https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 37, Issue 3, No.103, 2026, pp. 1- 46
Received: 28/07/2026 Accepted: 22/09/2026

Forecasting and Development of Future Scenarios for Smart Irrigation Technologies and Agricultural Water Management in Kermanshah Province

Ameneh Abdi
Ph.D. student, Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran
amane.abdi@gmail.com

Ali Asghar Mirakzadeh *
Associate professor, Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran
Mirakzadeh@Razi.ac.ir

Farzad Eskandari
Assistant professor, Department of Agricultural Economy, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
f.eskandari@uok.ac.ir

Abstract

Water crisis and escalating drought conditions have intensified the need to shift from conventional water resource management toward the adoption of smart technologies in the agricultural sector of Kermanshah Province. This study aimed to identify the key drivers and develop future scenarios for advancing smart irrigation and agricultural water management technologies in Kermanshah Province. The novelty of this study lay in its integration of qualitative expert analysis, MICMAC structural analysis, and scenario planning to illuminate the future development of smart agricultural water management technologies within a socio-technical framework. Research data were collected through 74 in-depth interviews with 50 experts, including experienced farmers, specialists and managers of executing companies, and experts in the design and implementation of water technology projects, and were analyzed by using conventional content analysis. Based on the qualitative findings, 24 criteria influencing the future of smart water technologies were identified and their mutual influence and dependence were subsequently examined by using MICMAC structural analysis. The results indicated that, among the identified factors, governance and supportive regulations, energy and water costs, status of water resources, drought and climate change, development of artificial intelligence, and the role of knowledge-based companies were the most significant drivers shaping the future of this field. These six drivers were selected based on their positions within the cross-impact structure and their importance in shaping future states. At the

*Corresponding Author
Abdi,A. , Mirakzadeh, A. A. and Eskandari, F. (2026). Forecasting and Development of Future Scenarios for Smart Irrigation Technologies and Agricultural Water Management in Kermanshah Province. *Geography and Environmental Planning*, 37 (3), 1 - 46 .

2252-0910 © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0).

10.22108/gep.2026.149841.1808

scenario-building stage, future states were defined for each key driver and their consistent combinations were evaluated by using Scenario Wizard software, ultimately yielding 13 consistent scenarios. Among the resulting scenarios, the scenario of "Cost Pressure and Ineffective Policies" exhibited the highest probability of occurrence; in this scenario, rising water and energy costs, weak policy support, and resource constraints impeded the effective expansion of smart technologies. By contrast, the findings revealed that the development of artificial intelligence and knowledge-based companies, if accompanied by reforms in water governance, supportive policies, and sustainable resource management, could establish the foundation for a transition to smart and efficient agricultural water management. Accordingly, the future of smart irrigation technologies in Kermanshah Province depended not merely on technological progress, but also on the degree of coordination among technology, governance, the water–energy economy, and climatic conditions.

Keywords*:* Futures Studies, Smart Irrigation Technologies, Agricultural Water Management, Scenario Planning, Water Governance, Artificial Intelligence.

Introduction

Water is the most critical input in agricultural production and its availability underpins food security, rural livelihoods, and long-term sustainable development. Population growth, rising food demand, expanding agricultural and industrial activity, and accelerating climate change have placed unprecedented pressure on freshwater resources to the point that the demand now exceeds the capacity of available supply in many arid and semi-arid regions. Projections indicate that global food demand will rise by roughly 50% and water demand by more than 30% by 2030, making the water crisis one of the defining challenges of the present century. Against this backdrop, digital agriculture—built on the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, big data, smart sensors, decision-support systems, and spatial data analytics—has opened new possibilities for real-time monitoring of water resources, forecasting crop water requirements, and optimizing consumption, thereby strengthening water-use efficiency and climate resilience in the agricultural sector.

Despite this potential, most existing research has concentrated on the technical and managerial dimensions of smart irrigation technologies with comparatively little attention paid to their future trajectory under compounding climatic, technological, and institutional uncertainty. The success of such technologies is not merely a function of technical infrastructure; it also depends on the quality of water governance, adequacy of supportive policy, access to reliable data, and willingness of farmers and operators to adopt new tools. The present study addressed this gap by conceptualizing the future development of smart agricultural water management technologies as a socio-technical system shaped by the dynamic interaction of water governance, digital technology, and climate change. Accordingly, the study was designed to identify the key drivers shaping this system and develop plausible future scenarios for the development of smart agricultural water management technologies in western Iran with a specific empirical focus on Kermanshah Province—a region whose economy is heavily dependent on agriculture, while being increasingly exposed to climate-related risk.

Materials & Methods

In terms of approach, this study was qualitative; in terms of purpose, it was applied; and in terms of orientation, it was futures-oriented thus being situated within an interpretive paradigm. This positioning stemmed from the premise that understanding the forces shaping the future of smart water management technologies requires in-depth engagement with the experience, perceptions, and judgments of experts and stakeholders in the water and agricultural sectors. The research was carried out in two integrated phases. In the first phase, directed qualitative content analysis was used to extract the factors, challenges, and drivers influencing the development of smart agricultural water management technologies. In the second phase, futures-studies techniques, namely, cross-impact structural analysis and scenario planning, were applied to examine the relationships among the identified factors and construct plausible future scenarios.

Participants were purposively selected to represent 3 principal groups: expert farmers, specialists and managers of implementing companies, and designers and implementers of water-related technology projects. In total, 50 experts took part and because several participants were interviewed more than once to complete the data, 74 in-depth interviews totaling 1,820 minutes were conducted, continuing until theoretical saturation was

reached. Data were analyzed in MAXQDA through open, axial, and selective coding, yielding 24 variables organized under 9 core themes. These 24 variables were then entered into a cross-impact matrix and processed with MICMAC software to generate influence–dependence maps of the variables. In the final stage, based on 6 principal drivers—namely, artificial intelligence, energy and water costs, drought and climate change, water resources, supportive regulations, and knowledge-based companies—each defined by optimistic, probable, and pessimistic states, Scenario Wizard software was used to construct and analyze 13 internally consistent future scenarios. The trustworthiness of the findings was supported through member checking, independent coding by two researchers, and an assessment of the internal consistency of the resulting scenarios. Analysis of direct and indirect effects showed that governance and energy and water costs respectively ranked first and second in overall influence, while awareness-raising and organization of exhibitions and farm visits ranked highest in dependence. The influence-dependence map placed energy and water costs, drought and climate change, surface and groundwater constraints, supportive regulations, and knowledge-based companies in the high-influence, low-dependence zone, identifying them as the principal strategic drivers of the system. Artificial intelligence, by contrast, currently showed limited direct influence and dependence, but analysis of potential effects suggested that it carried substantial long-term capacity to drive change once infrastructural and institutional conditions matured.

Research Findings

The coding process yielded 9 core themes—social-cultural, technological, economic, environmental, policy, planning, managerial, infrastructural, and educational-research factors—which together encompassed 24 key criteria. The direct relation matrix built from these criteria had a filling degree of 90.1% and contained 519 non-zero relationships, indicating substantial interconnection among the factors. Analysis of direct and indirect effects showed that governance and energy and water costs respectively ranked first and second in overall influence, while awareness-raising and organization of exhibitions and farm visits ranked highest in dependence. The influence–dependence map placed energy and water costs, drought and climate change, surface and groundwater constraints, supportive regulations, and knowledge-based companies in the high-influence, low-dependence zone, identifying them as the principal strategic drivers of the system. Artificial intelligence, by contrast, currently showed limited direct influence and dependence, but analysis of potential effects suggested that it carried substantial long-term capacity to drive change once infrastructural and institutional conditions matured.

