



Iranian Agricultural Extension and Education Association

Online ISSN: 2980-8561

Iranian Agricultural Extension and Education Journal

Journal Homepage: <http://www.iaeej.ir/>

Research Paper

Developing and Prioritizing a Roadmap for Agricultural Smartness Centered on Sustainable Entrepreneurship: A Combined Approach of Comparative Study and Multi-Criteria Decision-Making

Ahmad Jalili^a , Hadi Sanaeepour^b ^a Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Sciences and Engineering, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran^b Department of Management Sciences, Faculty of Humanities, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 May 2026

Revised: 18 August 2026

Accepted: 22 August 2026

Keywords:

Agricultural smartization
Analytical hierarchy process (AHP)
Comparative study
Entrepreneurship development strategies
Digital technologies
Innovation ecosystem
Technology roadmap

ABSTRACT

In today's world, agriculture needs to undergo transformation to overcome challenges such as population growth, resource constraints, and climate change, and the adoption of digital and smart technologies is recognized as a fundamental strategy for facilitating this transition. However, the lack of a comprehensive roadmap that determines the optimal policy mix suited to the institutional and market context for fostering entrepreneurship in this sector has left decision-makers facing strategic uncertainty. The main objective of this study is to identify, formulate, and prioritize smart strategies for the development of sustainable entrepreneurship in Iran's agricultural sector, drawing on the experiences of leading countries. This study was conducted using a mixed-method exploratory design in two consecutive phases. In the qualitative phase, an international comparative study approach was employed to examine the policies of 11 developed countries using content analysis. The analytical framework for this phase was based on the integration of the SECI knowledge management model and dynamic capabilities theory. In the quantitative phase, the identified strategies were weighted and prioritized using the AHP technique, based on the judgments of a panel of experts within Iran's agricultural innovation ecosystem. A comparative analysis of country experiences led to the identification of 12 key strategies, which were categorized into four main dimensions: "cognitive," "technological," "transparency and exchange," and "transformative" infrastructures. The final synthesis of the AHP results showed that the "education and empowerment" indicator (cognitive infrastructure) ranked first among the strategic priorities, accounting for 18.9% of the total weight. This was followed by "marketing platforms," with 15.4%, and "precision and data-driven agriculture," with 12.0%. Pareto analysis demonstrated that these three critical factors collectively accounted for 46.3% of the overall importance of the roadmap. Advanced technologies such as artificial intelligence and robotics were also ranked among the lowest-priority areas due to structural and land-scale constraints in Iran. The research findings strongly suggest that the transition to smart agriculture in developing economies is a human-centered and economically driven mission rather than merely a hardware-related challenge. Strategic success in this direction requires prioritizing the enhancement of farmers' digital literacy, creating transparency in the supply chain through intermediary platforms, and developing infrastructure connectivity in rural areas.

1. Introduction

Agriculture is increasingly challenged by population growth, climate change, resource scarcity, and rising food demand, making digital transformation a strategic necessity. Smart agriculture integrates technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), big data, robotics, and remote sensing to improve productivity, optimize resource consumption, and enhance environmental sustainability (DeBoe and Jouanjan, 2019). Recent reports indicate that global food insecurity and declining agricultural productivity growth have intensified the need for technological innovation in agriculture (FAO, 2024). Studies also show that AI-based and precision agriculture technologies can significantly improve crop management, disease detection, and resource efficiency (Liakos *et al.*, 2018).

* Corresponding author: Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Sciences and Engineering, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran.

E-mail address: jalili@gonbad.ac.ir

<https://doi.org/10.22034/iaeej.2026.582471.1906>

Despite the global expansion of smart agriculture, many developing countries still lack an integrated roadmap aligned with their institutional and market conditions. In Iran, limited digital infrastructure, low adoption of advanced monitoring systems, and insufficient policy coordination have slowed the transition toward smart and entrepreneurial agriculture. Accordingly, this study aims to identify and prioritize smart agriculture strategies for sustainable agricultural entrepreneurship in Iran through a comparative analysis of leading countries and the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP). The study further employs an integrated analytical framework based on the SECI knowledge management model and Dynamic Capabilities Theory to explain the relationship between knowledge creation, digital transformation, and sustainable agricultural entrepreneurship.

2. Methodology

This study is applied in terms of its purpose and adopts an exploratory mixed-methods design. The research was conducted in two sequential phases. In the qualitative phase, a comparative study of smart agriculture policies and practices in 11 leading countries, including Japan, the Netherlands, Germany, the United States, South Korea, China, Australia, Denmark, Spain, France, and Brazil, was conducted. Data were collected through document analysis using reports from the FAO and OECD, governmental documents, and scientific publications. Thematic analysis was employed to identify common smart agriculture strategies and policy patterns (Braun & Clarke, 2006). The analytical framework of the study was developed through the integration of the SECI knowledge management model (Nonaka & Takeuchi, 2007) and Dynamic Capabilities Theory (Teece *et al.*, 2018). Based on this framework, the extracted strategies were classified into four dimensions: cognitive infrastructure, technological infrastructure, transparency and exchange infrastructure, and transformative infrastructure. In the quantitative phase, the identified strategies were prioritized using the Analytic Hierarchy Process (AHP). Expert judgments were collected through pairwise comparison questionnaires administered to a panel of 15 specialists in agricultural management, smart technologies, agricultural extension, and agribusiness entrepreneurship. The consistency ratio of the comparisons was evaluated according to Saaty's standard to ensure the reliability of the results.

3. Results

The comparative analysis of the selected countries led to the identification of 12 key smart agriculture strategies, categorized into four main dimensions: cognitive infrastructure, technological infrastructure, transparency and exchange infrastructure, and transformative infrastructure. The findings revealed that leading countries have adopted different strategic priorities based on their institutional conditions, environmental challenges, and economic needs. While countries such as Japan and South Korea have emphasized automation and smart farming systems, countries such as Germany and the United States have focused on data infrastructure and digital platforms. In contrast, Brazil and China have prioritized rural connectivity and reducing the digital divide. The AHP results indicated that "training and empowerment of farmers," within the cognitive infrastructure dimension, received the highest priority weight (18.9%), highlighting the importance of digital literacy and human capital development in the transition toward smart agriculture. "Digital marketing platforms" (15.4%) and "data-driven precision agriculture" (12.0%) ranked second and third, respectively. Pareto analysis further demonstrated that these three strategies accounted for nearly 46.3% of the total strategic importance. The results also showed that advanced technologies, such as AI-driven robotics and full automation, received lower priority in the Iranian context due to structural limitations, small-scale farming systems, and insufficient digital infrastructure. Overall, the findings suggest that the successful development of smart agriculture in developing economies depends more on human-centered capacity building, institutional coordination, and market integration than on technology adoption alone.

4. Discussion

The findings of this study demonstrate that the transition toward smart agriculture in developing countries is not solely a technological issue but a multidimensional transformation requiring human, institutional, and entrepreneurial capacities. The prioritization results emphasize that farmer training and digital empowerment are more critical than the direct adoption of advanced technologies. This finding is consistent with previous studies highlighting the importance of digital literacy, social learning, and institutional support for the successful implementation of smart agriculture systems. The comparative analysis also revealed that successful countries have adapted their smart agriculture policies according to local environmental, economic, and structural conditions. Therefore, a universal policy model cannot be effectively applied across different contexts. In Iran, limitations such as fragmented farmland, weak rural connectivity, and insufficient innovation ecosystems reduce the feasibility of large-scale automation and AI-based robotics in the short term. Furthermore, the study confirms that digital platforms, data-driven agriculture, and transparent supply chains can strengthen sustainable agricultural entrepreneurship by improving market access, reducing transaction costs, and increasing productivity. The integrated framework based on the SECI model and

Dynamic Capabilities Theory also highlights the role of knowledge sharing, institutional learning, and adaptive capabilities in achieving long-term agricultural transformation. Overall, the study suggests that policymakers should prioritize investment in rural digital infrastructure, farmer education, innovation networks, and digital market platforms to accelerate the development of sustainable smart agriculture ecosystems.

5. Conclusion

The study identified and prioritized key smart agriculture strategies for sustainable agricultural entrepreneurship in Iran. The findings show that farmer training, digital empowerment, digital market platforms, and precision agriculture are the most important priorities for successful agricultural transformation. The results also indicate that sustainable smart agriculture requires an integrated approach that combines technology, human capacity development, institutional support, and digital infrastructure.

Acknowledgments

The authors were supported by Gonbad Kavous University through the project entitled “Designing a Multi-Criteria Decision-Making Model and Prioritizing Smartization Strategies in the Development of Agricultural Entrepreneurship in Iran Using the Analytic Hierarchy Process (AHP),” under Grant No. 6/04/114.

Refrence

- Braun, V., and Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- DeBoe, G., and Jouanjean, M. (2019). *Digital opportunities for better agricultural Policies*. Paris, France: Organisation for economic co-operation and development.
- FAO. (2024). The state of food security and nutrition in the world 2024 (SOFI 2024). FAO.
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., and Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Nonaka, I., and Takeuchi, H. (2007). The knowledge-creating company. *Harvard Business Review*, 85(7/8), 162.
- Teece, D. J. (2018). Business models and dynamic capabilities. *Long Range Planning*, 51(1), 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2017.06.007>

طراحی نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی ایران با تأکید بر کارآفرینی پایدار: ترکیب تجارب جهانی و اولویت‌بندی مبتنی بر تحلیل سلسله‌مراتبی

احمد جلیلی^{۱*} و هادی ثنائی‌پور^۲

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰؛ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱)

چکیده

کشاورزی ایران برای مواجهه با محدودیت منابع، تغییرات اقلیمی و ضرورت توسعه کارآفرینی پایدار، نیازمند گذار به الگویی هوشمند و داده‌محور است. با این حال، نبود یک نقشه راه جامع و متناسب با شرایط نهادی و بازار، اولویت‌بندی اقدامات هوشمندسازی را دشوار خواهد ساخت. پژوهش حاضر با هدف شناسایی و اولویت‌بندی راهبردهای هوشمندسازی کشاورزی ایران با تأکید بر کارآفرینی پایدار انجام شد. این پژوهش با رویکرد آمیخته اکتشافی در دو مرحله انجام شد. در مرحله نخست، تجارب ۱۱ کشور با استفاده از مطالعه تطبیقی و تحلیل مضمون بررسی و راهبردهای کلیدی در چهار بعد شناختی، فناورانه، شفافیت و مبادله و تحول‌آفرین استخراج شد. در مرحله دوم، راهبردهای شناسایی‌شده با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و بر اساس قضاوت‌های خبرگان اولویت‌بندی شد. نتایج نشان داد که آموزش و توانمندسازی، پلتفرم‌های بازاررسانی و کشاورزی دقیق و داده‌محور مهم‌ترین اولویت‌ها بودند و در مجموع ۴۶/۳ درصد از وزن کل را به خود اختصاص دادند. یافته‌ها نشان دادند که گذار به کشاورزی هوشمند در ایران، پیش از توسعه فناوری‌های پیشرفته، به تقویت سرمایه انسانی، دسترسی مؤثر به بازار و توسعه زیرساخت‌های ارتباطی نیاز دارد. نوآوری پژوهش در ارائه یک نقشه راه بومی و اولویت‌بندی‌شده است که با تلفیق شواهد تطبیقی بین‌المللی و قضاوت خبرگان، الزامات فناورانه، نهادی، اقتصادی و کارآفرینانه هوشمندسازی کشاورزی ایران را در چارچوبی یکپارچه مورد توجه قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اکوسیستم نوآوری، راهبردهای توسعه کارآفرینی، فناوری‌های دیجیتال، هوشمندسازی کشاورزی، نقشه راه فناوری.

^۱ استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده علوم پایه و فنی مهندسی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران.

^۲ دانشیار گروه علوم مدیریت، دانشکده علوم انسانی آزادشهر، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران.

* نویسنده‌ی مسئول، پست الکترونیک: jalili@gonbad.ac.ir

در دنیای امروز، کشاورزی با چالش‌هایی چون رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی و کمبود منابع مواجه است که ضرورت تحول در شیوه‌های تولید و مدیریت آن را آشکار کرده است. در چنین شرایطی، بکارگیری فناوری‌های دیجیتال در مسیر هوشمندسازی کشاورزی به عنوان راهبردی بنیادین برای غلبه بر این موانع شناخته می‌شود. هوشمندسازی کشاورزی به معنای بکارگیری فناوری‌های پیشرفته‌ای همچون اینترنت اشیا، یادگیری ماشین، پردازش داده‌های حجیم، سیستم‌های تصویربرداری از راه دور، علم رباتیک و ابزارهای پشتیبان تصمیم‌گیری برای بهبود فرآیندهای تولید و مدیریت است. این فناوری‌ها می‌توانند زمینه‌ساز افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها، ارتقای پایداری محیط‌زیستی و بهبود کیفیت محصولات شوند. با وجود نقش بنیادین کشاورزی در تأمین امنیت غذایی و ایجاد اشتغال، فشارهای ناشی از رشد جمعیت، افزایش تقاضا و محدودیت منابع، نوآوری در این بخش را به یک ضرورت سیاستی تبدیل کرده است (United Nations, 2024).

بر اساس گزارش «وضعیت امنیت غذایی و تغذیه در جهان ۲۰۲۴»، در سال ۲۰۲۳ تقریباً یک نفر از هر ۱۱ نفر از جمعیت جهان با گرسنگی مواجه بوده‌اند و درصد بالایی از جمعیت جهان نیز سطوح متوسط تا شدید ناامنی غذایی را (از متوسط تا شدید) تجربه کرده‌اند. این ارقام، هم ابعاد انسانی بحران را فاش می‌کنند و هم ناکارآمدی زنجیره‌های کنونی تولید، توزیع و دسترسی به غذا را نشان می‌دهند (Unicef, 2024).

شواهد حاکی از آن است که نرخ رشد بهره‌وری کل عوامل (Total Factor Productivity. TFP) در بخش کشاورزی برای پاسخگویی به تقاضای فزاینده آینده کفایت نمی‌کند و در بسیاری از نقاط جهان حتی روند نزولی داشته است. بر اساس شاخص جهانی بهره‌وری کشاورزی، رشد کنونی کمتر از سطح موردنیاز برای تأمین خوراک جمعیت تا سال ۲۰۵۰ است (USDA, 2023). پژوهش‌های اقتصاد اقلیم نیز نشان می‌دهند که تغییرات آب‌وهوایی در طول تاریخ، حدود یک‌پنجم رشد بهره‌وری کشاورزی در سطح جهان را کاهش داده است. جبران این کاهش، نیازمند افزایش چشمگیر سرمایه‌گذاری عمومی در حوزه تحقیق و توسعه می‌باشد (Ortiz-Bobea et al., 2025).

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در تشخیص بیماری گیاهی، پیش‌بینی عملکرد، کنترل علف هرز و مدیریت منابع به دقت بالایی رسیده‌اند (Liakos et al., 2018). این پیشرفت‌ها زمینه‌ساز توسعه مفهوم «کشاورزی هوشمند» شده‌اند؛ رویکردی که از داده، هوش مصنوعی (Artificial intelligence. AI) و زیرساخت دیجیتال برای تصمیم‌گیری، خودکارسازی و نوآوری در کل زنجیره مزرعه تا بازار استفاده می‌کند. کاربردهای هوش مصنوعی در این حوزه شامل تشخیص آفات، پیش‌بینی محصول، بهینه‌سازی نهاده‌ها، رباتیک و سیستم‌های توصیه‌گر است. این مفهوم دامنه‌ای فراتر از کشاورزی دقیق دارد و حکمرانی داده، استانداردها، مهارت‌ها، تأمین مالی و تنظیم بازارهای دیجیتال را نیز دربرمی‌گیرد (Bogucki, 2025).

کشورهای مختلف برای بهره‌گیری از مزیت‌های کشاورزی هوشمند، سیاست‌های گوناگونی را دنبال کرده‌اند. بسته‌های سیاستی کشورها برای کشاورزی هوشمند شامل طراحی اکوسیستم دیجیتال (Digital Ecosystem)، حاکمیت داده (Data Governance)، پلتفرم‌ها و نوآوری است. موانعی مانند شکاف در دسترسی و اتصال دیجیتال و مهارت در مناطق روستایی، هزینه بالا و عدم قطعیت درباره بازگشت سرمایه، پذیرش را کند کرده است (De Vries et al., 2023). در ایران، تنها ۱۲ درصد مزارع به سیستم‌های پایش پیشرفته مجهزند (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲)، این در حالی است که کشورهای همسایه نظیر ترکیه و امارات متحده عربی با سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری کشاورزی (Agricultural Technology. AgriTech)، سهم هوشمندسازی را به ترتیب به ۲۸ و ۳۵ درصد رسانده‌اند. آمارها نشان می‌دهد کسب‌وکارهای کشاورزی دیجیتال‌شده (Digitalized Agriculture) به‌طور متوسط ۲۵ درصد سودآوری بیشتر و ۳۰ درصد هزینه کمتر دارد (Unicef, 2024).

شواهد تجربی مؤید آن است که گذار به سوی کشاورزی هوشمند مبتنی بر داده (Data-Driven Smart Agriculture)، اگرچه به‌تنهایی کافی نیست، اما یک ضرورت بنیادین برای ارتقای بهره‌وری، افزایش تاب‌آوری در برابر مخاطرات اقلیمی و شکوفایی کارآفرینی در این بخش تلقی می‌شود. با این حال، فقدان نقشه راهی که ترکیب بهینه سیاستی را متناسب با بستر نهادی-بازاری تعیین کند، تصمیم‌گیران را با عدم قطعیت راهبردی مواجه ساخته است. بدین جهت، پژوهش حاضر با هدف اصلی

شناسایی و اولویت‌بندی راهبردهای هوشمندسازی در راستای توسعه کارآفرینی کشاورزی انجام شده است. این پژوهش، از ترکیب روش‌هایی نظیر مطالعه تطبیقی بین‌المللی و تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده کرده است. این مطالعه با تلفیق رویکرد تطبیقی و تحلیل سلسله‌مراتبی، درصدد پاسخ به پرسش‌های زیر است: راهبردهای هوشمندسازی در کشورهای منتخب چگونه به توسعه کارآفرینی کشاورزی منجر شده‌اند؟ تجارب عینی و پروژه‌های عملیاتی اجرا شده در این کشورها کدام‌اند؟ با توجه به شرایط بومی و الزامات ساختاری ایران، چه راهبردهایی برای طراحی برنامه‌های هوشمندسازی با محوریت توسعه کارآفرینی در بخش کشاورزی قابل ارائه است؟ و اولویت‌بندی مهم‌ترین راهبردهای شناسایی شده بر چه مبنایی انجام می‌شود؟ در نهایت، یافته‌های این پژوهش می‌تواند چارچوبی عملیاتی و مبتنی بر شواهد برای مخاطبانی همچون سیاست‌گذاران، کارآفرینان و سرمایه‌گذاران فعال در اکوسیستم نوآوری و کارآفرینی کشاورزی فراهم آورد.

