Irvani, H., Daneshvar-Ameri, Z., & Kalantari, K. (2015). Measure and comparison of economic, social and ecological sustainability of farming systems in the Marvdasht plain. *Journal of Desert*, 20(2), 231–239. (in Persian).
- Hodges, R. J., Buzby, J. C., & Bennett, B. (2011). Postharvest losses and waste in developed and less developed countries: Opportunities to improve resource use. *Journal of Agricultural Science*, 149(S1), 37–45.
- Hormozi, M. A., Zaki Dizaji, H., Bahrami, H., Sharifyazdi, M., & Monjezi, N. (2023). Multi-objective optimization of allocating sustainable mechanization for spraying and harvesting systems in paddy fields. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 53(4), 357–378. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.346979.665495> (in Persian).
- Hunt, D. R. (1983). *Farm power and machinery management*. Iowa State University Press.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications: A state-of-the-art survey* (Vol. 186). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- 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.
- Keshvari, A., & Marzban, A. (2019). Prioritizing the power arrival in Khuzestan Province agriculture using FAHP and FTOPSIS. *Journal of Agricultural Machinery*, 9(1), 235–251. <https://doi.org/10.22067/jam.v9i1.69258> (in Persian).
- 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>
- Latifi, A. (2014). Effect of drying temperature and paddy final moisture on milling quality of three rice varieties. *Applied Field Crops Research*, 27(102), 71–75. doi: 10.22092/aj.2014.100931 (in Persian).
- Lu, R., Siebenmorgen, T. J., Costello, T. A., & Fryar, E. O., Jr. (1995). Effect of rice moisture content at harvest on economic return. *Applied Engineering in Agriculture*, 11(5), 685–690. <https://doi.org/10.13031/2013.25792>
- Luo, Y., Huang, D., Li, D. Y., & Wu, L. P. (2020). On-farm storage, storage losses and the effects of loss reduction in China. *Resources, Conservation & Recycling*, 162, 105062.
- Luo, Y., Huang, D., Qu, X., & Wu, L. (2022). An inverse relationship between farm size and rice harvest loss: Evidence from China. *Land*, 11(10), 1760. <https://doi.org/10.3390/land11101760>
- Martins, A. G., Goldsmith, P., & Moura, A. (2014). Managerial factors affecting postharvest loss: The case of Mato Grosso Brazil. *International Journal of Agricultural Management*, 3(4), 200–209.

- Masato, S. (1980). Performance of rice combine harvesters as evaluated by national test in Japan. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 14(1), 20–23.
- Matthews, J., & Spadaro, J. J. (1975). Rice breakage during combine harvesting. *Rice Journal*, 75(7), 59–63.
- Modarres-Razavi, M. (1996). *Grain harvesting equipment: Binders, threshers, combine harvesters*. Emam Reza Publication, Mashhad, Iran. (in Persian).
- Nikmehr, S., & Zibaei, M. (2016). Evaluation of irrigation and drainage projects in Khuzestan Province: Application of fuzzy analytic hierarchy process and TOPSIS method. *Agricultural Economics*, 10(2), 173–190. <https://doi.org/10.22034/iaes.2016.19657> (in Persian).
- Okpala, N. E., Potcho, M. P., An, T., Ahator, S. D., Duan, L., & Tang, X. (2020). Low temperature increased the biosynthesis of 2-AP, cooked rice elongation percentage and amylose content percentage in rice. *Journal of Cereal Science*, 93, 102980.
- Omidi, S., Eshraghi Samani, R., & Poursaeed, A. R. (2014). Analysis the factors affecting management of wheat losses in Iran (Ilam Township). *International Journal of Agronomy and Agricultural Research (IJAAR)*, 5(4), 7–11.
- Özkan, B., Dengiz, O., & Demirağ Turan, İ. (2019). Site suitability assessment and mapping for rice cultivation using multi-criteria decision analysis based on fuzzy-AHP and TOPSIS approaches under semihumid ecological condition in delta plain. *Paddy and Water Environment*, 17, 665–676. <https://doi.org/10.1007/s10333-019-00692-8>
- Rayeni Moghbeli, H., Rahmati, M. H., Tash Shamsabadi, H. A., & Alizadeh, M. R. (2021). Optimization of rice husk drying process with infrared dryer. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 18(111), 317–330. doi: 10.52547/fsct.18.111.317 (in Persian).
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26.
- Sajwan, K., Kaplan, D. I., & Mittra, B. N. (1992). Milling quality of rice as influenced by time of harvesting and storage conditions. *Tropical Agriculture*, 69(3), 296–300.
- Shaker, M., Afzali-nia, S., & Jamshidi, A. (1998). Study of the rice breakage rate in processing factories. *Journal of Agricultural Engineering Research*. (in Persian).
- Srivastava, A. K., Goering, C. E., & Rohrbach, R. P. (1993). *Engineering principles of agricultural machines* (Textbook No. 8). American Society of Agricultural Engineers (ASAE), St. Joseph, MI, USA.
- Stathers, T., Holcroft, D., Engelbert, M., Ravat, Z., & Marion, P. (2025). The evidence on crop postharvest loss reduction interventions for sub-Saharan African and South Asian food systems: A systematic scoping review update 2024. *Journal of Stored Products Research*, 114, 102727. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102727>
- Taherzadeh-Shalmai, N., Sharifi, M., & Ghasemi-Mobtaker, H. (2021). Evaluating and selecting the best method of weeding in rice farm using TOPSIS ranking technique. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 51(4), 781–791. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.302000.665304> (in Persian).
- Wu, L. H., Hu, Q. P., Wang, J. H., & Zhu, D. (2017). Empirical analysis of the main factors influencing rice harvest losses based on sampling survey data of ten provinces in China. *China Agricultural Economic Review*, 9(2), 287–302.
- Zandi, P., Rahmani, M., Khanian, M., & Mosavi, A. (2020). Agricultural risk management using fuzzy TOPSIS analytical hierarchy process (AHP) and failure mode and effects analysis (FMEA). *Agriculture*, 10(11), 504. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110504>
- Zhang, Y. L., & You, W. J. (2014). Research on social vulnerability assessment of urban natural disaster based on TOPSIS: Taking Shanghai as an example. *Disaster Science*, 29(1), 109–114.