At the scenario level, of 18 possible driver states, 14 appeared across the internally consistent scenarios, corresponding to a presence ratio of 77.8%, from which 13 distinct scenarios were derived. Frequency analysis of the six key drivers showed that artificial intelligence appeared in a pessimistic state in more than 92% of scenarios, reflecting persistent barriers of underinvestment, weak infrastructure, and structural resistance; energy and water costs were concentrated in the probable state in about 69% of scenarios, implying a gradual rather than abrupt rise in costs; drought and climate change leaned pessimistic in roughly 46% of cases, signaling a serious ongoing threat; water resource constraints leaned optimistic in about 77% of cases, suggesting that sound management could partially restore surface and groundwater reserves; supportive regulations were pessimistic in over 92% of scenarios, pointing to weak policy implementation as a key barrier; and knowledge-based companies appeared optimistic in about 61% of scenarios, underscoring their promise as innovation agents. Among the resulting pathways, the scenario of "Cost-Pressure and Inefficient-Policy" emerged as the most probable future, while the scenario of "Moderate Drought with Limited Support" represented the most likely near-term transition pathway, given the region's current semi-modern technology level and farmers' moderate financial capacity.

Discussion of Results & Conclusion

The structural analysis confirmed that water governance and energy and water costs functioned as the pivotal strategic drivers of the system, occupying a position of high influence and low dependence that gave them the capacity to generate widespread systemic change—a finding consistent with prior research on the driving role of economic policy and resource constraints and with international assessments emphasizing smart water

governance as a precondition for digital agriculture. Although artificial intelligence currently exerted limited direct influence, its substantial potential effect indicated that it might become an increasingly important driver as adoption barriers were addressed.

In the scenario-planning phase, 5 pathways—cost pressure with inefficient policy, moderate drought with limited support, cost crisis under unstable climate, persistent drought with high costs, and institutional and energy constraints—were identified as the most plausible futures. The scenario of "Cost-Pressure and Inefficient-Policy" stood out as the most probable outcome, while the pathway of "Moderate Drought with Limited Support" offered the most realistic near-term transition since semi-centralized smart irrigation based on low-cost sensors and localized Internet-of-Things infrastructure could achieve water savings of up to 40% without requiring large-scale investment. This is broadly consistent with prior international evidence; yet a distinguishing feature of the Iranian context is that institutional, economic, and policy constraints exert a stronger influence on the future of water management than the underlying technology itself.

Overall, the future of agricultural water management in Kermanshah and in comparable arid and semi-arid regions depends less on isolated irrigation equipment than on a successful transition to digital agriculture, expansion of Internet-of-Things and artificial-intelligence-based systems, and establishment of smart water governance. Future strategy should therefore move beyond a narrow focus on irrigation hardware toward building an integrated, climate-smart digital agriculture ecosystem grounded in data and stakeholder participation. Achieving this transition requires reforming water governance structures, creating economic incentives, developing data infrastructure, supporting knowledge-based companies, and improving farmers' access to financial resources so that the success of smart irrigation technologies ultimately rests on the quality of governance and the depth of digital agricultural integration rather than on equipment development alone.

جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی
سال ۳۷، پیاپی ۱۰۳، شماره ۳، ۱۴۰۵، ص ۴۶- ۱
وصول: ۱۴۰۵/۵/۶ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۳۱

مقاله پژوهشی

تدوین سناریوهای آینده توسعه فناوری‌های هوشمند آبیاری و مدیریت آب کشاورزی در استان کرمانشاه

آمنه عبدی، دانشجوی دکتری گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
amane.abdi@gmail.com
علی‌اصغر میرک‌زاده *، دانشیار گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
Mirakzadeh@Razi.ac.ir
فرزاد اسکندری، استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
f.eskandari@uok.ac.ir

چکیده

بحران آب و تشدید خشکسالی، ضرورت گذار از مدیریت سنتی منابع آب به سوی بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند در بخش کشاورزی را در استان کرمانشاه افزایش داده است. پژوهش حاضر با هدف شناسایی پیشران‌های کلیدی و تدوین سناریوهای آینده توسعه فناوری‌های هوشمند آبیاری و مدیریت آب کشاورزی در استان کرمانشاه انجام شد. نوآوری پژوهش حاضر در تلفیق تحلیل کیفی خبرگان، تحلیل ساختاری MICMAC و سناریونگاری برای تبیین آینده توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی در یک چارچوب اجتماعی – فناورانه است. داده‌های پژوهش از طریق ۷۴ مصاحبه عمیق با ۵۰ نفر از خبرگان شامل کشاورزان خبره، کارشناسان و مدیران شرکت‌های مجری، متخصصان طراحی و اجرای پروژه‌های مرتبط با فناوری‌های آب گردآوری و با استفاده از تحلیل محتوای متعارف/قراردادی تحلیل شد. براساس یافته‌های کیفی، ۲۴ معیار مؤثر بر آینده فناوری‌های هوشمند آب شناسایی و سپس با استفاده از تحلیل ساختاری MICMAC، میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری متقابل آنها بررسی شد. نتایج نشان داد که در میان عوامل شناسایی‌شده، حکمرانی و قوانین حمایتی، هزینه انرژی و آب، وضعیت منابع آبی، خشکسالی و تغییرات اقلیمی، توسعه هوش مصنوعی و نقش شرکت‌های دانش‌بنیان مهم‌ترین پیشران‌های شکل‌دهنده آینده این حوزه هستند. انتخاب این شش پیشران بر مبنای جایگاه آنها در ساختار اثرات متقابل و اهمیت آنها در شکل‌دهی به وضعیت‌های آینده انجام گرفت. در مرحله سناریونویسی، برای هر یک از پیشران‌های کلیدی، وضعیت‌های آینده تعریف و ترکیبات سازگار آنها با استفاده از نرم‌افزار Scenario Wizard ارزیابی شد که در نهایت به شناسایی ۱۳ سناریوی سازگار منجر شد. در میان سناریوهای به‌دست‌آمده، سناریوی «فشار هزینه و سیاست‌های ناکارآمد» از بالاترین احتمال وقوع برخوردار بود؛ سناریویی که در آن افزایش هزینه آب و انرژی، ضعف حمایت‌های سیاستی و محدودیت منابع، مانع گسترش مؤثر فناوری‌های هوشمند می‌شود. در مقابل، نتایج نشان داد که توسعه هوش مصنوعی و شرکت‌های دانش‌بنیان، در صورت همراهی با اصلاح حکمرانی آب، سیاست‌های حمایتی و مدیریت پایدار منابع، می‌تواند زمینه‌ساز گذار به مدیریت هوشمند و کارآمد آب کشاورزی شود. بر این اساس، آینده فناوری‌های هوشمند آبیاری در استان کرمانشاه صرفاً تابع پیشرفت فناوری نیست، بلکه به میزان هماهنگی میان فناوری، حکمرانی، اقتصاد آب و انرژی و شرایط اقلیمی وابسته است.

واژه‌های کلیدی: آینده‌پژوهی، فناوری‌های هوشمند آبیاری، مدیریت آب کشاورزی، سناریونگاری، حکمرانی آب، هوش مصنوعی

---

*نویسنده مسئول

عبدی، آمنه، میرک‌زاده،علی‌اصغر و اسکندری، فرزاد . (۱۴۰۵). تدوین سناریوهای آینده توسعه فناوری‌های هوشمند آبیاری و مدیریت آب کشاورزی در استان کرمانشاه، *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۷ (۳)، ۴۶- ۱ .

2252-0910 © University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0).

10.22108/gep.2026.149841.1808

مقدمه

آب به‌عنوان مهم‌ترین نهاده تولید در بخش کشاورزی، نقش اساسی در امنیت غذایی، توسعه پایدار و پایداری زیست‌محیطی ایفا می‌کند. افزایش جمعیت، رشد تقاضا برای مواد غذایی، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و همچنین تغییرات اقلیمی، فشار بی‌سابقه‌ای بر منابع آب وارد کرده است؛ به‌گونه‌ای که در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، تقاضا از ظرفیت عرضه منابع آبی فراتر رفته و بحران آب به یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر تبدیل شده است (Rosa et al., 2020, p. 29531; Mekonnen & Hoekstra, 2016, P. 2). از سویی برآوردها نشان می‌دهد تا سال ۲۰۵۰ تقاضای جهانی برای غذا حدود ۵۰ درصد و تقاضا برای آب بیش از ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت (UN Water, 2024).