الف- هوشمندسازی در کشاورزی. نظریات و کاربردها

انقلاب کشاورزی دیجیتال (Digital Agriculture) که در پی انقلاب سبز شکل گرفته، حاصل بکارگیری رویکردهایی همچون کشاورزی دقیق و فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، بلاک‌چین و هوش مصنوعی در زنجیره تأمین است (Bertoglio et al., 2021). این تحول علاوه بر افزایش بهره‌وری، به پایداری محیط‌زیستی، عدالت اجتماعی و تاب‌آوری اقلیمی نیز کمک می‌کند (Rose & Chilvers, 2018).

در ادبیات علمی دو دهه اخیر، کشاورزی هوشمند به مفهومی محوری تبدیل شده است. ولفرت و همکاران (Wolfert et al., 2017)، کشاورزی هوشمند را سامانه‌ای مبتنی بر داده‌های کلان، اینترنت اشیا و ابزارهای تحلیلی برای پشتیبانی تصمیم‌گیری کشاورزان تعریف می‌کند. برخلاف کشاورزی دقیق که بر مدیریت متغیرهای درون‌مزرعه‌ای تمرکز داشت، کشاورزی هوشمند یکپارچه‌سازی تمام زنجیره تولید را از طریق سامانه‌های دیجیتال دنبال می‌کند (Klerkx et al., 2019). برخی پژوهشگران آن را جزئی از کشاورزی ۴.۰ می‌دانند، رویکردی که حاصل ورود فناوری‌های نسل چهارم صنعتی شامل اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، رباتیک، سنجش از دور و بلاک‌چین به عرصه کشاورزی است (Maffezzoli et al., 2022). کشاورزی ۴.۰ به‌عنوان پارادایمی نوین بر همگرایی سیستم‌های سایبرفیزیکی (Cyber-Physical Systems)، داده‌محور و هوش مصنوعی در کل زنجیره ارزش تأکید دارد و مفهوم اینترنت کشاورزی (Internet of Agriculture. IoA) را شکل می‌دهد. اینترنت کشاورزی به یکپارچه‌سازی فناوری‌های ارتباطی، حسگرها، اینترنت اشیا، داده‌ها و سامانه‌های هوشمند در سراسر زنجیره ارزش کشاورزی اشاره دارد که با هدف پیش، تبادل داده، تحلیل اطلاعات و پشتیبانی از تصمیم‌گیری و عملیات کشاورزی شکل می‌گیرد (Klerkx et al., 2019; Maffezzoli et al., 2022).

رویکرد تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت نشان می‌دهد که پذیرش فناوری توسط کشاورزان ابتدا تحت تأثیر ابهام و اعتماد اجتماعی است و سپس، محاسبه ریسک؛ از این‌رو کاهش ابهام از طریق یادگیری اجتماعی و مشوق‌های مالی ضروری است (Dessart et al., 2019). از میان چارچوب‌های نظری موجود، نظریه انتشار نوآوری راجرز، پذیرش تدریجی فناوری را در پنج گروه پذیرندگان تبیین می‌کند، در حالی که گذار از پذیرندگان اولیه به اکثریت، نیازمند سیاست‌های حمایتی و آموزشی است. چارچوب فناوری-سازمان-محیط (Technology-Organization-Environment. TOE) نیز سه دسته عامل زیرساختی، مدیریتی و نهادی را در پذیرش فناوری هوشمند مؤثر می‌داند در کشورهای درحال توسعه، هزینه‌های بالا و ضعف زیرساخت‌های ارتباطی از موانع اصلی به شمار می‌روند (Lioutas & Charatsari, 2020).

از منظر نوآوری اجتماعی، موفقیت فناوری‌های دیجیتال کشاورزی به اعتماد و همکاری میان ذینفعان وابسته است. نظریه قابلیت‌های پویا نیز نشان می‌دهد فناوری‌های دیجیتال امکان پردازش داده و تبدیل آن به دانش کاربردی و تصمیم‌سازی بهینه را فراهم می‌کند (Teece, 2018). در مقابل، رویکرد انتقادی هشدار می‌دهد که تمرکز صرف بر فناوری باعث حاشیه‌نشینی کشاورزان خرد و تشدید شکاف دیجیتال می‌شود (Bronson, 2019). همچنین فناوری‌های دیجیتال با بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و کاهش ضایعات به پایداری کمک می‌کنند، هرچند بررسی پیامدهای اخلاقی و محیط‌زیستی آن‌ها همچنان ضروری است (Rotz et al., 2019).

از منظر سیستمی، ایستوود و همکاران (Eastwood et al., 2019) تأکید دارند که فناوری‌های دیجیتال بخشی از ساختار اجتماعی و نهادی کشاورزی محسوب می‌شوند. سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) نیز کشاورزی هوشمند را ابزاری برای دستیابی به سه هدف بهره‌وری، تاب‌آوری و کاهش آثار محیط‌زیستی معرفی کرده است (Ouda & Zohry, 2022). در مقابل، پژوهش برانسون (Bronson, 2019) با رویکردی انتقادی هشدار می‌دهد که تمرکز صرف بر فناوری می‌تواند به تشدید نابرابری‌های اجتماعی و اقتصادی در میان کشاورزان بینجامد.

تحول دیجیتال در کشاورزی درواقع ترکیبی از دیجیتالی‌سازی داده‌ها، هوشمندسازی فرآیندها و بازآفرینی زنجیره ارزش است (Bronson & Knezevic, 2016). این تحول عمدتاً با ظهور و توسعه فناوری‌های کلیدی پیوند خورده است. اینترنت اشیا با اتصال حسگرها، ماشین‌آلات و تجهیزات کشاورزی به یکدیگر، پایش برخط شرایط مزرعه مانند رطوبت خاک، دما، سلامت گیاهان و وضعیت دام را ممکن ساخته و کارایی مصرف آب و کود را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (Tang et al., 2024).

هوش مصنوعی نیز الگوریتم‌های یادگیری ماشین (Machine Learning Algorithms) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks) را برای پیش‌بینی عملکرد محصول، تشخیص بیماری‌های گیاهی، بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها و مدیریت ریسک‌های اقلیمی به کار می‌گیرد (Liakos et al., 2018). در دامپروری، سیستم‌های بینایی ماشین (Machine Vision Systems) مبتنی بر هوش مصنوعی برای پایش سلامت دام و پیش‌بینی بیماری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توانند به کاهش هزینه‌های درمان و ارتقای رفاه حیوانات کمک کنند (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

داده‌های بزرگ نیز نقشی اساسی در این تحول ایفا می‌کنند، زیرا حجم عظیم داده‌های حاصل از حسگرها، ماهواره‌ها، ماشین‌آلات و سامانه‌های بازار نیازمند پردازش و تحلیل پیشرفته است. مدیریت داده‌های بزرگ به تصمیم‌گیران کمک می‌کند الگوهای پیچیده تولید، عرضه و تقاضا را شناسایی کرده و راهبردهای کارآمدتری طراحی نمایند (Klerkx et al., 2019). رباتیک و ماشین‌آلات خودکار نیز از دیگر محورهای اصلی هوشمندسازی هستند. ربات‌های برداشت محصول، پهپادهای کشاورزی، تراکتورهای خودران و ماشین‌آلات مجهز به سامانه‌های هوشمند می‌توانند نیاز به برخی فعالیت‌های نیروی کار انسانی را کاهش داده یا تغییر دهند و در عین حال سرعت و دقت عملیات را افزایش دهند (Bechar & Vigneault, 2016).

پهپادها با قابلیت تصویربرداری و پایش هوایی، داده‌های ارزشمندی برای مدیریت مزارع فراهم می‌کنند و در عملیات‌هایی نظیر سم‌پاشی دقیق و نقشه‌برداری اراضی کشاورزی به کار می‌روند (Tsouros et al., 2019). فناوری بلاک‌چین نیز شفافیت و قابلیت رهگیری در زنجیره تأمین محصولات کشاورزی را ممکن ساخته و با قراردادهای هوشمند، کارایی تبادلات مالی میان کشاورزان و سایر ذینفعان را ارتقا می‌بخشد. افزون بر این فناوری‌ها، سنجش از دور (Remote Sensing)، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (Geographic Information Systems – GIS) و شبیه‌سازی‌های اقلیمی (Climate Simulations) نیز امکان مدیریت مکانی منابع و پایش تغییرات محیطی را فراهم می‌کنند (Gebbers & Adamchuk, 2010).

هوشمندسازی کشاورزی یکی از محرک‌های مهم بهره‌وری و نوآوری در این بخش به شمار می‌رود. فناوری‌های هوشمند، فرآیندهای سنتی و مبتنی بر تجربه را به سامانه‌هایی داده‌محور، دقیق و پویا تبدیل می‌کنند که در آن تصمیم‌گیری‌ها با در نظر گرفتن تفاوت‌های مکانی و زمانی صورت می‌گیرد (Wolfert et al., 2017). برای نمونه، تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از سامانه‌های هوشمند آبیاری می‌تواند مصرف آب را تا ۳۰ درصد کاهش دهد، در حالی که عملکرد محصول ثابت مانده یا حتی افزایش یافته است (Tang et al., 2024).

از منظر نوآوری، ترکیب داده‌های بزرگ با مدل‌های پیش‌بینی بازار به کشاورزان امکان می‌دهد محصولات خود را متناسب با تقاضای آینده تولید کرده و از نوسانات قیمتی جلوگیری کنند؛ همچنین بلاک‌چین و قراردادهای هوشمند، بازارهای جدیدی برای محصولات باکیفیت‌تر و پایدارتر ایجاد کرده‌اند. در بعد پایداری، فناوری‌های هوشمند با امکان پایش دقیق و بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها، کاهش مصرف سموم شیمیایی، مدیریت کارآمد آب و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را ممکن ساخته و بدین ترتیب کارایی محیط‌زیستی کشاورزی را بهبود می‌بخشند (Rose & Chilvers, 2018).

از منظر نهادی نیز داده‌های بزرگ و تحلیل‌های پیشرفته به دولت‌ها این امکان را می‌دهند که راهبردهای حمایتی را دقیق‌تر طراحی کرده و منابع را کارآمدتر تخصیص دهند که در نتیجه به افزایش بهره‌وری کلان در سطح ملی و ارتقای نوآوری نهادی در حکمرانی بخش کشاورزی می‌انجامد (Lioutas & Charatsari, 2020). در مجموع، هوشمندسازی کشاورزی تلفیقی از

رویکردهای انتشار نوآوری، تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت، چارچوب فناوری-سازمان-محیط، قابلیت‌های پویا و دیدگاه‌های انتقادی-اجتماعی است که درک ابعاد تحول دیجیتال و برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار و عادلانه آن را ممکن می‌سازد. مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات داخلی و بین‌المللی، عمدتاً بر شناسایی عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری‌های هوشمند در کشاورزی متمرکز بوده‌اند؛ به‌طوری‌که بهاروند و همکاران (۱۴۰۱) بر نقش مزیت نسبی، سازگاری و پشتیبانی نهادی تأکید کرده و فقدان استانداردهای داده و خدمات پس از فروش را از موانع مقیاس‌پذیری کارآفرینانه معرفی کرده‌اند. کرمی‌فرد و گراوندی (۱۳۹۹) نیز با تأکید بر محدودیت‌های مالی و کمبود زیرساخت دیجیتال نشان داده‌اند که حتی ترکیب اینترنت اشیا و حسگرهای زیستی نیز بدون توانمندسازی مهارتی و حمایت سیاستی، الزاماً به بهره‌برداری پایدار از فرصت‌های بازار منجر نمی‌شود. اعتمادی و همکاران (۱۴۰۱) نیز با ورود به حوزه سرمایه اجتماعی و ویژگی‌های روان‌شناختی، لزوم تلفیق مشوق‌های مالی با فعالیت‌های ترویجی را برجسته می‌سازند. در سطح بین‌المللی، کاباتو و همکاران (Kabato et al., 2025) و باسو و آنتل (Basso & Antle, 2020) بر ضرورت سیاست‌های حمایتی و سازوکارهای تأمین مالی نوآورانه و اهمیت پیوند تحلیل سناریو با مدل‌های اقتصادی تأکید دارند. در حالی که گتاهون و همکاران (Getahun et al., 2024)، اندازه مزرعه و سرمایه انسانی و دسترسی به پهنای باند اینترنت را به‌عنوان عوامل کلیدی پذیرش فناوری‌های کشاورزی دقیق معرفی می‌کنند. عالم و همکاران (Alam et al., 2023) نیز با تمرکز بر تاب‌آوری زنجیره غذایی در شوک‌های سیستمی، سرمایه‌گذاری در سکوها اطلاعاتی بومی را توصیه می‌کنند. چنگ و همکاران (Cheng et al., 2024) نقش مهارت‌های دیجیتال کشاورزان را در بهبود دسترسی به اعتبار، فناوری و شبکه‌های اجتماعی از مسیر توانمندسازی کارآفرینانه، نشان می‌دهند. باین‌حال، مرور دقیق مطالعات پیشین نشان می‌دهد که یکی از شکاف‌های اصلی پژوهش، فقدان مدل‌های یکپارچه‌ای است که به‌طور همزمان تعامل پویای میان «عوامل فنی-زیرساختی»، «عوامل نهادی-سیاستی»، «عوامل انسانی-اجتماعی»، و «عوامل اقتصادی-بازاری» را در قالب یک تحول پیچیده فنی و اجتماعی تبیین کنند. عوامل فنی و زیرساختی شامل استانداردهای داده، پهنای باند و قابلیت‌های حسگری؛ عوامل نهادی و سیاستی شامل حمایت نهادی، مشوق‌های مالی و سازوکارهای تأمین مالی نوآورانه؛ عوامل انسانی و اجتماعی شامل سرمایه اجتماعی، مهارت‌های دیجیتال و ویژگی‌های روان‌شناختی؛ و عوامل اقتصادی و بازاری شامل اندازه مزرعه، هزینه خدمات اشتراکی و مقیاس‌پذیری کارآفرینانه هستند. بر این اساس، پژوهش حاضر چارچوبی چندلایه ارائه می‌دهد که در آن هوشمندسازی کشاورزی در گرو همکاری هماهنگ میان دولت، بخش خصوصی، دانشگاه و جوامع محلی تعریف می‌شود. در این چارچوب، تعامل و همکاری میان این چهار گروه، یکی از الزامات مهم گذار به الگویی از کارآفرینی کشاورزی پایدار و داده‌محور محسوب می‌شود.

ب- چارچوب تحلیلی برای دسته‌بندی عوامل مؤثر بر توسعه هوشمندسازی در کشاورزی

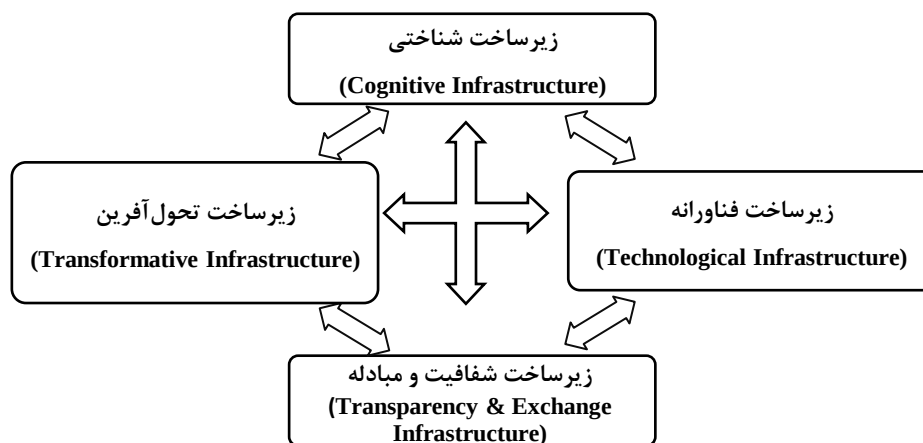
عوامل مؤثر بر توسعه هوشمندسازی در کشاورزی را بر اساس مدل اجتماعی‌سازی، برون‌سازی، ترکیب و درونی‌سازی (Socialization, Externalization, Combination and Internalization, SECI) می‌توان به چهار بعد دسته‌بندی کرد. این مدل، یکی از بنیادی‌ترین و پر استنادترین نظریه‌ها در حوزه مدیریت دانش و نوآوری سازمانی است که بر تمایز میان دو نوع دانش آشکار و پنهان تأکید دارد. دانش آشکار؛ قابلیت بیان، مستندسازی و انتقال از طریق زبان رسمی را دارد، در حالی که دانش پنهان ریشه در تجربه، مهارت، بینش و قضاوت فردی دارد و انتقال آن عمدتاً از طریق تجربه، مشاهده، تعامل و یادگیری غیررسمی صورت می‌گیرد (Nonaka, 2009). نظریه‌پردازان استدلال می‌کنند که موفقیت پایدار سازمان‌ها در خلق نوآوری، نه در مدیریت دانش آشکار، بلکه در توانایی تبدیل دانش پنهان به دانش آشکار و برعکس نهفته است (Easa, 2012). این فرآیند تبدیل دانش از طریق چهار شیوه تعاملی در قالب یک چرخه مارپیچی به نام SECI تبیین می‌شود و شامل جامعه‌پذیری، برون‌سازی، ترکیب و درونی‌سازی است.

اجتماعی‌سازی (Socialization)، فرآیند تبدیل دانش پنهان به دانش پنهان جدید از طریق تعاملات چهره‌به‌چهره، مشاهده، تقلید و تمرین مشترک است. این شیوه مبتنی بر اشتراک تجربیات و ایجاد فضاهای مشترک برای تعامل است. برون‌سازی (Externalization)، فرآیند تبدیل دانش پنهان به دانش آشکار از طریق بازنمایی آن در قالب استعاره‌ها، تشبیهات، مفاهیم،

طراحی نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی ایران با تأکید بر کارآفرینی پایدار: ترکیب تجارب جهانی و ...

مدل‌ها و فرضیه‌ها است. این مرحله، حساس‌ترین و کلیدی‌ترین حلقه در فرآیند خلق دانش محسوب می‌شود. ترکیب (Combination)، فرآیند تبدیل دانش آشکار به دانش آشکار پیچیده‌تر و نظام‌مندتر از طریق گردآوری، بازآرایی، دسته‌بندی و ترکیب دانش‌های آشکار موجود می‌باشد. فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات نقش مهمی در تسهیل این فرآیند ایفا می‌کنند. درونی‌سازی (Internalization) نیز فرآیند تبدیل دانش آشکار به دانش پنهان فردی از طریق عمل، تمرین، شبیه‌سازی و یادگیری حین کار است. این شیوه منجر به شکل‌گیری دارایی‌های دانشی و مهارت‌های عملی در افراد می‌شود (Nonaka, 2009; Ritonga et al., 2024).