در کنار تشدید بحران جهانی آب، کشاورزی دیجیتال با بهره‌گیری از فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی (AI) ، کلان‌داده‌ها، حسگرهای هوشمند، سامانه‌های پشتیبان تصمیم و تحلیل داده‌های مکانی، امکان پایش لحظه‌ای منابع آب، پیش‌بینی نیاز آبی گیاهان و بهینه‌سازی مصرف آب را فراهم ساخته است. این فناوری‌ها نقش مهمی در افزایش بهره‌وری آب، سازگاری با تغییرات اقلیمی و ارتقای تاب‌آوری بخش کشاورزی ایفا می‌کنند (Shahab et al., 2024, p. 2; Javaid et al., 2023, p. 204; FAO, 2024, p. 82).

امروزه رویکرد مدیریت آب کشاورزی از توسعه صرف فناوری‌های آبیاری به سمت فناوری‌های هوشمند مدیریت آب حرکت کرده است. سامانه‌های هوشمند مبتنی بر حسگرهای اینترنت اشیا، تحلیل داده‌های محیطی، تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های هوش مصنوعی قادرند نیاز آبی گیاهان را به‌صورت لحظه‌ای برآورد کرده و زمان و مقدار بهینه آبیاری را تعیین کنند. مطالعات نشان می‌دهد این سامانه‌ها ضمن کاهش مصرف آب، موجب افزایش بهره‌وری تولید و ارتقای تاب‌آوری کشاورزی در برابر تنش‌های اقلیمی می‌شوند (Vallejo-Gomez et al., 2023, p. 3; Nosh et al., 2024, p. 3; Wei et al., 2024, p. 189)؛ از این‌رو، فناوری‌های هوشمند مدیریت آب به‌عنوان یکی از ارکان اصلی سازگاری با تغییرات اقلیمی در بخش کشاورزی شناخته می‌شوند.

اگرچه طی سال‌های اخیر سرمایه‌گذاری‌هایی در توسعه شبکه‌های آبیاری و فناوری‌های مرتبط صورت گرفته است، فرسودگی شبکه‌های انتقال، تلفات بالا، ضعف در مدیریت فناوری و نبود نگاه بلندمدت موجب شده است که مسئله بهره‌وری آب همچنان پابرجا بماند (Mokari Ghahroodi et al., 2015, p. 191). افزون بر این، اغلب مطالعات انجام‌شده بر جنبه‌های فنی یا مدیریتی بحران آب تمرکز داشته‌اند و کمتر به آینده توسعه فناوری‌های آب‌محور و عدم قطعیت‌های پیش‌رو پرداخته‌اند.

با وجود گسترش مطالعات مرتبط با مدیریت منابع آب و سامانه‌های آبیاری، بخش عمده پژوهش‌های موجود بر ابعاد فنی، اقتصادی یا مدیریتی فناوری‌ها متمرکز بوده‌اند و کمتر به آینده توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی در بستر عدم‌قطعیت‌های اقلیمی، فناورانه و نهادی پرداخته‌اند. علاوه بر این، موفقیت این فناوری‌ها صرفاً به زیرساخت‌های فنی وابسته نیست، بلکه به کیفیت حکمرانی آب، سیاست‌های حمایتی، دسترسی به داده و میزان پذیرش فناوری توسط بهره‌برداران نیز بستگی دارد. در استان کرمانشاه، با توجه به وابستگی بالای اقتصاد منطقه به

کشاورزی و افزایش مخاطرات ناشی از تغییر اقلیم، شناخت پیشران‌ها، عدم‌قطعیت‌ها و سناریوهای آینده توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این منظر، آینده‌پژوهی می‌تواند با تحلیل روندهای نوظهور در حوزه هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، کشاورزی دیجیتال و حکمرانی آب، زمینه تدوین راهبردهای انعطاف‌پذیر و آینده‌نگر را فراهم سازد.

از منظر نظری، آینده فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی تنها محصول توسعه فناوری‌های آبیاری نیست، بلکه حاصل تعامل پویا میان سه نظام به‌هم‌پیوسته شامل حکمرانی آب، فناوری‌های دیجیتال و تغییر اقلیم است. در مناطق کم‌آب، تغییرات اقلیمی با تشدید خشکسالی و افزایش عدم‌قطعیت منابع آب، نیاز به تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را افزایش می‌دهد؛ در مقابل، فناوری‌های دیجیتال نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و سامانه‌های پشتیبان تصمیم، امکان پایش لحظه‌ای، پیش‌بینی و مدیریت هوشمند منابع آب را فراهم می‌کنند؛ با این حال، اثربخشی این فناوری‌ها به کیفیت حکمرانی آب، ظرفیت نهادی، اشتراک‌گذاری داده‌ها و هماهنگی میان ذی‌نفعان وابسته است بنابراین آینده کشاورزی هوشمند در مناطق کم‌آب را باید حاصل برهم‌کنش «حکمرانی هوشمند آب»، «کشاورزی دیجیتال» و «سازگاری اقلیمی» دانست (Argente Garcia et al., 2024, p.2; Abdelrahman, 2026, p. 4; Dai et al., 2025, p. 3).

نوآوری نظری پژوهش حاضر در آن است که برخلاف مطالعات پیشین که هر یک به‌صورت مجزا بر بحران آب، فناوری‌های آبیاری یا پیامدهای تغییر اقلیم تمرکز داشته‌اند، این پژوهش آینده توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی را در قالب یک سیستم اجتماعی ـ فناورانه تحلیل می‌کند. در این چارچوب، حکمرانی آب، فناوری‌های دیجیتال و تغییر اقلیم به‌عنوان سه پیشران اصلی و درهم‌تنیده آینده کشاورزی هوشمند در مناطق کم‌آب در نظر گرفته شده‌اند.

بنابراین، در شرایطی که سرعت تحولات فناوری، تغییرات اقلیمی و نوسانات اقتصادی و اجتماعی رو به افزایش است، برنامه‌ریزی مبتنی بر روندهای گذشته دیگر پاسخگوی نیازهای آینده نخواهد بود. آینده‌پژوهی با شناسایی پیشران‌های کلیدی، تحلیل عدم قطعیت‌ها و تدوین سناریوهای محتمل، امکان طراحی راهبردهای انعطاف‌پذیر و آینده‌نگر را فراهم می‌کند (Munguia et al., 2023, p. 249). این رویکرد به مدیران و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا شکاف میان وضعیت موجود و آینده مطلوب را شناسایی کرده و تصمیمات مؤثرتری اتخاذ نمایند.

مبانی نظری و پیشینهٔ پژوهش

در دهه‌های اخیر، پیچیدگی مسائل محیطی، اقتصادی و اجتماعی، کارایی رویکردهای سنتی برنامه‌ریزی را کاهش داده است. در این زمینه، آینده‌پژوهی به‌عنوان دانشی نظام‌مند برای تحلیل آینده‌های ممکن، محتمل و مطلوب مطرح شده و هدف آن کمک به تصمیم‌گیران برای درک تغییرات پیش‌رو و آمادگی در برابر تحولات احتمالی است (Miller, 2018, p. 66). سناریونگاری، یکی از مهم‌ترین روش‌های آینده‌پژوهی، روایت‌هایی منطقی از آینده‌های جایگزین ارائه می‌دهد و به سیاست‌گذاران امکان می‌دهد پیامدهای تصمیمات کنونی را ارزیابی کرده و راهبردهای انعطاف‌پذیرتری تدوین کنند (Amer et al., 2013, p. 29; OECD, 2025, p. 51). در کشاورزی، این روش برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم،

امنیت غذایی و پذیرش فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاربرد گسترده‌ای یافته است (Parra-López et al., 2025, p. 2; FAO, 2024, p. 25).

آب یکی از مهم‌ترین نهاده‌های کشاورزی است و بیش از ۷۰٪ برداشت آب شیرین جهان در این بخش مصرف می‌شود (FAO, 2024, p. 25). ارتقای بهره‌وری مصرف آب با توسعه سامانه‌های آبیاری، از روش‌های سنتی تا فناوری‌های پیشرفته مانند آبیاری قطره‌ای، زیرسطحی و بارانی هوشمند، محقق می‌شود (Bounajra et al., 2024, p. 3; Pereira et al., 2020, p. 3). سامانه‌های هوشمند مبتنی بر داده و حسگرها، میزان و زمان آبیاری را بهینه می‌کنند و می‌توانند بین ۲۰ تا ۵۰٪ صرفه‌جویی آب ایجاد کنند و عملکرد محصول را افزایش دهند (Antu et al., 2024, p. 7; Lakhiar., et al., 2024, p. 6).

کشاورزی هوشمند از تلفیق فناوری‌های دیجیتال با فعالیت‌های کشاورزی برای افزایش بهره‌وری، پایداری و تاب‌آوری سیستم‌ها شکل گرفته است. در این رویکرد، داده‌های خاک، آب، گیاه و محیط به‌صورت پیوسته جمع‌آوری و تحلیل می‌شوند و تصمیمات مدیریتی براساس اطلاعات دقیق اتخاذ می‌شوند (Pereira et al., 2020, p. 3; Antu et al., 2024, p. 7). مدیریت منابع آب، از مهم‌ترین کاربردهای کشاورزی هوشمند است و با استفاده از حسگرها، تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، نیاز آبی گیاه تعیین و آبیاری بهینه می‌شود (Antu et al., 2024, p. 5; Bounajra et al., 2024, p. 5). این رویکرد ظرفیت سازگاری کشاورزی با شرایط نامطمئن آینده مانند تغییر اقلیم و محدودیت منابع را افزایش می‌دهد (IPCC, 2023, p. 8; FAO, 2024, p. 25).

به‌طور کل، آینده‌پژوهی، سامانه‌های آبیاری و کشاورزی هوشمند سه حوزه مکمل هستند. آینده‌پژوهی روندها و پیشران‌های مؤثر بر توسعه فناوری‌های آب‌محور را شناسایی می‌کند (Amer et al., 2013, p. 29). سامانه‌های آبیاری، بستر اجرایی مدیریت آب در مزرعه و کشاورزی هوشمند با فناوری‌های دیجیتال، زمینه ارتقای عملکرد این سامانه‌ها را فراهم می‌آورد (Durance & Godet., 2010, p. 1489). تدوین سناریوهای توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی آب‌محور نیازمند تحلیل هم‌زمان عوامل فناورانه، محیطی، اقتصادی، اجتماعی و سیاستی است (OECD, 2025, p. 51).

ادبیات جدید مدیریت منابع آب نشان می‌دهد که گذار از مدیریت سنتی آب به حکمرانی هوشمند آب، مهم‌ترین پیش‌نیاز توسعه کشاورزی هوشمند است. در این رویکرد، فناوری‌های دیجیتال شامل اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، سنجش از دور و تحلیل کلان‌داده‌ها، زیرساخت اطلاعاتی لازم برای تصمیم‌گیری را فراهم می‌کنند. هم‌زمان، تغییر اقلیم به‌عنوان مهم‌ترین منبع عدم‌قطعیت، الگوهای بارش، نیاز آبی محصولات و دسترسی به منابع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ درنتیجه، حکمرانی آب نقش تنظیم‌کننده و هماهنگ‌کننده میان فناوری و محیط را ایفا کرده و مسیر توسعه کشاورزی هوشمند را تعیین می‌کند (Abdelrahman, 2026, p. 4; Dai et al., 2025, p. 3).

بنابراین، می‌توان گفت آینده مدیریت منابع آب کشاورزی تحت تأثیر تعامل عوامل فناورانه، محیطی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی است (FAO, 2024, p. 51). توسعه این فناوری‌ها نتیجه تعامل میان سیاست‌های آب، ظرفیت‌های سرمایه‌گذاری، پذیرش اجتماعی فناوری، تغییرات اقلیمی و نوآوری‌های دیجیتال است (Wei et al., 2024, p. 189; Bounajra et al., 2024, p. 3). فناوری‌های نوظهور مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و سامانه‌های پشتیبان تصمیم،

توانمندساز توسعه سامانه‌های آبیاری هستند؛ درحالی‌که محدودیت منابع مالی، ضعف زیرساخت‌ها و مقاومت بهره‌برداران از موانع مهم محسوب می‌شوند (Abiadi et al., 2024, p. 5; Wanyama et al., 2024, p. 3). بنابراین، آینده فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی از تعامل پیشران‌های کلیدی و عدم‌قطعیت‌های راهبردی شکل می‌گیرد و سناریوهای مختلف پیامدهای متفاوتی برای بهره‌وری آب و پایداری کشاورزی دارند.

در این بخش چارچوب نظری پژوهش به‌صورت صریح بر مبنای الگوی Social, Technological, Economic, Environmental, Political (STEEP) که یکی از متداول‌ترین ابزارهای شناسایی پیشران‌ها در مطالعات آینده‌پژوهی و سناریونگاری است (OECD, 2025, p. 53; Amer et al., 2013, p. 29) بازتعریف می‌شود. بعد فناورانه (Technological) بر ادبیات پذیرش و کاربست فناوری‌های دیجیتال در کشاورزی هوشمند استوار است و توسعه اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و سامانه‌های هوشمند آبیاری را در بر می‌گیرد (Javaid et al., 2023, p. 204). بعد اقتصادی (Economic) ریشه در مطالعات کمبود آب و اقتصاد آب دارد که بر هزینه انرژی و آب، سرمایه‌گذاری، یارانه‌ها و بازگشت سرمایه به‌عنوان محرک‌های اقتصادی پذیرش فناوری تأکید می‌کنند (Zhang et al., 2024, p. 3; Mekonnen & Hoekstra, 2016, p. 2). بعد زیست‌محیطی (Environmental) از ادبیات تغییر اقلیم و کمیابی منابع آب برگرفته شده است و خشکسالی، محدودیت منابع آبی و لزوم بومی‌سازی فناوری با شرایط اقلیمی را پوشش می‌دهد (Rosa et al.,2020, p. 29532; IPCC, 2023, p. 8). بعد اجتماعی (Social) بر پایه مطالعات پذیرش فناوری و رفتار بهره‌برداران شکل گرفته است و نگرش، باورها و توانمندسازی کشاورزان را دربرمی‌گیرد (Antu et al., 2024, p. 7; Bjornlund & Bjornlund, 2019, p. 456). سرانجام، بعد سیاسی/نهادی (Political) از ادبیات حکمرانی آب مشتق شده است که بر نقش قوانین، سیاست‌های حمایتی و شبکه‌های نهادی در جهت‌دهی به مسیر توسعه فناوری تأکید دارد (OECD, 2025, p. 54; Pahl-Wostl & Christian, 2023, p. 157).