از طرفی، نظریه قابلیت‌های پویا به توانایی سازمان در یکپارچه‌سازی، ایجاد و بازآرایی شایستگی‌های درونی و بیرونی برای مواجهه با محیط‌های به‌سرعت در حال تغییر اطلاق می‌شود. مفهوم "پویا" در این چارچوب به توانایی سازمان برای نوسازی مداوم شایستگی‌ها و همسوسازی آن‌ها با الزامات محیطی متغیر اشاره دارد (Teece, 2018). بر اساس پژوهش‌های اخیر، تلفیق مدل SECI (Nonaka et al., 1996) و چارچوب قابلیت‌های پویا (Teecet et al., 2018) در مطالعه کمیسیون اروپا در سال ۲۰۲۰ برای تحلیل نظام‌های غذایی پایدار به کار گرفته شده است. این مطالعه که از معتبرترین پژوهش‌ها در سطح سیاست‌گذاری اروپا است، نشان می‌دهد که تلفیق این دو نظریه می‌تواند چارچوبی تحلیلی قدرتمند برای فهم تحول در نظام‌های کشاورزی و غذایی ارائه دهد. بر همین مبنا، در پژوهش حاضر نیز از این تلفیق نظری برای طراحی چارچوب تحلیلی چهار بعدی استفاده شده است که در آن هر بعد به نوع مشخصی از زیرساخت دانشی یا قابلیت سازمانی اشاره دارد (European Commission, 2020). تلفیق این دو مدل یک چارچوب تحلیلی بدیع و قدرتمند برای این پژوهش ایجاد می‌کند که قادر است هم فرآیندهای خلق دانش و هم سازوکارهای تحول راهبردی در اکوسیستم هوشمندسازی کشاورزی را تبیین نماید. مدل SECI با تمرکز بر چگونگی تبدیل دانش پنهان به دانش آشکار از طریق چهار فرآیند جامعه‌پذیری، برون‌سازی، ترکیب و درونی‌سازی، ابزاری تحلیلی برای فهم جریان دانش در شبکه کنشگران کشاورزی فراهم می‌آورد (Nonaka, 2009). این مدل نشان می‌دهد که هوشمندسازی صرفاً به معنای واردات فناوری‌های پیشرفته نیست، بلکه مستلزم ایجاد بسترهای تعاملی است که در آن‌ها دانش پنهان کشاورزان و کارآفرینان به دانش آشکار و قابل تسهیم تبدیل شود. با این حال، مدل SECI به‌تنهایی توضیح کاملی درباره چگونگی پاسخگویی کنشگران به تغییرات سریع محیطی و تبدیل دانش خلق‌شده به مزیت رقابتی پایدار ارائه نمی‌کند. چارچوب قابلیت‌های پویا این شکاف را پر می‌کند و توضیح می‌دهد که چگونه کنشگران بخش کشاورزی می‌توانند از طریق سه قابلیت تشخیص، تصاحب و تحول (Sensing, Seizing & Transforming)، دانش خلق‌شده را به نوآوری مستمر و کارآفرینی پایدار تبدیل کنند (Teece, 2018). در واقع، مدل SECI فرآیند خلق دانش را تبیین می‌کند و چارچوب قابلیت‌های پویا مکانیسم بهره‌برداری از این دانش برای ایجاد تحول در محیط‌های پویا را توضیح می‌دهد. از این رو، دسته‌بندی چهار بعدی ارائه‌شده در این پژوهش، از یک سو بر اساس فرآیندهای چهارگانه SECI (ابعاد شناختی، فناوریانه، شفافیت و مبادله) و از سوی دیگر بر اساس قابلیت‌های پویا (بعد تحول‌آفرین) که به‌صورت ترکیبی و پژوهش‌ساخته هستند، شکل گرفته است. ابعاد این مدل در نگاره ۱ ارائه شده است.



نگاره ۱- چارچوب نظری پژوهش

این ترکیب نظری، امکان تحلیل همزمان چگونگی خلق دانش و چگونگی تبدیل آن به ارزش اقتصادی پایدار را در مسیر هوشمندسازی کشاورزی ایران فراهم می‌آورد. به این ترتیب، چارچوبی یکپارچه برای تدوین نقشه راه مبتنی بر توسعه کارآفرینی پایدار ارائه می‌دهد. تلفیق این دو نظریه که در پژوهش‌های اخیر (مانند مطالعه کمیسیون اروپا در سال ۲۰۲۰) برای تحلیل نظام‌های غذایی پایدار به کار گرفته شده است، امکان طراحی یک چارچوب تحلیلی چهار بعدی را فراهم آورد که در آن هر یک از ابعاد، معرف نوع خاصی از زیرساخت دانشی و قابلیت‌های است.

- زیرساخت شناختی مبتنی بر فرآیند جامعه‌پذیری است و بستر تعاملات انسانی، شبکه‌های دانش و جوامع عملی را فراهم می‌آورد. دانش پنهان کشاورزان، کارآفرینان و کارشناسان از طریق این زیرساخت به اشتراک گذاشته شده و زمینه برای خلق دانش جدید فراهم می‌شود.

- زیرساخت فناورانه مبتنی بر فرآیند ترکیب است و زیرساخت سخت‌افزاری و نرم‌افزاری را برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، پردازش و ترکیب داده‌های کلان کشاورزی فراهم می‌آورد. دانش پراکنده و خام از طریق این زیرساخت به دانش نظام‌مند و قابل استفاده تبدیل می‌شود.

- زیرساخت شفافیت و مبادله مبتنی بر فرآیند برون‌سازی است و دانش پنهان موجود در زنجیره تأمین (مانند اصالت محصول، شرایط تولید، مسیر انتقال، شیوه‌های کشت) را به اطلاعات آشکار، قابل ردیابی و شفاف برای مصرف‌کنندگان، بازار و نهادهای نظارتی تبدیل می‌کند. شفافیت، باعث ایجاد اعتماد و تسهیل در مبادلات می‌شود.

- زیرساخت تحول‌آفرین بر چارچوب قابلیت‌های پویا تکیه دارد و موتور محرکه نوآوری و کارآفرینی پایدار است. دانش خلق‌شده و نظام‌مند، در این مرحله به تشخیص فرصت‌های کارآفرینانه، طراحی مدل‌های کسب‌وکار نوین و تحول مستمر در نظام کشاورزی منجر می‌شود. این مرحله، ضامن پویایی و انطباق‌پذیری اکوسیستم در مواجهه با تغییرات فناورانه و محیطی است. ابعاد چهارگانه مورد اشاره و کارکردهای این ابعاد در اکوسیستم هوشمندسازی در بخش کشاورزی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ابعاد نظری مورد استفاده در پژوهش

ابعاد اصلی	کارکرد در اکوسیستم هوشمندسازی در بخش کشاورزی
زیرساخت شناختی (Cognitive Infrastructure)	اشتراک‌گذاری دانش پنهان و تجربی میان کشاورزان، کارآفرینان و کارشناسان در بسترهای دیجیتال.
زیرساخت فناورانه (Technological Infrastructure)	ترکیب و سیستماتیک‌سازی دانش آشکار از طریق فناوری‌های دیجیتال. ایجاد پایگاه‌های داده، سامانه‌های اطلاعاتی و پلتفرم‌هایی که دانش را قابل دسترس و تحلیل می‌کنند.
زیرساخت شفافیت و مبادله (Transparency & Exchange Infrastructure)	تبدیل دانش پنهان به دانش آشکار و قابل ردیابی و ایجاد شفافیت در زنجیره تأمین و بازار که اعتماد و مبادله ارزش را تسهیل می‌کند.
زیرساخت تحول‌آفرین (Transformative Infrastructure)	ایجاد ظرفیت برای تشخیص فرصت‌های جدید، تصاحب آن‌ها از طریق نوآوری و تحول مستمر سیستم. این مرحله، موتور محرکه کارآفرینی پایدار است.

در خصوص نوآوری نظری پژوهش و ارزش افزوده تلفیق چارچوب‌های نظری مورد استفاده، به‌ویژه مدل SECI و نظریه قابلیت‌های پویا، لازم است تأکید شود که هوشمندسازی کشاورزی صرفاً یک فرایند فناورانه نیست، بلکه نوعی تحول دانشی-نهادهای است که در آن خلق، اشتراک، جذب و بهره‌برداری از دانش باید همزمان با توسعه ظرفیت‌های انطباق، نوآوری و بازارآیی منابع صورت گیرد. نوآوری نظری پژوهش حاضر در این است که مدل SECI و نظریه قابلیت‌های پویا را نه به‌عنوان دو چارچوب مستقل، بلکه به‌عنوان دو لایه مکمل در یک سازوکار تحول یکپارچه به کار می‌گیرد. در این چارچوب، مدل SECI منطق خرد خلق، تبدیل و انتشار دانش میان کنشگران اکوسیستم کشاورزی هوشمند را تبیین می‌کند، در حالی که نظریه قابلیت‌های پویا توضیح می‌دهد که چگونه این دانش، از طریق قابلیت‌های تشخیص فرصت، بهره‌برداری از فرصت و بازارآیی منابع، می‌تواند به نوآوری، توسعه مدل‌های کسب‌وکار و ایجاد ارزش اقتصادی پایدار منجر شود. بنابراین، ارزش افزوده این تلفیق در آن است که شکاف میان خلق دانش و خلق ارزش را پر می‌کند؛ شکافی که در اغلب مطالعات پیشین به دلیل تمرکز صرف بر انتقال دانش یا قابلیت‌های سازمانی، مغفول مانده بود. بر این

اساس، چارچوب پیشنهادی پژوهش حاضر امکان تحلیل همزمان جریان دانش، تحول نهادی و پویایی کارآفرینی را فراهم ساخته و مبنایی نظری برای طراحی و اولویت‌بندی نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی با رویکرد کارآفرینی پایدار ارائه می‌دهد.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، دارای طرح آمیخته اکتشافی است. در طرح آمیخته اکتشافی، ابتدا داده‌های کیفی گردآوری و تحلیل می‌شوند و سپس بر اساس یافته‌های مرحله کیفی، ابزار و مراحل کمی پژوهش طراحی می‌گردد (Creswell & Clark, 2007). بر این اساس، این تحقیق در دو گام متوالی کیفی و کمی اجرا شده است.

پژوهش حاضر در فاز نخست خود از رویکرد مطالعه تطبیقی بهره گرفته است. مطالعات تطبیقی در علوم اجتماعی و سیاست‌گذاری، ابزاری مؤثر برای شناسایی شباهت‌ها و تفاوت‌های میان کشورها به شمار می‌رود و امکان استخراج الگوها و تجارب موفق را فراهم می‌کند (Hantrais, 2008). در این گام، سیاست‌های هوشمندسازی کشاورزی و توسعه کارآفرینی در ۱۱ کشور شامل ژاپن، هلند، آلمان، ایالات متحده آمریکا، کره جنوبی، چین، استرالیا، دانمارک، اسپانیا، فرانسه و برزیل بررسی شده است. انتخاب این کشورها به صورت هدفمند و بر اساس معیارهایی نظیر سطح توسعه اقتصادی، سابقه سیاست‌گذاری در حوزه کشاورزی هوشمند، دسترسی به داده‌های معتبر و تنوع جغرافیایی-فرهنگی صورت گرفته است (Eastwood et al., 2019).

گردآوری داده‌ها با روش اسنادی و مرور منابع ثانویه شامل گزارش‌های رسمی دولتی، اسناد بین‌المللی، مقالات علمی و داده‌های آماری بانک جهانی، OECD و Unicef انجام شده است. تحلیل داده‌ها با استفاده از روش تحلیل مضمون انجام گرفت. هدف تحلیل مضمون شناسایی، سازماندهی و تفسیر الگوهای معنادار درون داده‌ها است (Braun & Clarke, 2006). این روش انعطاف‌پذیری بالایی داشته و امکان استخراج نظام‌مند دسته‌بندی‌های مفهومی را فراهم می‌آورد (Nowell et al., 2017). فرایند تحلیل در سه گام انجام شد. در گام نخست، اسناد و سیاست‌های هر کشور به صورت مستقل بررسی شد. در گام دوم، مقایسه افقی میان کشورها برای شناسایی شباهت‌ها و تفاوت‌ها انجام گرفت. در گام سوم، با استفاده از رهیافت استقرایی برای استخراج الگوهای مشترک و تجارب سازمان‌دهی شدند (Rihoux & Ragin, 2009).

به منظور افزایش قابلیت اعتمادپذیری و اعتبارپذیری یافته‌های فاز کیفی، از مجموعه‌ای از راهبردهای پیشنهادی در پژوهش‌های کیفی استفاده شد. نخست، مثلث‌سازی داده‌ها (Data Triangulation) از طریق بهره‌گیری همزمان از گزارش‌های سیاستی، اسناد رسمی، مطالعات علمی معتبر و گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی انجام گرفت تا از اتکای تحلیل به یک منبع اطلاعاتی خاص جلوگیری شود. سپس، راهبردهای استخراج‌شده از مطالعه تطبیقی با استفاده از کدگذاری باز، مقایسه مستمر مفاهیم و ادغام کدهای مشابه در قالب مقوله‌های مفهومی سازمان‌دهی شدند تا انسجام و تمایز میان مقولات حفظ شود. به منظور کنترل کیفیت تحلیل، فرایند کدگذاری در چند مرحله بازبینی شد و انطباق هر راهبرد با شواهد مستند کشورهای مورد مطالعه مجدداً ارزیابی گردید. همچنین، برای افزایش قابلیت اتکاپذیری (Dependability) و تأییدپذیری (Confirmability) یافته‌ها، تمامی مراحل گردآوری، کدگذاری، ادغام و طبقه‌بندی داده‌ها به صورت نظام‌مند مستندسازی شد تا امکان ردیابی تصمیم‌های تحلیلی فراهم باشد. در نهایت، کفایت مفهومی زمانی حاصل شد که بررسی اسناد و تجارب کشورهای منتخب منجر به ظهور مقوله یا راهبرد جدیدی نشد و الگوهای استخراج‌شده از ثبات و تکرارپذیری کافی برخوردار بودند. خروجی فاز کیفی شامل شناسایی و استخراج راهبردهای هوشمندسازی کشاورزی مبتنی بر تجارب کشورهای منتخب است. این راهبردها در فاز کمی پژوهش به عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری وارد فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) شدند.

پس از استخراج راهبردهای هوشمندسازی از مطالعه تطبیقی، فاز دوم پژوهش با هدف اولویت‌بندی راهبردها اجرا شده است. برای این منظور از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از متداول‌ترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که امکان وزن‌دهی و اولویت‌بندی گزینه‌ها را بر اساس معیارهای متعدد فراهم می‌سازد (Saaty, 1980). این روش به ویژه در شرایطی که تصمیم‌گیری مبتنی بر قضاوت خبرگان و مقایسه‌های زوجی انجام می‌شود، کارایی بالایی دارد. انتخاب AHP به عنوان ابزار اصلی تحلیل، بر اساس سه ویژگی کلیدی این روش انجام شده است. نخست، ساختاریافتگی و توانایی تجزیه یک مساله پیچیده به سلسله‌مراتبی از معیارها و زیرمعیارها؛ دوم، سنجش ناسازگاری و قابلیت منحصربه‌فرد این

روش در محاسبه نرخ ناسازگاری که به پژوهشگر اجازه می‌دهد از اعتبار و ثبات قضاوت‌های خبرگان اطمینان حاصل کند؛ سوم، تلفیق دانش کیفی و کمی و امکان تبدیل تجربیات زیسته و شهود کارشناسی متخصصان به وزن‌های دقیق عددی. در پژوهش‌هایی که از تکنیک AHP استفاده می‌کنند، پنل خبرگان (آزمودنی) در AHP، انتخاب خبرگان بر تخصص و مرتبط بودن دانش آنان با مسئله تصمیم‌گیری استوار است و هدف اصلی، تعمیم آماری نتایج به یک جامعه آماری نیست. از این رو، جامعه مورد مطالعه شامل نخبگان و خبرگانی است که در تلاقی سه حوزه فناوری اطلاعات، علوم کشاورزی و مدیریت کسب‌وکار، صاحب‌نظر هستند. برای انتخاب اعضای پنل خبرگان، از روش نمونه‌گیری غیراحتمالی هدفمند با رویکرد قضاوت کارشناسانه استفاده شد. جهت غنای بیشتر پنل و شناسایی افراد کلیدی در زیست‌بوم نوآوری کشاورزی، این روش با رویکرد گلوله‌برفی ترکیب گردید؛ به‌طوری‌که از هر خبره درخواست شد تا متخصصان برجسته دیگری را که در پیاده‌سازی پروژه‌های هوشمندسازی کشاورزی نقش داشته‌اند، معرفی نماید. معیارهای ورود به پنل خبرگان عبارت بودند از: دارا بودن حداقل مدرک کارشناسی ارشد در رشته‌های مرتبط، داشتن حداقل ۱۰ سال سابقه فعالیت مدیریتی، پژوهشی یا کارآفرینی در بخش کشاورزی نوین و داشتن تألیفات علمی یا تجربه اجرای پروژه‌های عملیاتی در زمینه کشاورزی هوشمند. فرآیند اشباع نظری در انتخاب خبرگان پس از نظرخواهی از ۱۵ متخصص حاصل شد. مشخصات تفصیلی این پنل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات تفصیلی پنل خبرگان

حوزه تخصصی و حرفه‌ای	مقطع تحصیلی	تعداد	میانگین سابقه (سال)	نقش در زیست‌بوم
مدیریت و اقتصاد کشاورزی	دکتری تخصصی	۵	۱۸	سیاست‌گذار و برنامه‌ریز کلان
مهندسی IT و سیستم‌های هوشمند	دکتری تخصصی / کارشناسی ارشد	۴	۱۲	توسعه‌دهنده زیرساخت‌های فنی
ترویج و آموزش کشاورزی	دکتری تخصصی	۳	۲۲	حلقه واسط دانشگاه و مزرعه
کارآفرینان بخش کشاورزی	کارشناسی ارشد	۳	۱۰	مجری پلتفرم‌های نوآورانه

پس از تشکیل پنل خبرگان، مقایسه‌های زوجی معیارها و راهبردهای استخراج‌شده با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شد. داده‌ها از طریق پرسشنامه‌های مقایسه زوجی گردآوری شدند که در آن خبرگان، اهمیت نسبی هر راهبرد را نسبت به راهبردهای دیگر بر اساس مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی (مقیاس بنیادی ۱ تا ۹ ساعتی) ارزیابی کردند. روایی صوری پرسشنامه با استفاده از نظر خبرگان تأیید شده و سازگاری منطقی قضاوت‌های زوجی با استفاده از نرخ ناسازگاری ارزیابی شد. نتایج نشان‌داد مقادیر نرخ ناسازگاری در تمام سطوح تحلیل در محدوده قابل قبول پیشنهادی ساعتی ($CR < 0.10$) قرار داشتند. تحلیل داده‌های حاصل از پرسشنامه میانگین هندسی نظرات خبرگان، طی یک فرآیند سیستماتیک ریاضی در چهار گام اصلی به شرح زیر انجام شد.

گام ۱) تشکیل ماتریس مقایسات زوجی A. برای هر سطح از سلسله‌مراتب، یک ماتریس مربعی تشکیل شد که در آن درایه a_{ij} بیانگر برتری معیار i بر معیار j است.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

که در آن $a_{ii}=1$ و $a_{ji}=1/a_{ij}$ (خاصیت معکوس)

گام ۲) نرمال‌سازی و محاسبه بردار اولویت. برای استخراج وزن‌های نسبی، ابتدا هر درایه بر مجموع ستون خود تقسیم شده و سپس میانگین سطرها محاسبه شد (رابطه-۱).

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در اینجا w_i نشان‌دهنده وزن نسبی معیار i است.

گام ۳) محاسبه شاخص و نرخ ناسازگاری. جهت کنترل کیفیت قضاوت‌ها، ابتدا بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس λ_{max} محاسبه شد. سپس شاخص ناسازگاری (CI) از رابطه زیر به دست آمد.

(رابطه ۲)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

در نهایت، نرخ ناسازگاری (CR) از تقسیم شاخص ناسازگاری بر شاخص تصادفی (RI) متناسب با ابعاد ماتریس محاسبه شد.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{رابطه ۳})$$

طبق استاندارد ساعتی، چنانچه $CR \leq 0/1$ باشد، ماتریس دارای سازگاری قابل قبول است.

در طراحی آمیخته اکتشافی این پژوهش، یافته‌های فاز کیفی (مطالعه تطبیقی) به‌طور مستقیم مبنای طراحی ابزار و تعیین گزینه‌های تصمیم‌گیری در فاز کمی (تحلیل سلسله‌مراتبی) قرار گرفت. به عبارت دیگر، راهبردهای هوشمندسازی که از بررسی تجارب ۱۱ کشور منتخب استخراج شدند، به‌عنوان گزینه‌های اولویت‌بندی در پرسشنامه‌های تحلیل سلسله‌مراتبی به خبرگان ارائه شد. این تلفیق دو مرحله‌ای امکان آن را فراهم ساخته است که راهبردهای مورد نظر ریشه در تجارب عملی کشورهای موفق داشته باشند و همچنین متناسب با شرایط بومی ایران و بر اساس نظر خبرگان داخلی اولویت‌بندی شوند.

یافته‌ها و بحث

با توجه به طرح آمیخته اکتشافی این پژوهش، یافته‌ها در دو گام مجزا اما به‌هم پیوسته ارائه می‌شوند. فاز اول که با رویکرد کیفی و به روش مطالعه تطبیقی اجرا شد، سیاست‌ها و راهبردهای هوشمندسازی کشاورزی در کشورهای منتخب، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. در این فاز، ضمن معرفی تجارب هر کشور، نمونه پروژه‌های موفق و راهبردهای بکار گرفته شده در زمینه توسعه کارآفرینی کشاورزی با رویکرد هوشمندسازی استخراج و دسته‌بندی شده است. کشورهای مورد مطالعه در این پژوهش به‌صورت هدفمند و بر اساس چهار معیار انتخاب شدند. ۱) برخورداری از تجربه مستند و قابل استناد در طراحی و اجرای سیاست‌ها یا برنامه‌های ملی هوشمندسازی کشاورزی، ۲) دستیابی به دستاوردهای مستند و قابل ارزیابی در یک یا چند بعد کلیدی کشاورزی هوشمند شامل تحول دیجیتال، بهره‌وری، پایداری، کارآفرینی و حکمرانی داده، و ۳) در نظر گرفتن تنوع جغرافیایی، اقلیمی و ساختارهای اقتصادی - کشاورزی، به‌منظور افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری یافته‌ها و کاهش سوگیری ناشی از تمرکز بر یک منطقه جغرافیایی خاص (۴) دسترسی به اسناد سیاستی، گزارش‌های بین‌المللی و مطالعات علمی معتبر که امکان استخراج و مقایسه نظام‌مند راهبردها را فراهم می‌سازد. بر این اساس، کشورهایی مانند ژاپن، هلند، آلمان، ایالات متحده آمریکا، کره جنوبی، چین، استرالیا، دانمارک، اسپانیا، فرانسه و برزیل انتخاب شدند، زیرا هر یک نماینده تجربه‌ای موفق در یکی از ابعاد راهبردی هوشمندسازی کشاورزی، از جمله اتوماسیون، کشاورزی دقیق، حکمرانی داده، پایداری، مدیریت منابع آب، توسعه مهارت‌های دیجیتال، کارآفرینی فناورانه، تجارت الکترونیک روستایی یا حمایت از کشاورزان خرد هستند. این تنوع، امکان شناسایی الگوهای مشترک و درعین‌حال راهبردهای اختصاصی را فراهم کرد و مبنای استخراج مجموعه‌ای از راهبردهای قابل انطباق با شرایط کشاورزی ایران قرار گرفت.

در فاز دوم که با رویکرد کمی و به روش تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شد، راهبردهای استخراج‌شده از گام کیفی در اختیار خبرگان حوزه کشاورزی هوشمند و کارآفرینی در ایران قرار گرفت و با استفاده از مقایسه‌های زوجی، اولویت‌بندی شدند. بدین ترتیب، یافته‌های این پژوهش ابتدا به توصیف تجارب بین‌المللی می‌پردازد و سپس با ارائه اولویت‌بندی کمی راهبردها، تصویری جامع از وضعیت هوشمندسازی و مسیر پیش روی کارآفرینی کشاورزی در ایران ترسیم می‌کند. در ادامه، یافته‌های هر یک از این دو فاز به ترتیب ارائه می‌شود.

فاز نخست. رویکرد کیفی (مطالعه تطبیقی)

۱. کشور ژاپن: تمرکز بر اتوماسیون و جبران کمبود نیروی کار

در ژاپن، کاهش جمعیت روستایی و نیروی کار مسن، مهم‌ترین محرک‌های گذار به کشاورزی هوشمند بوده است (MAFF, 2023). دولت این کشور پنج دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. توسعه کشاورزی دقیق مبتنی بر اینترنت اشیا و سنسورهای هوشمند، بکارگیری رباتیک و اتوماسیون در فرآیند کاشت، داشت و برداشت، استفاده از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی و

مدیریت آفات و بیماری‌ها، ایجاد پلتفرم‌های دیجیتال برای بازررسانی مستقیم محصولات و حمایت از استارت‌آپ‌های فناوری کشاورزی. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نظیر Smart Agri Project در هوکایدو و Robot Farmer در فوکوئوکا نشان می‌دهد این راهبردها منجر به کاهش ۲۰ درصدی مصرف آب، افزایش ۱۵ درصدی محصولات و کاهش ۲۵ درصدی مصرف انرژی شده‌اند (NARO, 2021). بر این اساس، الگوی غالب شناسایی شده در ژاپن، اولویت‌دهی به جبران کمبود نیروی کار از طریق رباتیک و اتوماسیون است.

۲. کشور هلند: تمرکز بر پایداری و بهره‌وری انرژی در گلخانه‌ها

در هلند، محدودیت زمین‌های قابل کشت و نیاز به کاهش مصرف انرژی، اصلی‌ترین محرک‌های توسعه کشاورزی هوشمند محسوب می‌شوند. این کشور شش دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. نخست، استفاده از فناوری‌های دیجیتال و اینترنت اشیا برای مدیریت دقیق مزارع؛ دوم، توسعه کشاورزی عمودی و گلخانه‌های هوشمند با سیستم‌های کنترل خودکار؛ سوم، بکارگیری سیستم‌های مدیریت داده و دوقلوی دیجیتال (Data Management Systems and Digital Twin) برای شبیه‌سازی شرایط رشد؛ چهارم، تشویق کارآفرینی نوآورانه از طریق اکوسیستم استارت‌آپی در Food Valley؛ پنجم، آموزش و ترویج فناوری‌های نوین توسط دانشگاه واخنینگن؛ و ششم، همکاری بین‌المللی برای انتقال فناوری. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نظیر Farm of the Future و Greenhouse as Energy Source نشان می‌دهد این راهبردها منجر به کاهش ۴۰ درصدی مصرف انرژی و افزایش ۲۰ درصدی بازدهی محصولات شده‌اند (European Commission, 2020). در مجموع، الگوی غالب شناسایی شده در هلند، اولویت‌دهی به پایداری محیط‌زیستی و بهره‌وری انرژی بر سایر راهبردهاست.

۳. کشور آلمان: تمرکز بر استانداردسازی و اشتراک داده

در آلمان، نیاز به یکپارچه‌سازی داده‌ها و ایجاد استانداردهای ملی، مهم‌ترین محرک گذار به کشاورزی هوشمند بوده است (BMEL, 2023). دولت این کشور چهار دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. نخست، دیجیتالی‌سازی مزارع و کشاورزی دقیق با استفاده از حسگرهای خاک و تصویربرداری ماهواره‌ای؛ دوم، استفاده از رباتیک و خودکارسازی در عملیات برداشت و سم‌پاشی؛ سوم، ایجاد پلتفرم‌های داده‌محور مانند Agri-Gaia برای اشتراک امن داده بین کشاورزان؛ و چهارم، توسعه زیست‌بوم کارآفرینی کشاورزی از طریق برنامه‌های حمایتی EXIST و Start-Up Labs. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نظیر Smart Farming-KI و Digital Test Fields نشان می‌دهد این راهبردها منجر به کاهش ۳۰ درصدی مصرف سموم، کاهش ۲۰ درصدی تلفات دام و تدوین استانداردهای ملی برای کشاورزی دیجیتال شده‌اند (BMEL, 2021; Fraunhofer Institute, 2021). در مجموع، الگوی غالب شناسایی شده در آلمان، اولویت‌دهی به استانداردسازی داده‌ها و ایجاد زیرساخت اشتراک اطلاعات بر سایر راهبردهاست.

۴. کشور ایالات متحده آمریکا: تمرکز بر داده‌های بزرگ و کارآفرینی دیجیتال

در آمریکا، گسترده‌گی مزارع و نیاز به کاهش هزینه‌های تولید، مهم‌ترین محرک‌های توسعه کشاورزی هوشمند بوده است (USDA, 2023). دولت فدرال پنج دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. توسعه زیرساخت‌های دیجیتال و اتصال اینترنت پرسرعت در مناطق روستایی از طریق برنامه ReConnect؛ استفاده از کشاورزی دقیق و داده‌محور با فناوری‌هایی نظیر FarmBeats؛ تشویق کارآفرینی دیجیتال در کشاورزی از طریق برنامه SBIR؛ آموزش و ترویج فناوری‌های نوین با پلتفرم eXtension؛ و توسعه زنجیره ارزش با فناوری بلاک‌چین در پروژه IBM Food Trust. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نشان می‌دهد این راهبردها منجر به افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی عملکرد محصولات، کاهش زمان ردیابی محصولات از چند روز به چند ثانیه و بهبود ۱۲ درصدی بهره‌وری سوخت شده‌اند (USDA, 2023; IBM, 2021; AGCO, 2024). در مجموع، الگوی غالب

طراحی نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی ایران با تأکید بر کارآفرینی پایدار: ترکیب تجارب جهانی و ...

شناسایی شده در ایالات متحده آمریکا، اولویت‌دهی به سرمایه‌گذاری در زیرساخت شبکه ارتباطات روستایی و حمایت از استارت‌آپ‌های داده‌محور بر سایر راهبردهاست.

۵. کشور کره جنوبی: تمرکز بر مزارع هوشمند گلخانه‌ای و آموزش کشاورزان

در کره جنوبی، پیری جمعیت کشاورزان و کاهش نیروی کار روستایی، مهم‌ترین محرک‌های گذار به کشاورزی هوشمند بوده است. دولت این کشور پنج دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. توسعه مزارع هوشمند با سیستم‌های کنترل خودکار دما، رطوبت، نور و آبیاری؛ استفاده از پهپادها و رباتیک در عملیات سم‌پاشی و برداشت؛ ایجاد پلتفرم‌های دیجیتال برای بازاریابی مستقیم و کاهش واسطه‌ها؛ آموزش و توانمندسازی کشاورزان در فناوری‌های دیجیتال از طریق کارگاه‌های عملی؛ و سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه برای تولید بذره‌های مقاوم و کشت عمودی. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نظیر مزرعه هوشمند Jeollabuk-do و پروژه پهپادهای سم‌پاش در Gyeongsangnam-do نشان می‌دهد این راهبردها منجر به کاهش ۵۰ درصدی زمان عملیات سم‌پاشی، افزایش ۲۵ درصدی درآمد کشاورزان و کاهش چشمگیر مصرف آب شده‌اند (MAFRA, 2021; KATPA, 2022). الگوی حاکم بر کره جنوبی، تقدم خودکارسازی گلخانه‌ها و توانمندسازی نیروی انسانی بر سایر راهبردهاست. در مجموع، الگوی غالب شناسایی شده در کره جنوبی، اولویت‌دهی به خودکارسازی گلخانه‌ها و توانمندسازی نیروی انسانی است.

۶. کشور چین: تمرکز بر دهکده‌های دیجیتال و تجارت الکترونیک روستایی

در چین، گستردگی جمعیت روستایی و نیاز به امنیت غذایی، مهم‌ترین محرک‌های توسعه کشاورزی هوشمند بوده است (MARA, 2023). دولت این کشور چهار دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. توسعه زیرساخت‌های دیجیتال در مناطق روستایی از طریق طرح دهکده‌های دیجیتال؛ استفاده از هوش مصنوعی و رباتیک در مزارع هوشمند مانند پروژه Jingdong؛ پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین مبتنی بر بلاک‌چین برای ردیابی محصولات؛ و ترویج کارآفرینی کشاورزی از طریق اکوسیستم‌های استارت‌آپی و مراکز شتاب‌دهی. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نظیر مزرعه هوشمند Jingdong و دهکده دیجیتال Yiwu نشان می‌دهد این راهبردها منجر به کاهش ۲۵ درصدی مصرف آب، افزایش ۱۵ درصدی بازدهی گندم و افزایش ۴۰ درصدی درآمد روستاییان شده‌اند (Alibaba Group, 2022). در مجموع، الگوی غالب شناسایی شده در چین، اولویت‌دهی به شبکه ارتباطات روستایی و ادغام کشاورزی با پلتفرم‌های بزرگ تجارت الکترونیک بر سایر راهبردهاست.

۷. کشور استرالیا: تمرکز بر مدیریت آب و مقابله با خشکسالی

در استرالیا، کمبود آب و تغییرات اقلیمی، مهم‌ترین محرک‌های گذار به کشاورزی هوشمند بوده است. دولت این کشور پنج دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. نخست، توسعه زیرساخت‌های دیجیتال و اینترنت پرسرعت در مناطق روستایی از طریق برنامه NBN؛ دوم، استفاده از اینترنت اشیا و حسگرهای هوشمند برای بهینه‌سازی آبیاری؛ سوم، بکارگیری هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد محصولات و بیماری‌ها؛ چهارم، استفاده از پهپادها و رباتیک در کشاورزی دقیق مانند پروژه SwagBot؛ و پنجم، تشویق کارآفرینی دیجیتال از طریق برنامه AgriFutures. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نظیر Smarter Irrigation for Profit و Digital Farm نشان می‌دهد این راهبردها منجر به کاهش ۳۰ درصد مصرف آب و هزینه‌های عملیاتی شده‌اند (CSIRO, 2022). در مجموع، الگوی غالب شناسایی شده در استرالیا، اولویت‌دهی به مدیریت هوشمند آب و پیش‌بینی ریسک‌های اقلیمی بر سایر راهبردهاست.

۸. کشور دانمارک: تمرکز بر پایداری محیط‌زیستی و کاهش مصرف نهاده‌ها

در دانمارک، نیاز به کاهش مصرف سموم و کودهای شیمیایی، مهم‌ترین محرک توسعه کشاورزی هوشمند بوده است. دولت این کشور پنج دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. توسعه کشاورزی دقیق با استفاده از سنسورها و ماشین‌آلات خودران؛

استفاده از داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی برای تحلیل شرایط خاک و آب‌وهوا؛ تشویق اکوسیستم استارت‌آپ‌های کشاورزی از طریق صندوق نوآوری GUDP؛ آموزش و ترویج فناوری‌های دیجیتال توسط سازمان SEGES Innovation؛ و توسعه زنجیره ارزش پایدار با فناوری بلاک‌چین. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نظیر ربات خودران FarmDroid و سیستم CowManager نشان می‌دهد این راهبردها منجر به کاهش ۵۰ درصدی مصرف علف‌کش، افزایش ۲۰ درصدی تولید شیر و کاهش هزینه‌های دامپزشکی شده‌اند (Danish Agriculture & Food Council, 2023). در مجموع، الگوی غالب شناسایی شده در دانمارک، اولویت‌دهی به پایداری محیط‌زیستی و کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی بر سایر راهبردهاست.

۹. کشور اسپانیا: تمرکز بر کشاورزی دقیق در شرایط کم‌آبی و انرژی سبز

در اسپانیا، کمبود آب و هزینه بالای انرژی، مهم‌ترین محرک‌های گذار به کشاورزی هوشمند بوده است (MAPAMA, 2021). دولت این کشور پنج دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. توسعه کشاورزی دقیق با استفاده از سنسورها، پهپادها و سیستم‌های مدیریت هوشمند؛ ایجاد مراکز نوآوری و شتاب‌دهنده‌های کشاورزی مانند Agrotech Murcia در سال ۲۰۲۲؛ توسعه زنجیره ارزش با فناوری بلاک‌چین برای ردیابی محصولات؛ آموزش و توانمندسازی کشاورزان از طریق مدرسه کشاورزی دیجیتال؛ و حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر در مزارع با نصب پنل‌های خورشیدی. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نظیر Smart Vineyards در ریوخا و GreenHouses در آلمریا نشان می‌دهد این راهبردها منجر به کاهش ۳۰ درصدی مصرف آب، کاهش ۴۰ درصدی هزینه‌های انرژی و رشد ۲۰ درصدی صادرات گلخانه‌ای شده‌اند (Reca, 2025). در مجموع، الگوی غالب شناسایی شده در اسپانیا، اولویت‌دهی به بهینه‌سازی مصرف آب و انرژی‌های تجدیدپذیر بر سایر راهبردهاست.

۱۰. کشور فرانسه: تمرکز بر پشتیبانی مالی گسترده و اکوسیستم استارت‌آپی

در فرانسه، نیاز به افزایش رقابت‌پذیری کشاورزی در بازارهای اروپایی، مهم‌ترین محرک توسعه کشاورزی هوشمند بوده است (Gouvernement français, 2021). دولت این کشور پنج دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. نخست، توسعه زیرساخت‌های دیجیتال در مناطق روستایی از طریق برنامه France Très Haut Débit؛ دوم، حمایت مالی و یارانه‌های دولتی با بودجه ۵ میلیارد یورویی طرح Relance؛ سوم، آموزش و توانمندسازی کشاورزان از طریق شبکه Digital Farming Academy؛ چهارم، تشکیل اکوسیستم استارت‌آپی با برنامه La Ferme Digitale؛ و پنجم، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه برای تولید ربات‌های کشاورزی و سیستم‌های آبیاری هوشمند. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نظیر ربات VITIROBOT و پلتفرم Weenat نشان می‌دهد این راهبردها منجر به کاهش ۳۰ درصدی زمان عملیات هرس و پیش‌بینی دقیق سرمازدگی شده‌اند (INRAE, 2022; Naïo Technologies, 2021). در مجموع، الگوی غالب شناسایی شده در فرانسه، اولویت‌دهی به حمایت مالی دولتی و ایجاد شبکه آموزشی گسترده بر سایر راهبردهاست.