با استناد به این چارچوب (STEEP)، از میان ۲٤ معیار استخراج‌شده از تحلیل محتوای کیفی (جدول ۳)، ۱٤ معیار به‌طور مستقیم در پنج بعد اصلی STEEP جای می‌گیرند: بعد اجتماعی – فرهنگی شامل توانمندسازی کشاورزان (C۱) و نگرش و باورهای کشاورزان (C۲)؛ بعد فناورانه شامل اینترنت اشیا (C۳)، هوش مصنوعی (C٤) و هوشمندسازی سامانه‌ها (C٥)؛ بعد اقتصادی شامل هزینه انرژی و آب (C٦)، سرمایه‌گذاری و یارانه‌ها (C۷) و سودآوری و بازگشت سرمایه (C۸)؛ بعد زیست‌محیطی شامل خشکسالی و تغییر اقلیم (C۹)، محدودیت منابع سطحی و زیرزمینی (C۱۰) و بومی‌سازی/سازگارسازی (C۱۱)؛ و بعد سیاسی/نهادی شامل قوانین و سیاست‌های حمایتی (C۱۲)، حکمرانی (C۱۳) و شبکه‌ها و انجمن‌های حمایتی (C۱٤).

در مقابل، ۱۰ معیار باقی‌مانده ذیل چهار مقوله برنامه‌ریزی (چشم‌انداز C۱٥، نیازسنجی C۱٦)، مدیریتی (سازگارسازی دانش نوین با دانش بومی C۱۷، راه‌اندازی دوره‌های آموزشی C۱۸)، زیرساختی (تشکیل شرکت‌های دانش‌بنیان C۱۹، بهبود شبکه‌ها و مشارکت کشاورزان C۲۰، یکپارچه‌سازی اراضی C۲۱) و آموزشی – پژوهشی (آموزش دانش و مهارت فنی تخصصی C۲۲، آگاه‌سازی C۲۳، برگزاری نمایشگاه‌ها و بازدید مزارع C۲٤) قرار گرفتند. این چهار مقوله، برخلاف پنج بعد نخست، به‌صورت قیاسی از ادبیات پیشین استخراج نشدند، بلکه به‌شیوه استقرایی و از دل

کدگذاری محوری و انتخابی مصاحبه‌های میدانی (۷۴ مصاحبه با ۵۰ خبره) پدیدار شدند؛ با این حال، این ابعاد نیز مبنای نظری مستقلی در ادبیات ظرفیت‌سازی نهادی و حکمرانی آب دارند: مطالعات حکمرانی چندسطحی آب بر ضرورت هماهنگی برنامه‌ریزی راهبردی، ظرفیت‌سازی مدیریتی و توسعه زیرساخت نهادی به‌عنوان پیش‌نیازهای گذار موفق به فناوری‌های هوشمند تأکید می‌کنند (Pahl-Wostl & Christian, 2023, p. 157)، همچنین نقش شرکت‌های دانش‌بنیان و نوآوری در مسیرهای سیاستی توسعه پایدار آب مورد تأکید قرار گرفته است (Dai et al., 2025, p. 7)؛ بنابراین، این چهار بعد افزوده را می‌توان بسط زمینه‌محور (context-specific extension) چارچوب STEEP در بستر کشاورزی آب‌محور استان کرمانشاه دانست که اعتبار تجربی آن از طریق اجماع خبرگان و همگرایی داده‌های کیفی تأیید شده است.

اگرچه پژوهش حاضر در بستر استان کرمانشاه انجام شده است، چالش‌های مورد مطالعه محدود به این منطقه نیست. بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان در خاورمیانه، شمال آفریقا و آسیای مرکزی با مسائل مشابهی از جمله تنش آبی، تغییر اقلیم، محدودیت ظرفیت حکمرانی و نیاز به گذار دیجیتال در کشاورزی مواجه هستند؛ ازاین‌رو، نتایج پژوهش می‌تواند به توسعه ادبیات بین‌المللی مربوط به کشاورزی هوشمند، حکمرانی آب و سازگاری اقلیمی در مناطق کم‌آب کمک کند (Parra-Lopes et al., 2025, p. 4; AbdelRahman, 2026, p. 5).

بررسی پیشینهٔ پژوهش بحران آب در ایران نیز نشان می‌دهد عمدهٔ پژوهش‌ها در رشته‌های فنی – مهندسی و علوم طبیعی انجام شده است. از سوی دیگر، به نظر می‌رسد در حوزهٔ علوم اجتماعی و علوم سیاسی در ایران خلأ پژوهشی جدی در بررسی علوم اجتماعی و سیاسی و ارتباط آن با محیط زیست در حوزهٔ آب وجود دارد، شاید بتوان گفت از دلایل ایجاد این مسائل عدم توجه به آینده پژوهی است. در واقع، بررسی مقالات نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌ها بر طراحی سامانه‌های آبیاری هوشمند، الگوریتم‌های AI، شبکه‌های IoT، و بهره‌وری آب تمرکز کرده‌اند؛ اما مطالعات کمی به آینده‌پژوهی راهبردی (Strategic Foresight)، سناریونویسی فناوری، تحلیل عدم‌قطعیت‌ها و نقشه راه فناوری برای این فناوری‌ها پرداخته‌اند.

تاکنون پژوهشی این مسائل را در کنار هم بررسی نکرده است. در ادامه سعی شده است تا حد مقدور پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با هر بخش از پژوهش آورده شود:

خان و همکاران در پژوهشی با هدف چشم‌انداز فناوری‌های آینده و نقش آن در توسعه پایدار با رویکرد آینده پژوهشی در نتایج خود نشان دادند که نقش کلیدی فناوری‌های پیشرفته، به‌ویژه اینترنت اشیا را برای پیشبرد کشاورزی و برای برآورده‌کردن انتظارات آینده ضروری است. علاوه بر این، فناوری‌های پیشرفته دیگری مانند پهپاد، حسگرهای زمینی و راه دور، فناوری‌های ارتباطی و محاسبات ابری برای کشاورزی پایدار مورد نیاز هستند؛ با این حال، اجرای این فناوری‌های پیشرفته و نوآورانه، مانند اینترنت اشیا، واقعاً اختیاری نیستند؛ اما آنچه مسلم است با اتخاذ این فناوری‌های پیشرفته، کشاورزان منابع و شیوه‌های کشاورزی خود را بهبود خواهند بخشید. از طرفی توسعه چنین فناوری‌های پیشرفته‌ای مسیر کشاورزی پایدار را هموار می‌کند (Khan et al., 2021, P. 1-31). اینگراو و همکاران در پژوهشی با عنوان کمبود آب در کشاورزی: مروری بر علل، اثرات و رویکردهای کاهش خطرات، به این نتایج دست یافتند که بهبود فن‌آوری‌ها و شیوه‌های آبیاری به‌عنوان یک راه مهم برای کاهش کمبود آب شناسایی شد (Ingrao et al., 2023, P. 1-16).

باتیشا در پژوهشی با هدف فرایند اسکن افق (HSP)[1] و آینده‌نگاری مسائل نوظهور در زمینه آب در حوزه عربستان در نتایج خود عنوان می‌کنند که حفاظت از آب (WC)[2]، آب چرخه‌ای (CW)[3] و فن‌آوری‌های آب در حال ظهور (EWTs)[4] نتایج اصلی فرآیند «اسکن افق» (HSP) بودند. همچنین دیگر نتایج نشان داد آماده‌سازی برای آینده آب پایدار (SWF)[5] باید از همین امروز شروع شود و فرصت‌های استفاده از آب، از عمیق‌ترین قطره آب تا سطحی‌ترین قطره آب روی زمین در حال تغییر است (Batisha, 2022, p. 3).

سیواگروناتان و همکاران در پژوهش با هدف بررسی سناریوهای آینده مدیریت آب در نتایج خود عنوان می‌کنند که برای نوشتن یک سناریوهای مناسب با بحران آب در آینده لازم است که: (۱) شفافیت در فرآیندهای توسعه و تجزیه و تحلیل سناریو، (۲) گنجاندن غافلگیری‌ها و رویدادهای شدید، (۳) تلاش برای اعتبارسنجی و در نظر گرفتن مرحله تأثیر یک سناریو در فرآیند انجام (Sivagurunathan et al., 2022, p. 211).