۱۱. کشور برزیل: تمرکز بر کشاورزان خرد و دسترسی عادلانه به فناوری

در برزیل، نابرابری دسترسی به فناوری بین کشاورزان بزرگ و خرد، مهم‌ترین محرک گذار به کشاورزی هوشمند بوده است (EMBRAPA, 2020). دولت این کشور پنج دسته راهبرد اصلی را دنبال می‌کند. توسعه زیرساخت‌های دیجیتال و شبکه ارتباطات روستایی از طریق برنامه Connected Farm؛ ترویج فناوری‌های دقیق کشاورزی برای کشاورزان خرد با پروژه AgroTech Startups؛ تشویق کارآفرینی دیجیتال در کشاورزی از طریق برنامه Precision Agriculture for Smallholders؛ آموزش و توانمندسازی کشاورزان با دوره‌های آموزشی SENAR؛ و ارائه سیاست‌های حمایتی و وام‌های کم‌بهره از طریق برنامه InovAgro. ارزیابی پروژه‌های اجرا شده نظیر Sustenta Agro و Digital Cerrado نشان می‌دهد این راهبردها منجر به افزایش ۳۰ درصدی بهره‌وری در برخی مناطق و آموزش بیش از ۵۰ هزار کشاورز شده است (BNDES, 2021; EMBRAPA, 2022; SENAR, 2023). در مجموع، الگوی غالب شناسایی شده در برزیل، اولویت‌دهی به توانمندسازی کشاورزان خرد و کاهش شکاف دیجیتال بر سایر راهبردهاست.

طراحی نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی ایران با تأکید بر کارآفرینی پایدار: ترکیب تجارب جهانی و ...

به منظور شناسایی و دسته‌بندی راهبردهای هوشمندسازی کشاورزی در سطح بین‌المللی، یافته‌های حاصل از مطالعه تطبیقی کشورهای منتخب در قالب جدول ۳ خلاصه شده است. این جدول بر اساس معیارهایی همچون محرک‌های گذار به کشاورزی هوشمند، راهبردهای بکارگرفته‌شده، مهم‌ترین دستاوردها و در نهایت الگوی حاکم بر هر کشور، تنظیم شده است. هدف از ارائه این جدول، ایجاد تصویری شفاف و قابل مقایسه از تجارب بین‌المللی از شباهت‌ها و تفاوت‌های راهبردی هر کشور است.

جدول ۳- خلاصه تطبیقی راهبردهای کشاورزی هوشمند در ۱۱ کشور منتخب

کشور	محرک اصلی	مهم‌ترین راهبردها	دستاوردهای عینی	الگوی حاکم
چین	کاهش جمعیت روستایی و کمبود نیروی کار	۱. کشاورزی دقیق با IoT و سنسورها ۲. رباتیک و اتوماسیون ۳. هوش مصنوعی برای پیش‌بینی آفات ۴. پلتفرم‌های فروش مستقیم ۵. حمایت از استارت‌آپ‌ها	کاهش ۲۰ درصد مصرف آب افزایش ۱۵ درصد محصولات کاهش ۲۵ درصد مصرف انرژی	جبران کمبود نیروی کار از طریق رباتیک
ایالات متحده	محدودیت زمین و نیاز به کاهش مصرف انرژی	۱. فناوری دیجیتال و IoT ۲. کشاورزی عمودی و گلخانه هوشمند ۳. سیستم‌های مدیریت داده و دوقلوی دیجیتال ۴. اکوسیستم استارت‌آپی Food Valley ۵. آموزش توسط WUR ۶. همکاری بین‌المللی	کاهش ۴۰ درصد مصرف انرژی افزایش ۲۰ درصد بازدهی	پایداری محیط‌زیستی و بهره‌وری انرژی
ایران	نیاز به یکپارچه‌سازی داده و استاندارد ملی	۱. دیجیتالی‌سازی مزارع با حسگر و ماهواره ۲. رباتیک در برداشت و سم‌پاشی ۳. پلتفرم Agri-Gaia برای اشتراک داده ۴. زیست‌بوم کارآفرینی Start-Up Labs و EXIST	کاهش ۳۰ درصد سموم کاهش ۲۰ درصد تلفات دام تدوین استاندارد ملی	استانداردسازی داده و زیرساخت اشتراک اطلاعات
آمریکا	گسترده‌ی مزارع و نیاز به کاهش هزینه تولید	۱. زیرساخت اینترنت روستایی ReConnect ۲. کشاورزی دقیق FarmBeats ۳. کارآفرینی دیجیتال SBIR ۴. آموزش پلتفرم eXtension ۵. بلاک‌چین IBM Food Trust	افزایش ۱۵-۱۰ درصد عملکرد کاهش ردیابی از روز به ثانیه بهبود ۱۲ درصد بهره‌وری سوخت	سرمايه‌گذاری در شبکه ارتباطات روستایی و استارت‌آپ‌های داده‌محور
کره جنوبی	پیری کشاورزان و کاهش نیروی کار روستایی	۱. مزارع هوشمند با کنترل خودکار ۲. پهپاد و رباتیک در سم‌پاشی و برداشت ۳. پلتفرم فروش مستقیم ۴. آموزش و توانمندسازی کشاورزان ۵. سرمايه‌گذاری در تحقیق و توسعه	کاهش ۵۰ درصد زمان سم‌پاشی افزایش ۲۵ درصد درآمد کشاورزان کاهش چشمگیر مصرف آب	خودکارسازی گلخانه‌ها و توانمندسازی نیروی انسانی
ژاپن	گسترده‌ی جمعیت روستایی و نیاز به امنیت غذایی	۱. دهکده‌های دیجیتال (زیرساخت روستایی) ۲. هوش مصنوعی و رباتیک در مزارع هوشمند ۳. بلاک‌چین برای ردیابی محصولات ۴. اکوسیستم استارت‌آپی و مراکز شتاب‌دهی	کاهش ۲۵ درصد مصرف آب افزایش ۱۵ درصد بازدهی گندم و ۴۰ درصد درآمد روستاییان	شبکه ارتباطات روستایی و ادغام با تجارت الکترونیک
استرالیا	کمبود آب و تغییرات اقلیمی	۱. زیرساخت اینترنت NBN ۲. IoT و حسگرها برای بهینه‌سازی آبیاری ۳. هوش مصنوعی برای پیش‌بینی عملکرد ۴. پهپاد و رباتیک SwagBot ۵. کارآفرینی دیجیتال AgriFutures	کاهش ۳۰ درصد مصرف آب کاهش هزینه‌های عملیاتی	مدیریت هوشمند آب و پیش‌بینی ریسک اقلیمی
دانمارک	نیاز به کاهش مصرف سموم و کود شیمیایی	۱. کشاورزی دقیق با سنسور و ماشین خودران ۲. داده بزرگ و هوش مصنوعی برای تحلیل خاک ۳. صندوق نوآوری GUDP ۴. آموزش توسط SEGES Innovation ۵. بلاک‌چین برای زنجیره ارزش پایدار	کاهش ۵۰ درصد مصرف علف‌کش افزایش ۲۰ درصد تولید شیر کاهش هزینه دامپزشکی	پایداری محیط‌زیستی و کاهش نهاده‌های شیمیایی

ادامه جدول ۳

کشور	محرك اصلی	مهم ترین راهبردها	دستاوردهای عینی	الگوی حاکم
اسپانیا	کمیود آب و هزینه بالای انرژی	۱. کشاورزی دقیق با سنسور و پهپاد	کاهش ۳۰ درصد مصرف آب	بهینه سازی مصرف آب و انرژی های تجدیدپذیر
		۲. مراکز نوآوری Agrotech Murcia	کاهش ۴۰ درصد هزینه انرژی	انرژی های تجدیدپذیر
		۳. بلاک چین برای ردیابی محصولات	رشد ۲۰ درصد صادرات گلخانه ای	
		۴. مدرسه کشاورزی دیجیتال		
		۵. انرژی خورشیدی در مزارع		
فرانسه	نیاز به افزایش رقابت در بازار اروپا	۱. زیرساخت دیجیتال France Très Haut Débit	کاهش ۳۰ درصد زمان هرس	حمایت مالی دولتی و شبکه آموزشی گسترده
		۲. یارانه دولتی طرح Relance	پیش بینی دقیق سرمازدگی	
		۳. شبکه Digital Farming Academy		
		۴. اکوسیستم استارت آپی La Ferme Digitale		
		۵. تحقیق و توسعه در رباتیک و آبیاری		
برزیل	نابرابری در دسترسی به فناوری	۱. زیرساخت Connected Farm	افزایش ۳۰ درصد بهره وری	توانمندسازی کشاورزان
		۲. کشاورزی دقیق برای کشاورزان خرد (EMBRAPA)	آموزش بیش از ۵۰ هزار کشاورز	خرد و کاهش شکاف دیجیتال
		۳. استارت آپ AgroTech Startups Brasil		
		۴. آموزش با طرح SENAR		
		۵. وام کم بهره InovAgro		

پس از گردآوری و تحلیل داده های مرتبط با راهبردهای هوشمندسازی کشاورزی در کشورهای منتخب با استفاده از روش تحلیل اسناد و تحلیل مضمون، در این مرحله یافته های حاصل به صورت تطبیقی تحلیل شدند. در این پژوهش، تحلیل تطبیقی در دو سطح انجام شده است. سطح نخست، مقایسه افقی میان کشورها بر اساس مؤلفه هایی نظیر محرک های اصلی گذار به کشاورزی هوشمند، تعداد و اولویت راهبردهای بکارگرفته شده، دستاوردهای عینی و الگوی حاکم بر هر کشور؛ سطح دوم، دسته بندی نهایی راهبردها بر اساس مضامین استخراج شده از تحلیل مضمون که به عنوان ورودی فاز کمی پژوهش (تحلیل سلسله مراتبی) مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل های به عمل آمده نشان می دهد که در مجموع، مضامین استخراج شده از مطالعه تطبیقی بین المللی راهبردهای هوشمندسازی در توسعه کارآفرینی کشاورزی در کشورهای منتخب، منجر به شناسایی ۱۲ راهبرد اصلی شد. این راهبردها، بر اساس مدل طراحی شده به چهار دسته اصلی دسته بندی شدند. نتایج این بخش از پژوهش در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- ابعاد اصلی، راهبردهای کلیدی و راهکارهای مرتبط با هوشمندسازی در توسعه کارآفرینی کشاورزی بر اساس مطالعه تطبیقی کشورها

ابعاد اصلی	راهبردهای کلیدی	راهکارها و برنامه های مرتبط
توسعه منابع انسانی	آموزش، ترویج و توانمندسازی کشاورزان	- ایجاد پلتفرم های یادگیری دیجیتال برای آموزش مهارت های هوشمندسازی کشاورزی - ایجاد برنامه های مربی گری و منتورینگ برای کشاورزان نوآور - توسعه محتوای آموزشی تعاملی با استفاده از واقعیت افزوده و شبیه سازی مزرعه
		همکاری های بین المللی برای انتقال دانش و فناوری
		ایجاد شبکه های همکاری بین دانشگاه، صنعت و کشاورزان برای اشتراک دانش عملی
		توسعه پلتفرم های دیجیتال برای انتقال تجربه و آموزش میان کشاورزان و کارآفرینان
توسعه زیرساخت ها	کشاورزی دقیق و داده محور	- دیجیتالی سازی مزرعه ها با استفاده از حسگرها و سیستم های مدیریت مزرعه - ترویج مزارع هوشمند و پلتفرم های داده محور جهت تصمیم گیری و برنامه ریزی - توسعه کشاورزی دقیق با استفاده از GPS و سنسورهای هوشمند
		استفاده از هوش مصنوعی و سیستم های مدیریت داده، آفات و بیماری ها
		بکارگیری هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش بینی عملکرد محصولات
		بکارگیری داده های بزرگ و هوش مصنوعی برای پیش بینی و بهینه سازی تولید
توسعه زیرساخت فناوری	رباتیک، پهپاد و اتوماسیون	- توسعه خدمات پهپاد محور برای پاشی، سم پاشی و کوددهی دقیق مزارع - طراحی و بومی سازی ربات های برداشت و کاشت محصولات کشاورزی - پیاده سازی سامانه های اتوماسیون هوشمند در مدیریت گلخانه ها و دامداری ها
		راه اندازی شبکه های اینترنت پایدار و دسترسی روستایی به فناوری های دیجیتال
		توسعه پلتفرم های مدیریت داده های کشاورزی مبتنی بر اتصال شبکه ای
		ایجاد مراکز نوآوری محلی برای آموزش و پشتیبانی فناوری های دیجیتال در روستاها

ادامه جدول ۴

ابعاد اصلی	راهبردهای کلیدی	راهکارها و برنامه‌های مرتبط
زیرساخت شفافیت و مبادله	بلاک چین و شفافیت زنجیره تأمین	• استفاده از بلاک چین برای ردیابی منشأ و کیفیت محصولات کشاورزی • ایجاد سامانه‌های هوشمند مبتنی بر بلاک چین با تمرکز بر شفافیت و اعتماد در قراردادهای کشاورزی
	بازاررسانی و پلتفرم‌های دیجیتال	• توسعه سیستم‌های گواهی دیجیتال برای تضمین کیفیت و اصالت محصولات • راهاندازی بازارگاه‌های آنلاین برای فروش مستقیم محصولات کشاورزی • توسعه اپلیکیشن‌های هوشمند اتصال کشاورزان به مصرف‌کنندگان و خریداران عمده • ایجاد پلتفرم‌های همکاری گروهی کشاورزان برای تقویت قدرت مذاکره و فروش مشترک
زیرساخت تحول آفرین	کارآفرینی و استارت‌آپ‌های فناوری کشاورزی (AgriTech)	• راهاندازی استارت‌آپ‌های نوآور در حوزه فناوری‌های کشاورزی هوشمند • توسعه خدمات مشاوره و شتاب‌دهنده تخصصی AgriTech برای کشاورزان و کارآفرینان • توسعه شبکه‌های تأمین مالی جمعی و سرمایه‌گذاری جسورانه در فناوری کشاورزی
	سیاست‌ها و حمایت‌های مالی	• توسعه برنامه‌های تشویقی و وام‌های خرد برای حمایت از استارت‌آپ‌ها و کشاورزان نوآور • طراحی مکانیزم‌های سرمایه‌گذاری مشترک و صندوق‌های نوآوری کشاورزی هوشمند • توسعه مدل‌های بیمه نوین کشاورزی مبتنی بر داده و فناوری‌های هوشمند
	تحقیق و توسعه (R&D)	• توسعه آزمایشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی تخصصی کشاورزی هوشمند • پیاده‌سازی سیستم‌های نوآوری باز برای هم‌افزایی دانشگاه، صنعت و کشاورزان • کارآفرینی در تولید و تجاری‌سازی دانش و فناوری‌های نوآورانه کشاورزی
	توسعه کشاورزی نوین	• توسعه کشاورزی عمودی، گلخانه‌های هوشمند و انرژی‌های تجدیدپذیر در مزارع • توسعه فناوری‌های آب‌محور و سیستم‌های آبیاری هوشمند برای حوزه‌های کم‌آب • راهاندازی کسب‌وکارهای نوآور در تولید محصولات ارگانیک و بازارهای تخصصی

رویکرد کمی (تحلیل سلسله‌مراتبی داده‌ها)

فرایند استخراج یافته‌های کمی پژوهش بر اساس تحلیل داده‌های حاصل از پرسشنامه‌های مقایسه زوجی، توسط پنل خبرگان انجام شد. جهت دستیابی به یک اجماع واحد در میان نظرات متخصصان، از روش تجمیع قضاوت‌های فردی بر مبنای میانگین هندسی استفاده شد. انتخاب میانگین هندسی به‌جای میانگین حسابی، از آن جهت ضرورت داشت که این روش تنها تابع ریاضی است که ویژگی معکوسی را در ماتریس‌های AHP حفظ کرده و از سوگیری اعداد بزرگ جلوگیری می‌کند. پس از تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی نهایی، محاسبات مربوط به استخراج بردار اولویت و تعیین وزن‌های نسبی و نهایی با استفاده از الگوریتم بردار ویژه در نرم‌افزار Excel انجام پذیرفت. در این بخش، ابتدا نتایج مربوط به لایه استراتژیک (معیارهای اصلی) و سپس جزئیات مربوط به لایه‌های عملیاتی (زیرمعیارها) به همراه تحلیل سازگاری منطقی قضاوت‌ها ارائه می‌گردد.

۱. تحلیل اولویت‌های استراتژیک در سطح کلان (سطح ۱)

در نخستین مرحله از تحلیل، چهار بعد کلان نقشه راه شامل زیرساخت‌های شناختی، فناوریانه، شفافیت و مبادله و تحول‌آفرین به صورت زوجی با یکدیگر مقایسه شدند. هدف از این سطح، تعیین وزن استراتژیک هر یک از این ابعاد در شکل‌دهی به اکوسیستم کشاورزی هوشمند است. ماتریس حاصل از میانگین هندسی قضاوت‌های خبرگان در جدول ۵ ارائه شده است. تحلیل محاسباتی ماتریس فوق نشان‌دهنده دو مؤلفه زیرساخت فناوریانه و زیرساخت شناختی حدوداً دارای وزن (وزن ۰/۲۹) یکسان هستند. مقادیر این دو مؤلفه حاکی از آن است که از دیدگاه خبرگان، هوشمندسازی کشاورزی یک فرآیند فنی-اجتماعی است که در آن، ابزارهای سخت‌افزاری و ظرفیت‌های انسانی آموزشی، به یک اندازه در موفقیت نقشه راه سهم دارند.

جدول ۵- ماتریس مقایسات زوجی و بردار اولویت معیارهای اصلی (سطح ۱)

معیارهای اصلی	شناختی	فناورانه	شفافیت	تحول آفرین	وزن نسبی
شناختی	۱/۰۰	۱/۱۹۰۰	۱/۱۷	۱/۴۲	۰/۲۸۴۴
فناورانه	۰/۸۴۰۳	۱/۰۰	۲/۰۷	۱/۱۳	۰/۲۹۳۶
شفافیت	۰/۸۵۴۷	۰/۴۸۳۱	۱/۰۰	۱/۳۴	۰/۲۱۵۴
تحول آفرین	۰/۷۰۴۲	۰/۸۸۵۰	۰/۷۴۶۳	۱/۰۰	۰/۲۰۲۵

در مرتبه بعدی، زیرساخت شفافیت و مبادله با وزن ۰/۲۱۵۴ قرار گرفته است که نشان‌دهنده اهمیت حیاتی اصلاح نظام بازار و زنجیره ارزش در کنار توسعه فناوری است. در نهایت، زیرساخت تحول آفرین با وزن ۰/۲۰۲۵ در جایگاه چهارم قرار گرفته است. نرخ ناسازگاری این ماتریس برابر با ۰/۳۳۵۹ محاسبه گردید که به طور معناداری کمتر از حد آستانه (۰/۱) بوده و نشان‌دهنده پایداری و ثبات منطقی در قضاوت‌های پنل خبرگان در سطح کلان پژوهش است.

۲. تحلیل خوشه‌ای اولویت‌های محلی زیرمعیارها (سطح ۲)

در این مرحله از پژوهش، ساختار سلسله‌مراتبی به چهار خوشه مجزا تجزیه گردید تا اهمیت نسبی زیرمعیارها نسبت به معیار پدر خود سنجیده شود. وزن‌های استخراج شده در این بخش، اولویت‌های محلی نامیده می‌شوند که نشان‌دهنده وزن هر شاخص در درون گروه خود است. نتایج حاصل از تحلیل بردار ویژه برای هر خوشه به شرح زیر است.

خوشه اول بر مؤلفه‌های سرمایه انسانی و دانش متمرکز است. مطابق با جدول ۶، زیرمعیار آموزش و توانمندسازی با کسب وزن محلی ۰/۶۷، برتری معناداری (دو برابری) نسبت به همکاری و انتقال دانش (۰/۳۳) کسب نموده است. این یافته گویای آن است که از منظر خبرگان، توسعه صلاحیت‌های فردی و ارتقای مهارت‌های دیجیتال کشاورزان، پیش‌نیاز هرگونه تعامل و انتقال دانش در شبکه است.

جدول ۶- مقایسات زوجی و بردار اولویت زیرمعیارهای مجموعه زیرساخت شناختی (آموزش و همکاری)

زیرمعیار	آموزش و توانمندسازی	همکاری و انتقال دانش	وزن محلی
آموزش و توانمندسازی	۱/۰۰	۲/۰۰	۰/۶۷
همکاری و انتقال دانش	۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۳۳

در خوشه دوم که شامل سخت‌افزارهای کلیدی هوشمندسازی است، چهار شاخص مورد مقایسه قرار گرفتند (جدول ۷). نتایج نشان می‌دهد که کشاورزی دقیق و داده‌محور با وزن محلی ۰/۴۲ اولویت نخست را دارا است. پس از آن، زیرساخت‌های دیجیتال و شبکه ارتباطات روستایی با وزن ۰/۳۲ در جایگاه دوم قرار گرفته است. نکته قابل تامل، وزن پایین زیرمعیارهای هوش مصنوعی (۰/۱۵) و رباتیک و پهپاد (۰/۱۱) در این خوشه است که نشان‌دهنده رویکرد واقع‌گرایانه خبرگان به محدودیت‌های کنونی زیرساخت‌های پایه در ایران است.

خوشه چهارم ابعاد نهادی و اکوسیستمی را مورد سنجش قرار می‌دهد. یافته‌ها در جدول ۹ نشان می‌دهد که سیاست‌ها و حمایت‌های مالی با وزن ۰/۳۷ برترین زیرمعیار در این گروه است. دو شاخص تحقیق و توسعه و توسعه کشاورزی نوین با وزن مشابه ۰/۲۲ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. نرخ ناسازگاری صفر ($CR = 0$) در این ماتریس، نشان‌دهنده ثبات و هماهنگی کامل در ترجیحات خبرگان نسبت به نقش حاکمیت و سیاست‌گذاری در تحول کشاورزی است.

طراحی نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی ایران با تأکید بر کارآفرینی پایدار: ترکیب تجارب جهانی و ...

جدول ۷- مقایسات زوجی و بردار اولویت نهایی زیرمعیارهای مجموعه زیرساخت فناوریانه (فناوری‌ها)

زیرمعیار	کشاورزی دقیق	هوش مصنوعی	رباتیک	زیرساخت روستایی	وزن محلی
کشاورزی دقیق	۱/۰۰	۲/۰۰	۴/۱۵	۱/۸۴	۰/۴۲
هوش مصنوعی	۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۹۰	۰/۵۰	۰/۱۵
رباتیک و پهپاد	۰/۲۴	۱/۱۱	۱/۰۰	۰/۲۲	۰/۱۱
زیرساخت روستایی	۰/۵۴	۲/۰۰	۴/۵۵	۱/۰۰	۰/۳۲

مجموعه سوم بر سازوکارهای بازار و اعتماد در زنجیره تأمین تمرکز دارد. تحلیل ماتریس در جدول ۸ نشان می‌دهد پلتفرم‌های بازاررسانی با وزن محلی ۰/۶۸ اولویت بسیار بالاتری نسبت به بلاک‌چین و شفافیت (۰/۳۲) دارند. این نتیجه حاکی از آن است که در شرایط کنونی، دسترسی به بازار و کاهش هزینه‌های مبادله اولویت عملیاتی بیشتری نسبت به فناوری‌های ثبت تراکنش (بلاک‌چین) دارد.

جدول ۸- مقایسات زوجی و بردار اولویت نهایی زیرمعیارهای مجموعه زیرساخت شفافیت (بازار و زنجیره تأمین)

زیرمعیار	بلاک‌چین و شفافیت	پلتفرم‌های بازاررسانی	وزن محلی
بلاک‌چین و شفافیت	۱/۰۰	۰/۴۸	۰/۳۲
پلتفرم‌های بازاررسانی	۲/۰۸	۱/۰۰	۰/۶۸

جدول ۹- مقایسات زوجی و بردار اولویت نهایی زیرمعیارهای مجموعه زیرساخت تحول‌آفرین (سیاست و نوآوری)

کارآفرینی و استارت‌آپ‌های					
زیرمعیار	فناوری کشاورزی (AgriTech)	سیاست و مالی	تحقیق و توسعه	توسعه کشاورزی نوین	وزن محلی
استارت‌آپ‌ها	۱/۰۰	۰/۴۹	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۱۹
سیاست و مالی	۲/۰۴	۱/۰۰	۱/۴۵	۱/۷۷	۰/۳۷
تحقیق و توسعه	۱/۰۸	۰/۶۹	۱/۰۰	۰/۹۸	۰/۲۲
توسعه نوین	۱/۱۲	۰/۵۶	۱/۰۲	۱/۰۰	۰/۲۲

مقدار نرخ ناسازگاری برای ماتریس مربوط به زیرمعیارهای مجموعه زیرساخت تحول‌آفرین برابر با $CR \approx 0/0$ (پس از گرد کردن $CR \approx 0.0030$) است. همچنین در ادامه، در جدول ۱۰، خلاصه وزن‌های محلی و رتبه‌بندی درون‌گروهی زیرمعیارها ارائه شده است.

۳. تحلیل نرخ ناسازگاری و پایداری منطقی قضاوت‌ها

یکی از ارکان اصلی اعتباربخشی در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، سنجش نرخ ناسازگاری (CR) است. این نرخ نشان‌دهنده میزان هماهنگی و ثبات منطقی در قضاوت‌های زوجی خبرگان می‌باشد. بر اساس معیار متداول ساعتی، اگر نرخ ناسازگاری یک ماتریس مقایسه زوجی کمتر یا مساوی ۰/۱ باشد، سازگاری ماتریس قابل قبول بوده و در غیر این صورت، قضاوت‌ها باید مورد بازنگری قرار گیرند. در این پژوهش، جهت تضمین روایی محاسباتی، نرخ ناسازگاری برای تمامی ماتریس‌های سطح ۱ و سطح ۲ محاسبه شد. مبنای ریاضی این محاسبات بر شاخص ناسازگاری (CI) و شاخص تصادفی (RI) استوار است که طبق رابطه ۳ استخراج شده است. نتایج حاصل از تحلیل سازگاری برای تمامی خوشه‌های پژوهش در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۰- خلاصه وزن‌های محلی و رتبه‌بندی درون‌گروهی زیرمعیارها

خوشه اصلی	زیرمعیارها	وزن محلی	رتبه در خوشه
شناختی	آموزش و توانمندسازی	۰/۶۷	۱
	همکاری و انتقال دانش	۰/۳۳	۲
فناورانه	کشاورزی دقیق و داده‌محور	۰/۴۲	۱
	زیرساخت و شبکه ارتباطات روستایی	۰/۳۲	۲
	هوش مصنوعی و داده بزرگ	۰/۱۵	۳
	رباتیک و پهپاد	۰/۱۱	۴
شفافیت	پلتفرم‌های بازاریارسانی	۰/۶۸	۱
	بلاک‌چین و شفافیت	۰/۳۲	۲
تحول‌آفرین	سیاست‌ها و حمایت مالی	۰/۳۷	۱
	تحقیق و توسعه (R&D)	۰/۲۲	۲
	توسعه کشاورزی نوین	۰/۲۲	۳
	کارآفرینی و استارت‌آپ‌های فناوری کشاورزی (AgiriTech)	۰/۱۹	۴

جدول ۱۱- مقادیر نرخ ناسازگاری (CR) ماتریس‌های مقایسه زوجی

ماتریس‌های مورد سنجش	ابعاد ماتریس	نرخ ناسازگاری	وضعیت پایایی قضاوت‌ها
معیارهای اصلی (سطح ۱)	۴ * ۴	۰/۰۳۳۵۹	مطلوب و سازگار
زیرمعیارهای فناورانه	۴ * ۴	۰/۰۷۲۷	مطلوب و سازگار
زیرمعیارهای تحول‌آفرین	۴ * ۴	۰/۰۰۳۰	سازگاری کامل
زیرمعیارهای شناختی	۲ * ۲	۰/۰۰	سازگاری ذاتی
زیرمعیارهای شفافیت	۲ * ۲	۰/۰۰	سازگاری ذاتی

در ماتریس‌های سطح اول و ماتریس‌های فناورانه، مقادیر نرخ ناسازگاری ۰/۰۳۳۵۹ و ۰/۰۷ نشان می‌دهند که، با وجود پیچیدگی مقایسات زوجی در ماتریس‌های چهاردرجه‌ای، خبرگان توانسته‌اند اولویت‌های نسبی را با دقت مناسبی تعیین کنند و میزان انحراف قضاوت‌ها از سازگاری منطقی در سطح بسیار پایینی قرار دارد. همچنین، مقدار ۰/۰۰۲۱ برای نرخ ناسازگاری ماتریس زیرمعیارهای تحول‌آفرین، بیانگر هماهنگی کامل در ترجیحات خبرگان نسبت به مؤلفه‌های سیاست‌گذاری و نوآوری است.

در خصوص ماتریس‌های مرتبه دوم (۲×۲) مربوط به زیرمعیارهای شناختی و شفافیت نیز، با توجه به اصول ریاضی روش AHP، شاخص تصادفی (RI) برای ماتریس‌های با مرتبه $n=2$ برابر با صفر است؛ ازاین‌رو، این ماتریس‌ها به‌صورت ذاتی سازگار تلقی می‌شوند. با توجه به اینکه تمامی نرخ‌های ناسازگاری محاسبه‌شده به‌طور معناداری کمتر از حد آستانه ۰/۱ هستند، سازگاری قضاوت‌های خبرگان و اعتبار محاسباتی نتایج مدل تأیید می‌شود. بنابراین، اولویت‌بندی‌های ارائه‌شده در بخش بعدی (سنتز نهایی) بر پایه قضاوت‌هایی سازگار و قابل اتکا استوار بوده و می‌توان از نتایج حاصل در تدوین برنامه‌های راهبردی مرتبط با هوشمندسازی کشاورزی بهره گرفت.

۴. سنتز نهایی و استخراج وزن‌های کلی شاخص‌ها

در آخرین گام از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، مرحله سنتز اولویت‌ها انجام شد. هدف از این مرحله، محاسبه وزن نهایی هر یک از زیرمعیارها نسبت به هدف کل پژوهش است. وزن‌های کلی از طریق ترکیب وزن‌های نسبی سطح اول (معیارهای اصلی) با وزن‌های محلی سطح دوم (زیرمعیارها) به دست آمدند. بر اساس منطق AHP، وزن نهایی هر زیرمعیار GW_i از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$GW_{sub-criterion} = W_{parent-criterion} \times LW_{sub-criterion} \quad (\text{رابطه ۴})$$

طراحی نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی ایران با تأکید بر کارآفرینی پایدار: ترکیب تجارب جهانی و ...

نتایج حاصل از این سنتز سلسله‌مراتبی که رتبه‌بندی نهایی تمامی ۱۲ شاخص کلیدی نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی را نشان می‌دهد، در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲- رتبه‌بندی نهایی و سنتز کلی زیرمعیارها (ترتیب نزولی اهمیت)

رتبه	زیرمعیارهای عملیاتی	معیار پدري (سطح ۱)	وزن محلی	وزن نهایی	درصد اهمیت
۱	آموزش و توانمندسازی	زیرساخت شناختی	۰/۶۷	۰/۱۹۲۲	۱۹/۲۲
۲	پلتفرم‌های بازاریارسانی	زیرساخت شفافیت	۰/۶۸	۰/۱۴۵۵	۱۴/۵۵
۳	کشاورزی دقیق و داده‌محور	زیرساخت فناوریانه	۰/۴۲	۰/۱۲۲۸	۱۲/۲۸
۴	همکاری و انتقال دانش	زیرساخت شناختی	۰/۳۳	۰/۰۹۶۱	۹/۶۱
۵	زیرساخت و شبکه ارتباطات روستایی	زیرساخت فناوریانه	۰/۳۲	۰/۰۹۳۶	۹/۳۶
۶	بلاک‌چین و شفافیت زنجیره	زیرساخت شفافیت	۰/۳۲	۰/۰۶۹۸	۶/۹۸
۷	سیاست‌ها و حمایت مالی	زیرساخت تحول آفرین	۰/۳۷	۰/۰۷۴۱	۷/۴۱
۸	تحقیق و توسعه (R&D)	زیرساخت تحول آفرین	۰/۲۲	۰/۰۴۵۳	۴/۵۳
۹	توسعه کشاورزی نوین	زیرساخت تحول آفرین	۰/۲۲	۰/۰۴۳۹	۴/۳۹
۱۰	هوش مصنوعی و داده بزرگ	زیرساخت فناوریانه	۰/۱۵	۰/۰۴۴۶	۴/۴۶
۱۱	کارآفرینی و استارت‌آپ‌های فناوری کشاورزی (AgriTech)	زیرساخت تحول آفرین	۰/۱۹	۰/۰۳۹۱	۳/۹۱
۱۲	رباتیک و پهپاد	زیرساخت فناوریانه	۰/۱۱	۰/۰۳۲۶	۳/۰۰
جمع				≈/۱۰۰	≈/۱۰۰

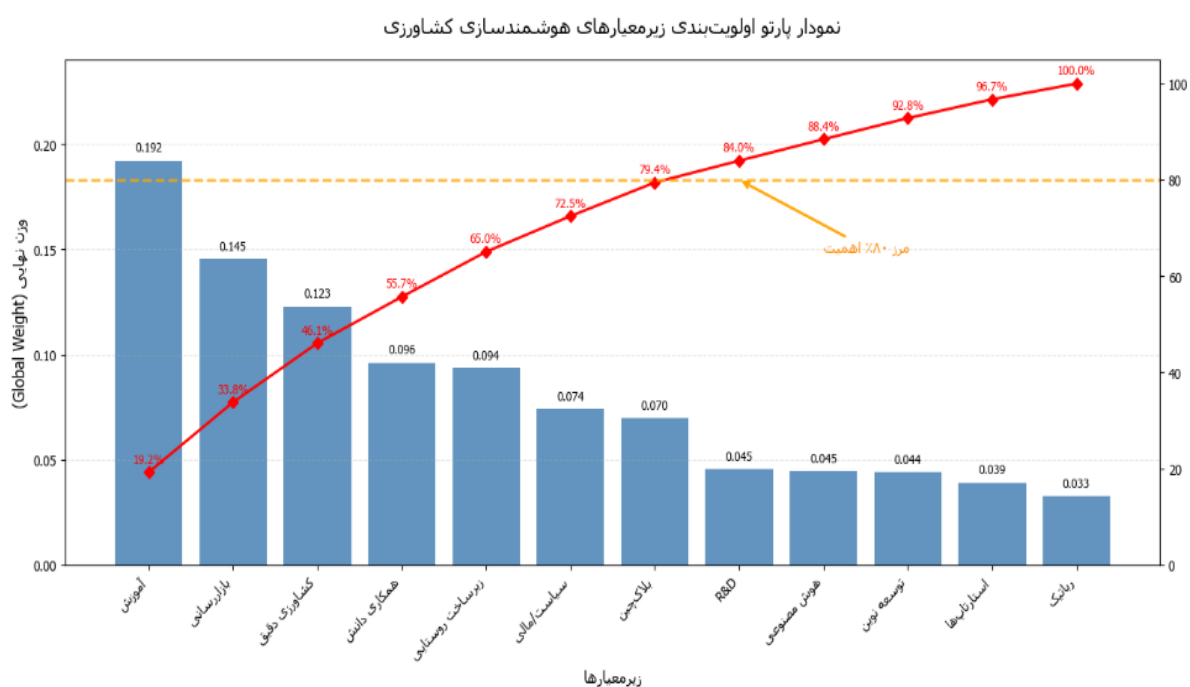
تحلیل داده‌های جدول بالا نشان‌دهنده توزیع اهمیت زیرمعیارها در سه سطح متمایز است. عوامل حیاتی موفقیت: سه شاخص آموزش و توانمندسازی، پلتفرم‌های بازاریارسانی و کشاورزی دقیق در مجموع ۴۶/۳ درصد از وزن کل نقشه راه را به خود اختصاص داده‌اند. این موضوع حاکی از آن است که هسته سخت تحول در کشاورزی هوشمند بر پایه مثلث مهارت، بازار و مدیریت داده استوار است.

عوامل میان‌رده: شاخص‌هایی نظیر شبکه ارتباطات روستایی، همکاری‌های دانش‌بنیان و سیاست‌های مالی در رتبه‌های میانی قرار دارند که نقش بستر ساز و تسهیل‌گر را برای عوامل حیاتی ایفا می‌کنند.

فناوری‌های نوظهور: شاخص‌هایی مانند هوش مصنوعی، استارت‌آپ‌ها و رباتیک در انتهای رتبه‌بندی قرار گرفته‌اند. این یافته به معنای عدم اهمیت این مؤلفه‌ها نیست، بلکه نشان‌دهنده آن است که از دیدگاه خبرگان، این ابزارها در اولویت‌های بعدی قرار داشته و بهره‌برداری از آن‌ها منوط به تحقق زیرساخت‌های شناختی و ارتباطی پیش‌نیاز است.

به‌منظور شناسایی اولویت‌های راهبردی و تفکیک «عوامل حیاتی» از «عوامل فرعی»، نتایج حاصل از سنتز نهایی AHP در قالب نمودار پارتو (نمودار ۱) ترسیم گردید. تحلیل توزیع وزن‌ها نشان‌دهنده الگوی تمرکز راهبردی در شاخص‌های کلیدی است؛ به‌گونه‌ای که بخش عمده‌ای از اهمیت این نقشه راه در تعداد محدودی از عوامل متمرکز شده است. بر این اساس، سه راهبرد نخست شامل آموزش و توانمندسازی (۰/۱۹۲)، پلتفرم‌های بازاریارسانی (۰/۱۴۵) و کشاورزی دقیق و داده‌محور (۰/۱۲۳)، در مجموع ۴۶ درصد از وزن کل نقشه راه را به خود اختصاص داده‌اند.