فال ووستل در پژوهشی با هدف لزوم کاربست سیاست‌گذاری آینده پژوهانه علم و فناوری در حوزه آب کشور در نتایج خود نشان می‌دهد که فناوری‌های حوزه آب، گسترش رشته‌های بین رشته‌ای و اقتصاد نوآوری در حوزه آب با حرکت متوازن و هماهنگ در کنار هم می‌توانند پایداری را برای کل سیستم آبی کشور به ارمغان آورند. همچنین آموزش نیروی انسانی کارآمدی و افزایش آگاهی عمومی جامعه درباره محیط‌زیست و آب می‌تواند سبب پایداری سیستم آبی کشور شود (Pahl-Wostl & Christian, 2023, p. 157).

در سطح ملی نیز پژوهش‌هایی با رویکرد آینده‌پژوهی و تحلیل ساختاری در حوزه منابع آب و مدیریت راهبردی نواحی روستایی انجام شده است. افشاری‌پور و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از روش تحلیل ساختاری و نرم‌افزار MICMAC، شاخص‌های اثرگذار در سیاست‌گذاری برای مدیریت نواحی روستایی استان کرمان را شناسایی کردند و نشان دادند متغیرهای محیط، اقتصاد و مشارکت مردمی نقش راهبردی در تصمیمات آینده این مناطق دارند؛ رویکردی که در پژوهش حاضر نیز برای تحلیل پیشران‌های کلیدی توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی به‌کار گرفته شده است. در پژوهشی دیگر گل‌کرمی و کاویانی‌راد (۱۳۹۶)، بررسی تأثیر محدودیت منابع آب بر تنش‌های هیدروپلیتیک حوضه آبریز زاینده‌رود نشان داد رشد جمعیت، توسعه ناهمگون کشاورزی و پراکنش نامناسب بارش از عوامل اصلی تشدید بحران آب در مناطق کم‌آب ایران هستند که بر ضرورت نگاه آینده‌نگر به مدیریت منابع آب تأکید دارد. همچنین کریم‌زاده مطلق و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی با رویکرد شبیه‌سازی سناریوهای آینده با مدل CA-Markov در حوضه زاینده‌رود، پیش‌بینی شد اراضی کشاورزی طی سال‌های آینده به‌طور محسوسی کاهش خواهد یافت که ضرورت برنامه‌ریزی راهبردی و فناورانه برای مدیریت آب کشاورزی را دوچندان می‌کند.

جمع‌بندی منابع بررسی‌شده نشان می‌دهد با وجود دشواری پیش‌بینی دقیق آینده، منابع آب شیرین به‌دلیل رشد جمعیت جهانی قطعاً کاهش خواهد یافت و مناطق کم‌آب موجود با چالش‌های شدیدتری روبه‌رو خواهند شد؛ بنابراین

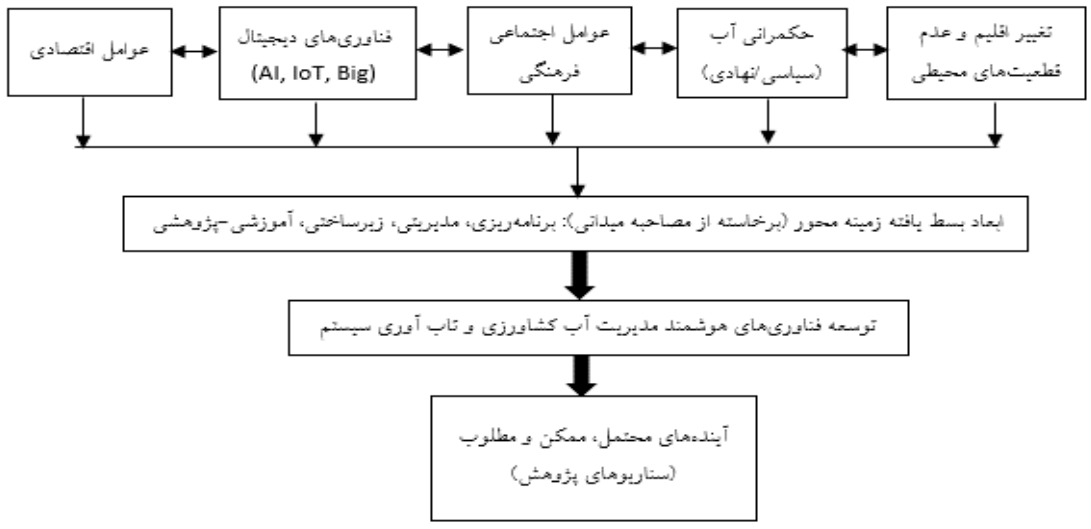
---

1. Horizon scanning process
2. Water conservation
3. Circular Water
4. Emerging Water Technologies
5. sustainable water future

بدون مدیریت اصولی، بحران آب در آینده‌ای نزدیک تشدید می‌شود. از طرفی، با وجود پژوهش‌های گسترده درباره کمبود آب، آبیاری هوشمند و پایداری کشاورزی، تعامل میان فناوری‌های دیجیتال نوظهور، حکمرانی آب و عدم‌قطعیت اقلیمی کمتر بررسی شده است؛ بیشتر مطالعات بر بهره‌وری فنی یا سیاست‌گذاری به‌طور جداگانه تمرکز داشته‌اند، نه رویکردی آینده‌نگرانه و یکپارچه.

مطالعات آینده‌پژوهی منابع آب معمولاً از روش‌هایی چون سناریوسازی، مدل‌سازی و مشارکت ذی‌نفعان استفاده می‌کنند و نشان می‌دهند تقاضای آب افزایش و تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب تشدید خواهد شد؛ توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب راهکاری کلیدی برای مقابله با این چالش‌هاست.

بر این اساس، آینده توسعه این فناوری‌ها براساس ابعاد پنج‌گلنه فناورلنه، اجتماعی – فرهنگی، اقتصادی، زیست‌محیطی و نهادی/سیاسی (STEEP) بازطراحی و تفصیل داده می‌شود. تمامی معیارهای پژوهش در یکی از پنج بعد نظری اصلی (فناورانه، اجتماعی–فرهنگی، اقتصادی، زیست‌محیطی، سیاسی/نهادی) یا در دیگر ابعاد بسط‌یافته زمینه‌محور (برنامه‌ریزی، مدیریتی، زیرساختی، آموزشی – پژوهشی) که از دل مصاحبه‌های میدانی پدیدار شده‌اند، جای گرفته‌اند. این ابعاد از طریق برهم‌کنش سیستمی که در تحلیل ساختاری MICMAC و سپس در سناریوسازی با نرم‌افزار Scenario Wizard بررسی و به توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی و در نهایت به ترسیم آینده‌های محتمل، ممکن و مطلوب منجر می‌شوند؛ به‌طوری‌که آینده‌پژوهی با شناسایی پیشران‌ها و عدم‌قطعیت‌ها، مسیرهای محتمل این تعامل را ترسیم می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱: ساختار مفهومی مدل

Figure 1: Conceptual Structure of the Model

در واقع مدل نشان می‌دهد که توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی یک فرایند صرفاً فناورانه نیست؛ بلکه نتیجه تعامل میان عوامل مذکور است و آینده‌پژوهی ابزار تحلیل این تعاملات و طراحی مسیرهای توسعه آینده به شمار می‌رود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش از نظر رویکرد، کیفی و از نظر هدف، کاربردی و آینده‌پژوهانه است. فلسفه حاکم بر پژوهش بر مبنای پارادایم تفسیری است؛ زیرا شناخت عوامل مؤثر بر توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی، مستلزم فهم عمیق تجربیات، ادراکات و قضاوت‌های خبرگان و ذی‌نفعان حوزه آب و کشاورزی است. از سوی دیگر، ماهیت آینده‌پژوهی اقتضا می‌کند که علاوه بر تبیین وضعیت موجود، روندهای مؤثر، عدم‌قطعیت‌ها و پیشران‌های کلیدی آینده نیز شناسایی شده و آینده‌های محتمل، ممکن و مطلوب ترسیم شوند؛ ازاین‌رو، آینده‌پژوهی در این پژوهش نه به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی قطعی آینده، بلکه به‌عنوان رویکردی نظام‌مند برای شناخت نیروهای پیشران، تحلیل روابط متقابل میان متغیرها و طراحی سناریوهای جایگزین برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری راهبردی در توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی به‌کار گرفته شد.

بر این اساس، فرایند پژوهش در دو مرحله اصلی انجام شد. در مرحله نخست، با بهره‌گیری از روش تحلیل محتوای کیفی با رویکرد متعارف/قراردادی، مهم‌ترین عوامل، چالش‌ها و پیشران‌های توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی استخراج شد. در مرحله دوم، با استفاده از روش‌های آینده‌پژوهی شامل تحلیل اثرات متقابل، شناسایی پیشران‌های کلیدی و سناریونگاری، ساختار روابط میان عوامل، بررسی و سناریوهای محتمل آینده تدوین شد. این ترکیب روش‌شناختی امکان عبور از توصیف صرف وضعیت موجود و حرکت به سمت تحلیل آینده‌های ممکن و ارائه راهبردهای توسعه را فراهم ساخت.

استان کرمانشاه به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی تولیدات کشاورزی در غرب ایران، نقشی اساسی در تأمین امنیت غذایی و توسعه پایدار کشور ایفا می‌کند. کشاورزی مهم‌ترین منبع اشتغال و درآمد استان محسوب می‌شود و ساختار اقتصادی و اجتماعی بخش عمده‌ای از جمعیت آن بر این فعالیت استوار است. براساس آمار سازمان جهاد کشاورزی استان کرمانشاه (۱۴۰۴)، مجموع اراضی کشاورزی استان حدود ۵۲۱/۴۸۷ هکتار است که از این میزان، ۱۰۵/۹۸۹ هکتار به‌صورت آبی (وابسته به منابع آب سطحی و زیرزمینی) و ۴۱۵/۴۹۸ هکتار به‌صورت دیم کشت می‌شود. غلبه کشت دیم در ساختار بهره‌برداری و ناپایداری بارش‌های سالانه، در کنار محدودیت منابع آبی، ضرورت برنامه‌ریزی جامع برای ارتقای راندمان مصرف آب در اراضی آبی را دو چندان ساخته است.

محصولات عمده کشاورزی استان شامل گندم، جو، ذرت، کلزا، گوجه‌فرنگی و سیب‌زمینی هستند که هر یک نیاز آبی و نظام آبیاری ویژه‌ای دارند. تنوع اقلیمی (از مناطق جلگه‌ای تا نواحی کوهستانی)، اقلیم نیمه‌خشک، و پراکندگی اراضی در مقیاس خرد سبب شده کارایی فناوری‌های آبیاری در نقاط مختلف استان متفاوت باشد. با وجود حاصل‌خیزی خاک و نیروی انسانی فعال در بخش کشاورزی، الگوی سنتی آبیاری هنوز در بخش درخور توجهی از زمین‌های آبی این استان رواج دارد. کارایی پایین این سیستم‌ها در مقایسه با فناوری‌های نوین همچون آبیاری بارانی، قطره‌ای و هوشمند منجر به اتلاف بخش عمده‌ای از منابع محدود آب از طریق تبخیر، نفوذ عمقی و رولناب‌های سطحی می‌شود؛ درنتیجه، انتخاب فناوری‌های مناسب و سازگار با ویژگی‌های بومی هر منطقه، به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در تحقق کشاورزی پایدار و مدیریت بهینه منابع آب اهمیت ویژه‌ای دارد (عبدی و میرک‌زاده، ۱۴۰۱، ص. ۲؛ Alharbi et al., 2024, p. 4).

از منظر هوشمندسازی و نوسازی سامانه‌های آبیاری، براساس آمار سازمان جهاد کشاورزی استان کرمانشاه در سال ۱۴۰۴، تاکنون حدود ۶۰ درصد از اراضی آبی به سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار مجهز شده‌اند؛ در حالی‌که توسعه فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند سنجش از راه دور، اینترنت اشیا و سامانه‌های هوشمند پایش رطوبت خاک همچنان در مراحل ابتدایی و پراکنده قرار دارد. این شکاف میان ظرفیت‌های تولیدی بالای استان و سطح نسبتاً پایین هوشمندسازی مدیریت آب کشاورزی، ضرورت انجام پژوهش‌هایی از این دست را در بستر استان کرمانشاه دوچندان می‌سازد.

جامعه مشارکت‌کنندگان پژوهش به‌صورت هدفمند و با استفاده از نمونه‌گیری هدفمند بارز انتخاب شد. این جامعه آماری از میان افرادی انتخاب شد که با حوزه‌های اینترنت اشیا (IoT)، سنجش از دور، هوش مصنوعی، شرکت‌های فناور و دانش‌بنیان فعال در زمینه آب، مدیریت دفتر توسعه سیستم‌های نوین آبیاری و بهره‌برداران نهایی فناوری‌های آبیاری هوشمند آشنایی و تجربه داشتند؛ زیرا این افراد به دلیل دانش و تجربه تخصصی خود در این حوزه‌ها، متخصص موضوع پژوهش محسوب می‌شدند و می‌توانستند دیدگاه‌های عمیق و مبتنی بر تجربه میدانی ارائه دهند. مشارکت‌کنندگان شامل متخصصان و صاحبان تجربه در حوزه مورد مطالعه بودند (شامل سه گروه اصلی: کشاورزان خبره، کارشناسان و مدیران شرکت‌های مجری، و طراح و مجری پروژه‌های فناوری‌های مرتبط با آب). معیار ورود به پژوهش شامل داشتن تخصص و سابقه فعالیت در حوزه فناوری‌های مرتبط با مدیریت آب، آشنایی با مسائل اجرایی و سیاستی و همچنین تمایل به مشارکت تا پایان فرایند مصاحبه بود. معیار خروج نیز ارائه اطلاعات غیرمرتبط، ناقص یا عدم همکاری در تکمیل فرایند مصاحبه در نظر گرفته شد (جدول ۱ جزئیات مشارکت‌کنندگان را نشان می‌دهد).

جدول ۱: ویژگی‌های فردی و حرفه‌ای مشارکت کنندگان در بخش کیفی پژوهش

Table 1. Personal and Professional Characteristics of Participants in the Qualitative Part of the Study

ردیف	جنسیت	سن	تحصیلات	سابقه	شغل فعلی	تعداد جلسات	ساعت مصاحبه(دقیقه)
۱	مرد	۷۰	دکتری	۴۰	هیئت علمی	۳	(۳۰، ۸۰، ۴۰)
۲	مرد	۴۴	دکتری	۲۲	هیئت علمی	۲	(۲۰، ۹۰)
۳	مرد	۴۵	دکتری	۱۸	هیئت علمی	۲	(۷۰، ۲۰)
۴	مرد	۴۲	دکتری	۱۰	هیئت علمی	۱	۳۰
۵	زن	۴۴	دکتری	۱۵	هیئت علمی	۱	۴۰
۶	مرد	۴۵	دکتری	۲۰	سازمان تحقیقات	۳	(۱۲۰، ۴۰، ۲۰)
۷	مرد	۵۴	دکتری	۳۰	سازمان تحقیقات	۱	۷۰
۸	مرد	۵۷	دکتری	۳۰	سازمان تحقیقات	۱	۵۰
۹	مرد	۳۶	دکتری	۶	سازمان تحقیقات	۱	۵۰
۱۰	مرد	۵۰	دکتری	۲۵	سازمان جهاد کشاورزی	۳	(۸۰، ۵۰، ۳۰)
۱۱	مرد	۵۱	فوق لیسانس	۲۸	سازمان جهاد کشاورزی	۲	(۷۰، ۴۰)
۱۲	زن	۳۷	دکتری	۵	سازمان جهاد کشاورزی	۱	۵۰
۱۳	زن	۳۹	فوق لیسانس	۱۵	سازمان جهاد کشاورزی	۱	۷۰
۱۴	مرد	۴۵	فوق لیسانس	۲۰	شرکت آب منطقه‌ای	۳	(۲۰، ۸۰، ۵۰)
۱۵	مرد	۵۷	دکتری	۲۷	شرکت آب منطقه‌ای	۲	(۵۰، ۳۰)
۱۶	مرد	۵۹	دکتری	۲۵	شرکت آب منطقه‌ای	۲	(۷۰،۴۰)