اگرچه نسبت کلاسیک ۸۰/۲۰ پارتو به‌صورت مطلق در داده‌های این پژوهش مشاهده نمی‌شود، اما توزیع نامتوازن وزن‌ها تأیید می‌کند که تمرکز منابع بر مجموعه محدودی از عوامل کلیدی، راهبردی به‌مراتب اثربخش‌تر از پراکنده‌سازی سرمایه در میان تمامی راهبردهاست. بررسی خط درصد تجمیعی نشان می‌دهد که مرز ۸۰ درصد اهمیت (خط‌چین نارنجی) در هفتمین زیرمعیار، یعنی سیاست‌ها و حمایت‌های مالی، محقق شده است. این یافته حاکی از آن است که تمرکز سیاست‌گذار بر این ۷ شاخص کلیدی، می‌تواند تا ۸۰ درصد بر موفقیت فرآیند هوشمندسازی در بخش کشاورزی ایران اثرگذار باشد. در مقابل، ۵ شاخص انتهایی نمودار که شامل فناوری‌های پیشرفته‌ای همچون هوش مصنوعی و رباتیک هستند، مجموعاً حدود ۲۰ درصد از اولویت‌بندی فعلی را به خود اختصاص داده‌اند که بیانگر لزوم اولویت‌بندی زمانی و زیرساختی در نقشه راه پیش‌رو است.



نمودار ۱- تحلیل پاره‌تو اولویت‌های نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی

تحلیل و تفسیر

یافته‌های حاصل از این پژوهش، دریچه‌ای نو به‌سوی درک پیچیدگی‌های گذار از کشاورزی سنتی به هوشمند در اقتصادهای درحال توسعه می‌گشاید. سنتز نهایی اوزان نشان داد که نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی ایران، پیش از آنکه یک چالش سخت‌افزاری باشد، یک مأموریت انسان‌محور و اقتصادپایه است.

۱. تحلیل راهبردی بر اساس قاعده پاره‌تو

نتایج حاصل از تحلیل پارتو (نمودار ۱) حاکی از وجود یک شکاف معنادار میان اولویت‌های زیرساختی-پایه‌ای و تکنولوژیک-تجهیزاتی است. پیشی گرفتن وزن تجمیعی مؤلفه‌های نرم (آموزش و بازاررسانی) بر مؤلفه‌های سخت (رباتیک و هوش مصنوعی) نشان‌دهنده بلوغ فکری خبرگان در درک چالش‌های بومی است. بر اساس این تحلیل، تمرکز منابع محدود دولتی و بخش خصوصی باید بر «تاحیه بحرانی پارتو» (۷ شاخص اول) معطوف گردد. این یافته با مبانی مدیریت استراتژیک منابع همخوانی دارد که تأکید می‌کند برای دستیابی به بیشترین اثرگذاری، باید از پراکنده‌سازی منابع در تمامی شاخص‌ها خودداری کرده و بر پیش‌ران‌های اصلی متمرکز شد. در این میان، اولویت مطلق آموزش و توانمندسازی با سهم ۱۹/۲ درصدی در ابتدای نمودار، به‌وضوح نشان می‌دهد که هرگونه نقشه راهی که فاقد پیوست آموزشی باشد، علیرغم تجهیز به فناوری‌های پیشرفته، در دستیابی به پایداری ناکام خواهد ماند.

۲. زیرساخت شناختی. پیش‌ران گذار پارادایمیک (تبیین رتبه ۱)

قرار گرفتن زیرمعیار آموزش و توانمندسازی در رأس اولویت‌ها (وزن ۰/۱۹۲)، تأییدکننده این واقعیت است که هوشمندسازی در بخش کشاورزی یک تغییر پارادایم است. بر اساس نظریه انتشار نوآوری اورت راجرز، پذیرش یک فناوری نوظهور بیش از آنکه به ویژگی‌های فنی ابزار وابسته باشد، به درک، نگرش و مهارت‌های کاربر گره خورده است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که زیرساخت شناختی سنگ‌بنای نقشه راه است؛ چراکه بدون ارتقای سواد دیجیتال کشاورزان، پیشرفته‌ترین سامانه‌های هوشمند نیز با مقاومت در پذیرش یا شکست در بهره‌برداری مواجه خواهند شد. این نتیجه با دیدگاه سیستم‌های

طراحی نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی ایران با تأکید بر کارآفرینی پایدار: ترکیب تجارب جهانی و ...

فنی-اجتماعی همخوانی دارد که معتقد است بهینه‌سازی عملکرد تنها از طریق هم‌راستایی میان سیستم فنی (فناوری) و سیستم اجتماعی (انسان) میسر است.

۳. تحلیل شکاف بازار و فناوری؛ محرک اقتصادی نوآوری (تبیین رتبه ۲ و ۳)

رتبه دوم پلتفرم‌های بازاررسانی (۰/۱۴۵) و برتری آن بر کشاورزی دقیق (۰/۱۲۳)، حاوی این پیام استراتژیک است که در اکوسیستم کشاورزی ایران، اقتصاد پیش‌ران فناوری است. خبرگان بر این باورند که تا زمانی که زنجیره ارزش شفاف نگردد و کشاورز از طریق پلتفرم‌های دیجیتال به بازار مستقیم وصل نشود، انگیزه و توان مالی لازم برای سرمایه‌گذاری در ابزارهای کشاورزی دقیق (مانند سنسورها و ایستگاه‌های هواشناسی) ایجاد نخواهد شد. در واقع، پلتفرم‌های بازاررسانی نقش نیروی کششی را ایفا می‌کنند که تقاضا برای هوشمندسازی را در سطح مزرعه تحریک می‌نماید. این یافته نشان می‌دهد که برای موفقیت نقشه راه، ابتدا باید امنیت اقتصادی کارآفرین کشاورز از طریق کاهش واسطه‌گری و شفافیت قیمت تأمین گردد.

۴. نقد واقع‌گرایانه فناوری‌های پیشرفته (بررسی رتبه‌های انتهایی)

پایین بودن رتبه شاخص‌هایی نظیر رباتیک و پهپاد (۰/۰۳) و هوش مصنوعی (۰/۰۴) در نتایج پژوهش، به معنای نفی اهمیت این فناوری‌ها نیست، بلکه نشان‌دهنده واقع‌گرایی استراتژیک خبرگان نسبت به چالش‌های ساختاری ایران است. موانعی همچون خرد بودن اراضی (رباتیک و مکانیزاسیون هوشمند نیازمند مقیاس اقتصادی و اراضی یکپارچه هستند که در حال حاضر در بخش بزرگی از کشاورزی ایران مفقود است)، هزینه سرمایه‌گذاری (که با توجه به نرخ ارز و تحریم‌ها، ورود این تجهیزات با هزینه‌های گزافی همراه است که نرخ بازگشت سرمایه را غیرمنطقی می‌کند) و شکاف داده‌ای (هوش مصنوعی نیازمند کلان‌داده است، در حالی که رتبه پنجم زیرساخت روستایی نشان می‌دهد که هنوز در مرحله جمع‌آوری و انتقال داده‌های پایه با چالش مواجه می‌باشیم).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با هدف تدوین و اولویت‌بندی نقشه راه هوشمندسازی کشاورزی با محوریت کارآفرینی پایدار، از ترکیب مطالعه تطبیقی تجارب ۱۱ کشور منتخب و تحلیل سلسله‌مراتبی قضاوت خبرگان بهره گرفت. یافته‌های مطالعه تطبیقی نشان دادند که اگرچه کشورهای مورد بررسی از نظر محرک‌های گذار، ساختار اقتصادی، اقلیم و سطح توسعه فناوری تفاوت‌های معناداری دارند، الگوی مشترکی در تجارب آن‌ها قابل شناسایی است. هوشمندسازی موفق کشاورزی نه حاصل استقرار منفرد فناوری، بلکه پیامد تعامل میان سرمایه انسانی، زیرساخت دیجیتال، دسترسی به بازار، حکمرانی داده، حمایت نهادی و ظرفیت نوآوری است. این یافته با نتایج مطالعات مروری اخیر همخوان است که پذیرش فناوری‌های کشاورزی هوشمند را فرآیندی پیچیده و چند دینفعی دانسته و بر ناکافی بودن تبیین‌های صرفاً اقتصادی یا فناوری‌محور تأکید کرده‌اند.

مقایسه کشورها نشان می‌دهد که محرک اولیه هوشمندسازی در کشورها یکسان نیست، اما راه‌حل‌ها به تدریج به سمت ترکیب فناوری با یک مسئله واقعی بخش کشاورزی حرکت کرده‌اند. در ژاپن و کره جنوبی، کمبود و سالمندی نیروی کار محرک توسعه اتوماسیون و مزارع هوشمند بوده است. در استرالیا و اسپانیا، کمبود آب و فشارهای اقلیمی به توسعه فناوری‌های پایش و مدیریت هوشمند آب انجامیده؛ در هلند و دانمارک، محدودیت منابع و الزامات محیط‌زیستی محرک استفاده از فناوری برای افزایش بهره‌وری و کاهش نهاده‌ها بوده است. در چین و برزیل، مسئله دسترسی روستاییان و کشاورزان خرد به فناوری و بازار اهمیت بیشتری یافته است. بنابراین، تجربه کشورهای منتخب از وجود یک نسخه واحد برای هوشمندسازی حمایت نمی‌کند، بلکه نشان می‌دهد فناوری زمانی بیشترین ارزش را ایجاد می‌کند که با مسئله غالب اکوسیستم کشاورزی هم‌تراز شود.

این یافته با ادبیات جدید پذیرش فناوری نیز سازگار است. گتاهون و همکاران (Getahun et al., 2024) در یک مرور نظام‌مند نشان دادند که افزایش بهره‌وری، دسترسی به اطلاعات و حمایت آموزشی از مهم‌ترین عوامل تسهیل‌کننده پذیرش فناوری‌های کشاورزی هوشمند هستند، در حالی که پیچیدگی فناوری، نیازهای زیرساختی و افزایش بار استفاده از فناوری از مهم‌ترین

موانع محسوب می‌شوند. از این منظر، نتیجه مطالعه حاضر که آموزش و توانمندسازی با وزن نهایی ۱۸/۹ درصد در رتبه نخست قرار گرفته است، صرفاً یک اولویت آماری نیست، بلکه نشان‌دهنده یک منطق علی مهم در مسیر تحول دیجیتال کشاورزی است که فناوری بدون قابلیت جذب و استفاده، به ظرفیت اقتصادی تبدیل نمی‌شود. به بیان دیگر، سرمایه انسانی در این پژوهش نه یک عامل جانبی، بلکه حلقه واسط میان فناوری و خلق ارزش اقتصادی است.

یافته مهم دیگر، قرار گرفتن پلتفرم‌های بازاریارسانی با وزن ۱۵/۴۱ درصد در رتبه دوم است. این یافته اهمیت ویژه‌ای برای محور کارآفرینی پایدار دارد، زیرا نشان می‌دهد مسئله هوشمندسازی در کشاورزی ایران صرفاً افزایش بهره‌وری در مزرعه نیست، بلکه اتصال بهره‌وری به بازار نیز هست. کشاورزی هوشمند زمانی می‌تواند به کارآفرینی پایدار منجر شود که داده و فناوری بتوانند هزینه‌های جست‌وجوی بازار، عدم تقارن اطلاعاتی و وابستگی تولیدکننده به واسطه‌ها را کاهش دهند. شواهد پژوهشی نیز نشان می‌دهد که پلتفرم‌های دیجیتال با بهبود دسترسی به بازار و کاهش برخی موانع ورود، می‌توانند فعالیت‌های کارآفرینانه را افزایش دهند؛ این اثر به‌ویژه برای گروه‌هایی که دسترسی محدودی به بازار دارند، اهمیت بیشتری دارد. شواهد مربوط به کشاورزان مناطق روستایی نیز نشان می‌دهد پلتفرم‌های دیجیتال می‌توانند شفافیت قیمت و فرصت‌های بازار را افزایش دهند، هرچند محدودیت‌های سواد دیجیتال، هزینه تراکنش، لجستیک و اعتماد همچنان مانع بهره‌برداری کامل از این ظرفیت است.

از این منظر، رتبه بالای پلتفرم‌های بازاریارسانی را می‌توان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین یافته‌های متمایزکننده پژوهش حاضر تفسیر کرد. بسیاری از مطالعات مربوط به کشاورزی هوشمند عمدتاً بر فناوری‌های مزرعه‌ای، اینترنت اشیا، حسگرها، هوش مصنوعی و اتوماسیون متمرکز بوده‌اند، در حالی که یافته‌های حاضر نشان می‌دهد برای پیوند دادن هوشمندسازی با کارآفرینی پایدار، بازار باید در کنار مزرعه قرار گیرد. در واقع، فناوری هنگامی به نوآوری اقتصادی تبدیل می‌شود که بتواند مسئله خلق و تصاحب ارزش را نیز حل کند. این برداشت با مطالعاتی که نقش پلتفرم‌های دیجیتال را در کاهش هزینه‌های مبادله، بهبود کشف قیمت و اتصال مستقیم‌تر تولیدکنندگان به بازارها برجسته کرده‌اند، همسو است.

در رتبه سوم، کشاورزی دقیق و داده‌محور با وزن ۱۲ درصد قرار گرفته است. اهمیت این یافته در آن است که کشاورزی دقیق در نقطه اتصال سرمایه انسانی و فناوری قرار دارد. برخلاف فناوری‌هایی نظیر رباتیک که نیازمند سرمایه‌گذاری و زیرساخت‌های پیچیده‌تری هستند، کشاورزی دقیق می‌تواند از طریق جمع‌آوری و تفسیر داده‌های مزرعه، کیفیت تصمیم‌گیری را بهبود دهد و مصرف آب، کود و سم را هدفمندتر کند؛ بنابراین، قرار گرفتن کشاورزی دقیق در میان سه اولویت نخست نشان می‌دهد که خبرگان بیش از اتوماسیون کامل بر تصمیم‌گیری بهتر تأکید داشته‌اند. این نتیجه با پژوهش‌هایی که نقش داده و هوش مصنوعی را در تکمیل دانش کشاورزان و بهبود تصمیم‌گیری مزرعه‌ای برجسته می‌کنند، هم‌راستا است.

در مقابل، رتبه پایین‌تر هوش مصنوعی و داده‌های بزرگ با وزن ۴ درصد و رباتیک و پهپاد با وزن ۳ درصد نباید به معنای کم‌اهمیت بودن این فناوری‌ها تفسیر شود. تفسیر صحیح این یافته، تفاوت میان اهمیت فناوری و اولویت زمانی سرمایه‌گذاری است. فناوری‌های پیشرفته ممکن است از نظر ظرفیت تحول‌آفرینی اهمیت بالایی داشته باشند، اما برای استقرار گسترده به زیرساخت داده، اتصال پایدار، نیروی انسانی ماهر، مدل اقتصادی مناسب و قابلیت جذب سازمانی نیاز دارند. مرورهای اخیر نیز نشان داده‌اند که پیچیدگی فناوری، نیاز به زیرساخت و کمبود آموزش از موانع مهم پذیرش فناوری‌های هوشمند هستند. بنابراین، یافته حاضر را می‌توان به‌عنوان شواهدی برای ضرورت توالی هوشمندسازی تفسیر کرد. لذا ابتدا باید قابلیت‌های پایه ایجاد شوند و سپس فناوری‌های پیچیده‌تر در مقیاس گسترده توسعه یابند.

از این منظر، تفاوت میان رتبه کشاورزی دقیق و رباتیک از نظر نظری نیز قابل توجه است. کشاورزی دقیق عمدتاً قابلیت تصمیم‌گیری و مدیریت منابع را تقویت می‌کند، در حالی که رباتیک و اتوماسیون بیش از هر چیز قابلیت جایگزینی یا تکمیل فعالیت‌های انسانی را توسعه می‌دهند. در شرایطی که محدودیت اصلی اکوسیستم کشاورزی ایران تنها کمبود نیروی کار نیست و همزمان با مشکلاتی مانند خردشدگی اراضی، محدودیت سرمایه، ضعف اتصال دیجیتال و شکاف مهارتی مواجه است، طبیعی است که خبرگان فناوری‌هایی را در اولویت بالاتر قرار دهند که نسبت هزینه به ارزش و قابلیت انطباق بیشتری با شرایط موجود داشته باشند. بنابراین، یافته پژوهش حاضر را می‌توان نوعی واقع‌گرایی فناورانه در سیاست‌گذاری کشاورزی ایران دانست.

یافته دیگر، وزن نسبتاً بالای همکاری و انتقال دانش و زیرساخت و شبکه ارتباطات روستایی است. این نتیجه نشان می‌دهد که هوشمندسازی را نمی‌توان صرفاً در سطح مزرعه تحلیل کرد و باید آن را به عنوان یک اکوسیستم چندبازیگری در نظر گرفت. همکاری میان دانشگاه، بخش خصوصی، دولت، شرکت‌های فناوری و کشاورزان امکان تبدیل دانش پراکنده و پنهان به دانش قابل استفاده و قابل مقیاس را فراهم می‌کند. پژوهش‌های مبتنی بر مدل SECI نیز در زمینه کشاورزی نشان داده‌اند که تعامل میان دانش پنهان و آشکار می‌تواند زمینه شناسایی فرصت‌های نوآوری و بازآرایی فرآیندهای تولید کشاورزی را فراهم سازد؛ بنابراین، قرار گرفتن همکاری و انتقال دانش در رتبه چهارم را می‌توان تأییدی بر این دیدگاه دانست که تحول دیجیتال کشاورزی، علاوه بر زیرساخت فنی، نیازمند زیرساخت دانشی و اجتماعی است.

در سطح نظری، یافته‌های پژوهش حاضر از ارزش تلفیق مدل SECI و نظریه قابلیت‌های پویا حمایت می‌کند. این مدل توضیح می‌دهد که چگونه دانش پنهان کشاورزان، کارشناسان و کارآفرینان از طریق تعامل، برون‌سازی، ترکیب و درونی‌سازی به دانش قابل انتقال تبدیل می‌شود، اما صرف خلق و انتقال دانش الزاماً به تحول اقتصادی منجر نمی‌شود. نظریه قابلیت‌های پویا این حلقه مفقوده را توضیح می‌دهد و نشان می‌دهد که چگونه بازیگران باید بتوانند فرصت‌ها را تشخیص دهند، منابع و دانش موجود را به ارزش تبدیل کنند و در پاسخ به تغییرات محیطی، منابع و قابلیت‌های خود را بازآرایی کنند. یافته‌های پژوهش حاضر این رابطه را به شکل تجربی‌تری نشان می‌دهد. آموزش و انتقال دانش در بخش شناختی، کشاورزی دقیق و اتصال در بخش فناوریانه، پلتفرم‌های بازاررسانی در بخش شفافیت و مبادله و سیاست، تحقیق و توسعه و کارآفرینی فناوریانه در بخش تحول‌آفرین، در واقع زنجیره‌ای از خلق دانش تا خلق ارزش را شکل می‌دهند. این تفسیر با پژوهش‌های جدیدی که قابلیت‌های دیجیتال و تحلیل داده را بخشی از قابلیت‌های پویا برای تحقق تحول دیجیتال در بنگاه‌های کشاورزی و غذایی می‌دانند نیز سازگار است.

بر این اساس، مشارکت نظری اصلی پژوهش حاضر را می‌توان در عبور از دوگانه فناوری در برابر انسان و ارائه یک منطق مرحله‌ای برای تحول دیجیتال کشاورزی دانست. مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که فناوری نه نقطه شروع و نه نقطه پایان هوشمندسازی است؛ بلکه درون یک زنجیره دانشی، زیرساختی، بازاری و نهادی عمل می‌کند. در این زنجیره، دانش و مهارت ظرفیت جذب فناوری را ایجاد می‌کنند، زیرساخت دیجیتال امکان تولید و گردش داده را فراهم می‌سازد، پلتفرم‌های بازاررسانی داده و فناوری را به ارزش اقتصادی متصل می‌کنند و قابلیت‌های تحول‌آفرین، این ارزش را از طریق نوآوری، کارآفرینی و بازآرایی منابع توسعه می‌دهند. از این منظر، چارچوب پیشنهادی پژوهش حاضر می‌تواند خلأ میان ادبیات پذیرش فناوری و ادبیات قابلیت‌های سازمانی و کارآفرینی را تا حدی پر کند.

از منظر پیامدهای سیاستی و مدیریتی، یافته‌های پژوهش پیام روشنی برای سیاست‌گذاری هوشمندسازی کشاورزی ایران دارد. نخست، سیاست‌گذاری نباید با رویکرد فناوری‌محور و تمرکز اولیه بر خرید و استقرار تجهیزات پیشرفته انجام شود. اولویت نخست باید ایجاد ظرفیت جذب فناوری از طریق آموزش، توانمندسازی دیجیتال، توسعه خدمات ترویجی نوین و ایجاد شبکه‌های یادگیری کشاورزان باشد. دوم، توسعه زیرساخت شبکه ارتباطات روستایی باید به عنوان زیرساخت پایه نقشه راه در نظر گرفته شود؛ زیرا بدون اتصال پایدار، داده‌محوری، پلتفرم‌های بازار و بسیاری از کاربردهای هوش مصنوعی قابلیت مقیاس‌پذیری نخواهند داشت. سوم، سیاست‌گذاران باید توسعه بازارهای دیجیتال کشاورزی را هم‌سطح توسعه فناوری تولید قرار دهند. پلتفرم‌های بازاررسانی می‌توانند با کاهش هزینه جست‌وجو و مبادله و افزایش شفافیت، امکان تبدیل فناوری به درآمد و فرصت کارآفرینانه را افزایش دهند. چهارم، حمایت مالی باید از یارانه صرف خرید تجهیزات به سمت مدل‌های ترکیبی شامل تأمین مالی نوآوری، اعتباردهی داده‌محور، بیمه هوشمند، سرمایه‌گذاری خطرپذیر و حمایت از کارآفرینی و استارت‌آپ‌های فناوری کشاورزی (AgiriTech) حرکت کند.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهای زیر به سیاست‌گذاران بخش کشاورزی (به‌ویژه وزارت جهاد کشاورزی) ارائه می‌گردد. بازنگری در تخصیص بودجه. پیشنهاد می‌شود بخشی از اعتبارات که سالانه صرف یارانه‌های مستقیم خرید تجهیزات می‌شود، به سمت توسعه مراکز ترویج دیجیتال و آموزش‌های مهارتی کشاورزان هدایت گردد. حمایت از پلتفرم‌های واسطه دولت باید به جای ورود مستقیم به حوزه فناوری، زیرساخت‌های حقوقی و تسهیلاتی را برای استارت‌آپ‌های حوزه بازاررسانی و زنجیره تأمین فراهم کند تا از این طریق انگیزه مالی برای هوشمندسازی در بدنه کشاورزی ایجاد شود. توسعه اینترنت اشیا

روستایی. با توجه به اهمیت رتبه ۵ (شبکه ارتباطات روستایی)، اولویت زیرساختی دولت باید بر ایجاد شبکه‌های ارزان قیمت و کم‌مصرف داده در مناطق روستایی متمرکز شود تا بستر برای کشاورزی دقیق فراهم گردد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مسیر هوشمندسازی کشاورزی ایران نباید به‌عنوان یک پروژه فناوری اطلاعات، بلکه به‌عنوان یک برنامه تحول اکوسیستمی و کارآفرینانه طراحی شود. مطالعه تطبیقی ۱۱ کشور نشان داد که کشورهای پیشرو، فناوری را در پاسخ به مسائل مشخصی مانند کمبود نیروی کار، محدودیت آب و زمین، الزامات محیط‌زیستی، امنیت غذایی و دسترسی به بازار به کار گرفته‌اند. بنابراین، انتقال صرف فناوری‌های موفق از یک کشور به کشور دیگر بدون توجه به مسئله بومی و ظرفیت جذب آن، الزاماً به نتایج مشابه منجر نخواهد شد.

نتایج AHP نیز این برداشت را تقویت کرد. قرار گرفتن آموزش و توانمندسازی، پلتفرم‌های بازاریابی و کشاورزی دقیق در سه رتبه نخست نشان می‌دهد که نقشه راه مناسب ایران باید بر سه محور مهارت، بازار و داده استوار باشد. در مقابل، قرار گرفتن هوش مصنوعی، کارآفرینی و استارت‌آپ‌های فناوری کشاورزی (AgiriTech) و رباتیک در رتبه‌های پایین‌تر نشان می‌دهد که تنها این فناوری‌ها اهمیت راهبردی دارند بلکه توسعه گسترده آن‌ها باید پس از ایجاد پیش‌نیازهای دانشی، ارتباطی، اقتصادی و نهادی دنبال شود.

از دیدگاه نظری، این پژوهش با تلفیق مدل SECI و نظریه قابلیت‌های پویا نشان می‌دهد که گذار از کشاورزی سنتی به کشاورزی هوشمند تنها زمانی می‌تواند به کارآفرینی پایدار منجر شود که فرآیند خلق و انتقال دانش با قابلیت تشخیص فرصت، بهره‌برداری از دانش و بازاریابی منابع همراه شود. در نتیجه، هوشمندسازی زمانی ارزش‌آفرین است که فناوری در خدمت توسعه قابلیت‌های انسانی، کاهش هزینه‌های مبادله، بهبود تصمیم‌گیری و ایجاد مدل‌های کسب‌وکار جدید قرار گیرد. بر این اساس، مهم‌ترین پیام سیاستی پژوهش آن است که دیجیتالی کردن کشاورزی با هوشمند کردن نظام کشاورزی یکسان نیست. دیجیتالی‌سازی ممکن است صرفاً به ورود تجهیزات، نرم‌افزار و داده منجر شود، اما هوشمندسازی مستلزم ایجاد توانایی یادگیری، همکاری، تصمیم‌گیری، مبادله و نوآوری در کل اکوسیستم است. از همین رو، نقشه راه موفق برای ایران باید به جای تمرکز بر بیشینه‌سازی سرعت ورود فناوری، بر توالی صحیح سرمایه‌گذاری و توسعه قابلیت‌ها تمرکز کند؛ به گونه‌ای که فناوری، دانش، بازار و نهادها به‌صورت مکمل و تدریجی توسعه یابند.

با توجه به یافته‌های این پژوهش و چالش‌های شناسایی شده در مسیر هوشمندسازی و توسعه کارآفرینی در کشاورزی ایران، پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی مطرح می‌گردد که عبارت‌اند از اعتبارسنجی تجربی اولویت‌های نقشه راه در بین ذینفعان مختلف کشاورزی، تدوین نقشه راه منطقه‌ای هوشمندسازی کشاورزی بر اساس تفاوت‌های اقلیمی و ساختاری ایران، اولویت‌بندی راهبردهای هوشمندسازی برای محصولات و زنجیره‌های ارزش مختلف، مقایسه اولویت‌های فعلی با اهمیت فناوری‌های پیشرفته در افق‌های زمانی آینده و بررسی امکان‌پذیری و اولویت اجرایی راهبردهای معرفی شده در این پژوهش.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی با عنوان «طراحی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره و اولویت‌بندی راهبردهای هوشمندسازی در توسعه کارآفرینی کشاورزی در ایران با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی» با شماره قرارداد ۶/۰۴/۱۱۴، مورد حمایت دانشگاه گنبد کاووس قرار گرفته است.

منابع

- اعتمادی، م.، موسوی، س.، و امینی فرد، ع. (۱۴۰۱). ارزیابی عوامل مؤثر بر پذیرش راهکارهای کشاورزی هوشمند به اقلیم با تأکید بر ویژگی‌های سرمایه اجتماعی و روانشناختی. *فصلنامه اقتصاد کشاورزی*، دوره ۱، شماره ۱۶، صص. ۳۳-۱.
- <https://doi.org/10.22034/iaes.2022.538025.1859>
- بهاروند، ف.، حسین پور، م.، و جمشیدی، م. ج. (۱۴۰۱). ارائه الگوی پذیرش فناوری اینترنت اشیا در بخش کشاورزی ایران. *راهبردهای کارآفرینی در کشاورزی*، دوره ۹، شماره ۱۸، صص. ۳۲-۲۲. <https://doi.org/10.52547/jea.9.18.22>

- کرمی فرد، ف.، و گراوندی، ش. (۱۳۹۹). تحلیل مقایسه‌ای هوشمندسازی واحدهای دام پروری کارآفرین شهرستان کرمانشاه با تأکید بر توانمندی دیجیتال مدیران. *مطالعات کارآفرینی و توسعه پایدار کشاورزی*، دوره ۷، شماره ۲، صص. ۷۴-۵۹.
<https://doi.org/10.22069/jead.2021.19065.1472>
- Allis-Gleaner Corporation (AGCO). (2024). AGCO Transforming the future of farming. Available at: <<https://www.agcocorp.com/content/dam/public/agco-corp-v2/en/annual-report/annual-report-2024/Annual-Report-2024.pdf>>
- Agrotech Murcia. (2022). Empowering Agriculture Through Innovation. Available at: <https://agrotechinnovations.eu>
- Alam, G. M., Khatun, M. N., Sarker, M. N. I., Joshi, N. P., and Bhandari, H. (2023). Promoting agri-food systems resilience through ICT in developing countries amid COVID-19. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 972667. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.972667>
- Alibaba Group. (2022). Digital villages initiative: Transforming rural China. Available at: <<https://www.alibabagroup.com>>
- Basso, B., and Antle, J. M. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254–256. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>
- Bechar, A., and Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*, 149, 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>
- Bertoglio, R., Corbo, C., Renga, F. M., and Matteucci, M. (2021). The digital agricultural revolution: A bibliometric analysis literature review. *Ieee Access*, 9, 134762-134782. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115258>
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). (2019). InovAgro program: Financing for agricultural innovation. Available at: <<http://www.bndes.gov.br>>
- Bogucki, A. (2025). Applied trustworthy data and artificial intelligence governance in precision agriculture. In *engineering and value change* (pp. 101-124). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-83549-0_7
- Braun, V., and Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Bronson, K. (2019). Looking through a responsible innovation lens at uneven engagements with digital farming. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.03.001>
- Bronson, K., and Knezevic, I. (2016). Big data in food and agriculture. *Big Data & Society*, 3(1), 2053951716648174. <https://doi.org/10.1177/2053951716648174>
- Cheng, C., Gao, Q., Ju, K., and Ma, Y. (2024). How digital skills affect farmers' agricultural entrepreneurship? An explanation from factor availability. *Journal of Innovation & Knowledge*, 9(2), 100477. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100477>
- Creswell, J. W., and Clark, V. P. (2007). *Mixed methods research*. Thousand Oaks, CA.
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). (2021). FarmBeats: IoT for agriculture. Available at: <<https://www.csiro.au>>
- Danish Agriculture and Food Council. (2023). Digital farming in denmark. Available at: <<https://agricultureandfood.dk>>
- Dessart, F. J., Barreiro-Hurlé, J., and Van Bavel, R. (2019). Behavioural factors affecting the adoption of sustainable farming practices: A policy-oriented review. *European Review of Agricultural Economics*, 46(3), 417–471. <https://doi.org/10.1093/erae/jbz019>
- De Vries, J. R., Turner, J. A., Finlay-Smiths, S., Ryan, A., and Klerkx, L. (2023). Trust in agri-food value chains: A systematic review. *International Food and Agribusiness Management Review*, 26(2), 175-198. <https://doi.org/10.22434/IFAMR2022.0032>
- Easa, N. F. H. (2012). Knowledge management and the SECI model: A study of innovation in the Egyptian banking sector Ph.D. Dissertation, University of Stirling. STORRE. Available at: <<http://hdl.handle.net/1893/5053>>
- Eastwood, C., Klerkx, L., Ayre, M., and Dela Rue, B. (2019). Managing socio-ethical challenges in the development of smart farming: From a fragmented to a comprehensive approach for responsible research and innovation. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 32, 741–768. <https://doi.org/10.1007/s10806-017-9704-5>
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). (2020). Precision agriculture for smallholders. Available at: <<http://www.embrapa.br>>
- European Commission. (2020). *Commission recommendations for The Netherlands' CAP strategic plan* (SWD (2020) 388 final). European Commission. Available at: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020SC0388>>
- Federal Ministry of Food and Agriculture. (2020). *More than 50 million euros for digital trial fields in the agricultural sector*. <https://www.bmel.de/EN/topics/digitalisation/digital-trial-fields.html>
- Fraunhofer Institute. (2021). CATCH project: Robotics in agriculture. Available at: <<https://www.fraunhofer.de>>

- Getahun, S., Kefale, H., and Gelaye, Y. (2024). Application of precision agriculture technologies for sustainable crop production and environmental sustainability: A systematic review. *The Scientific World Journal*, 2024(1), 2126734. <https://doi.org/10.1155/2024/2126734>
- Gebbers, R., and Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Gouvernement français. (2021). Plan de relance: Agriculture. Available at: <<https://www.gouvernement.fr>>
- Hantrais, L. (2008). *International comparative research: Theory, methods and practice*. London, UK: Bloomsbury Publishing.
- International Business Machines (IBM). (2021). IBM Food Trust: Blockchain for food supply chain. Available at: <<https://www.ibm.com>>
- Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE). (2022). *SMARTAGRI project report*. <https://www.inrae.fr>
- Kabato, W., Getnet, G. T., Sinore, T., Nemeth, A., and Molnár, Z. (2025). Towards Climate-Smart Agriculture: Strategies for Sustainable Agricultural Production, Food Security, and Greenhouse Gas Reduction. *Agronomy*, 15(3), 565. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030565>
- Kamilaris, A., and Prenafeta Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- Klerkx, L., Jakku, E., and Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- Korea Agriculture Technology Promotion Agency (KATPA). (2021). Annual report on smart farming technologies. Available at: <<https://www.koreascience.kr/article/JAKO202216758860726.page>>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., and Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Lioutas, E. D., and Charatsari, C. (2020). Smart farming and short food supply chains: Are they compatible?. *Land Use Policy*, 94, 104541. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104541>
- Maffezzoli, F., Ardolino, M., Bacchetti, A., Perona, M., and Renga, F. (2022). Agriculture 4.0: A systematic literature review on the paradigm, technologies and benefits. *Futures*, 142, 102998. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.102998>
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA). (2021). *Digitalización Del Sector Agroalimentario*. <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-digitalizacion-sector-agroalimentario>
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs (MARA). (2023). China's agricultural modernization plan 2021–2025. Available at: <<https://english.moa.gov.cn/>>
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). (2022). *National Smart Farm Expansion Plan*. Available at: <<https://www.mafra.go.kr>>
- Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF). (2023). *Smart agriculture promotion strategy*. Available at: <<https://www.maff.go.jp>>
- Naïo Technologies. (2021). *VITIROBOT: Autonomous vineyard robot*. Available at: <<https://www.naio-technologies.com>>
- National Agriculture and Food Research Organization (NARO). (2021). *Robotic farming in Japan*. Available at: <<https://www.naro.go.jp>>
- Nonaka, I. (2009). The knowledge-creating company. In D. Neef, G. A. Siesfeld, & J. Cefola (Eds.), *The economic impact of knowledge* (pp. 175–187). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080505022-16>
- Nonaka, I., Takeuchi, H., and Umemoto, K. (1996). A theory of organizational knowledge creation. *International Journal of Technology Management*, 11(7–8), 833–845. <https://doi.org/10.1504/IJTM.1996.025472>
- Nowell, L. S., Norris, J. M., White, D. E., & Moules, N. J. (2017). Thematic analysis: Striving to meet the trustworthiness criteria. *International Journal of Qualitative Methods*, 16(1), 1–13. <https://doi.org/10.1177/1609406917733847>
- Ortiz-Bobea, A., Chambers, R. G., He, Y., and Lobell, D. B. (2025). Large increases in public R&D investment are needed to avoid declines of US agricultural productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122(11), e2411010122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2411010122>
- Ouda, S., and Zohry, A. E. H. (2022). *Climate-smart agriculture*. Springer International Publishing.
- Reca, J., Martínez, J., Marín, P. M., Galindo, C., Peña, A. A., and Valera, D. L. (2025). Experimental evaluation of the water productivity and water footprint of a greenhouse tomato crop for different blends of desalinated seawater and two growing media. *Agronomy*, 15(6), 1312. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061312>
- Rihoux, B., and Ragin, C. C. (2009). *Configurational comparative methods: Qualitative comparative analysis (QCA) and related techniques*. USA: Sage.

- Ritonga, R. R., Ernanda, Y., and Simbolon, S. (2024). Integrating knowledge management and change: exploring SECI model applications in SME's and modern organizations. *Bisnis-Net Jurnal Ekonomi dan Bisnis*, 7(2), 927-931. <https://doi.org/10.46576/bn.v7i2.5534>
- Rose, D. C., and Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 387545. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087>
- Rotz, S., Gravely, E., Mosby, I., Duncan, E., Finnis, E., Horgan, M., LeBlanc, J., Martin, R. C., Neufeld, H. T., Nixon, A., Pant, L. P., Shalla, V., and Fraser, E. (2019). Automated pastures and the digital divide: How agricultural technologies are shaping labour and rural communities. *Journal of Rural Studies*, 68, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.01.023>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. UK: McGraw-Hill.
- Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR). (2023). *Digital training for farmers*. <https://www.senar.org.br>
- Tang, P., Liang, Q., Li, H., and Pang, Y. (2024). Application of internet-of-things wireless communication technology in agricultural irrigation management: A review. *Sustainability*, 16(9), 3575. <https://doi.org/10.3390/su16093575>
- Teece, D. J. (2018). Business models and dynamic capabilities. *Long Range Planning*, 51(1), 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2017.06.007>
- Tsouros, D. C., Bibi, S., and Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349. <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- Unicef. (2024). *The state of food security and nutrition in the world 2024*. Available at: <<https://www.fao.org/agrifood-economics/publications/detail/en/c/1707842/>>
- United Nations. (2024). *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9. Stylus Publishing, Limited Liability Company (LLC). New York: United Nations.
- USDA. (2023). *ReConnect program: Rural broadband initiative*. Available at: <<https://www.usda.gov>>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., and Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>