ردیف	جنسیت	سن	تحصیلات	سابقه	شغل فعلی	تعداد جلسات	ساعت مصاحبه(دقیقه)
۱۷	زن	٤۳	فوق لیسانس	۱۳	شرکت آب منطقه‌ای	۱	٤۰
۱۸	مرد	٤٤	فوق لیسانس	۲۰	شرکت آب منطقه‌ای	۲	(۵۰، ۳۰)
۱۹	مرد	٤۸	فوق لیسانس	۱۸	شرکت آب منطقه‌ای	۱	۵۰
۲۰	مرد	٤۵	فوق لیسانس	۱۵	شرکت آب منطقه‌ای	۱	۷۰
۲۱	زن	۳۹	فوق لیسانس	۱٤	شرکت آب منطقه‌ای	۱	۵۰
۲۲	مرد	٤۳	فوق لیسانس	۱۵	شرکت آب منطقه‌ای	۲	(٤۰ ،۷۰)
۲۳	مرد	۷۰	دیپلم	۵۰	کشاورز	۱	۷۰
۲٤	مرد	٦۲	فوق لیسانس	٤۰	کشاورز	۲	(۵۰،٤۰)
۲۵	مرد	۳۷	دیپلم	۷	کشاورز	۱	٤۰
۲٦	مرد	٤۷	لیسانس	۱۵	کشاورز	۱	۷۰
۲۷	مرد	٤۹	لیسانس	۲۰	کشاورز	۱	٦۰
۲۸	مرد	۳۸	لیسانس	۸	کشاورز	۱	۵۰
۲۹	مرد	٤۲	دیپلم	۲۰	کشاورز	۱	۷۰
۳۰	مرد	٦۷	سیکل	۵۰	کشاورز	۱	٤۰
۳۱	زن	٤٦	لیسانس	۱۰	کشاورز	۱	۷۰
۳۲	مرد	۵۱	لیسانس	۲۰	کشاورز	۲	(٤۰ ،۸۰)
۳۳	مرد	٤۹	دیپلم	۱۵	کشاورز	۱	۵۰
۳٤	مرد	٦۳	دیپلم	۳۵	کشاورز	۱	۵۰
۳۵	مرد	۳۰	دیپلم	۱۰	کشاورز	۲	(٤۰ ،۵۰)
۳٦	مرد	٦۵	لیسانس	٤۵	کشاورز	۱	۷۰
۳۷	مرد	۵۳	فوق لیسانس	۱۳	کشاورز	۱	٦۰
۳۸	مرد	۳۹	دکتری	۱۰	طراح سامانه‌های آبیاری	۳	(٤۰ ،۵۰ ،۷۰)
۳۹	زن	۳۷	فوق لیسانس	۵	طراح سامانه‌های آبیاری	۲	(٤۰ ،٦۰)
٤۰	مرد	٤۵	فوق لیسانس	۱۵	طراح سامانه‌های آبیاری	۱	۵۰
٤۱	مرد	۳۸	دکتری	۸	طراح سامانه‌های آبیاری	۱	۷۰
٤۲	مرد	٤۲	دکتری	۱۰	طراح سامانه‌های آبیاری	۲	(۳۰ ،۵۰)
٤۳	مرد	۳۹	فوق لیسانس	۱۰	طراح سامانه‌های آبیاری	۱	٦۰
٤٤	مرد	٤۲	دکتری	۱۲	طراح سامانه‌های آبیاری	۱	۷۰
٤۵	زن	۳۸	فوق لیسانس	۸	طراح سامانه‌های آبیاری	۱	۵۰
٤٦	مرد	۵٤	فوق لیسانس	۱٤	طراح سامانه‌های آبیاری	۲	(۳۰ ،۵۰)
٤۷	زن	۳۸	دکتری	۵	طراح سامانه‌های آبیاری	۱	۱۲۰
٤۸	زن	۳٦	فوق لیسانس	۷	طراح سامانه‌های آبیاری	۱	۷۰
٤۹	زن	۳۹	فوق لیسانس	۷	طراح سامانه‌های آبیاری	۲	(٤۰ ،۷۰)
۵۰	مرد	۳۵	دکتری	۵	طراح سامانه‌های آبیاری	۱	٦۰
جمع	–	–	–	۹۰۵	–	۷٤	۱۸۲۰
میانگین	–	٤٦	–	۱۸	–	–	۳٦

به‌منظور تحلیل داده‌های کیفی، از نرم‌افزار MAXQDA استفاده شد و تحلیل داده‌ها با بهره‌گیری از تحلیل محتوای کیفی انجام گرفت. در این رویکرد، ابتدا مصاحبه‌ها به‌صورت کامل مطالعه و واحدهای معنایی مرتبط با اهداف پژوهش شناسایی و کدگذاری شدند. سپس کدهای دارای قرابت مفهومی در قالب زیرمقوله‌ها و مقوله‌های مرتبط سازمان‌دهی شدند و در ادامه، با مقایسه مستمر داده‌ها و بررسی روابط مفهومی میان مقوله‌ها، مضامین و مقوله‌های نهایی استخراج و تفسیر شدند. چارچوب اولیه حاصل از ادبیات و مطالعات پیشین به‌عنوان نقطه شروع تحلیل استفاده شد؛ اما داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها امکان تأیید، تکمیل، تعدیل یا توسعه مضامین اولیه را فراهم کردند.

نمونه‌گیری و جمع‌آوری داده‌ها تا دستیابی به کفایت داده و اشباع موضوعی ادامه یافت. منظور از اشباع موضوعی در این پژوهش، وضعیتی بود که در مصاحبه‌های پایانی، اطلاعات و مضامین جدید و معناداری که موجب گسترش قابل توجه مقوله‌های مرتبط با اهداف پژوهش شوند، مشاهده نشد و مضامین شناسایی‌شده از ثبات نسبی برخوردار شدند؛ بنابراین، ملاک خاتمه مصاحبه‌ها، کفایت اطلاعات برای پوشش ابعاد موضوع پژوهش و عدم ظهور مضامین معنادار جدید بود و نه اشباع نظری به معنای مورد استفاده در نظریه‌پردازی داده‌بنیاد. در مجموع، ۵۰ نفر از خبرگان مورد مصاحبه قرار گرفتند و با برخی از مشارکت‌کنندگان، به‌منظور تکمیل داده‌ها، بیش از یک مصاحبه انجام شد؛ به‌گونه‌ای که در نهایت ۷۴ مصاحبه با مجموع زمان ۱۸۲۰ دقیقه انجام گرفت.

پس از استخراج و پالایش پیشران‌های مؤثر بر توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی در مرحله تحلیل محتوای کیفی، به‌منظور بررسی ساختار روابط متقابل میان پیشران‌ها از روش تحلیل ساختاری و نرم‌افزار MICMAC استفاده شد. در این مرحله، پیشران‌های نهایی حاصل از مرحله کیفی به‌عنوان متغیرهای سیستم در نظر گرفته شدند و ماتریس اثرات متقابل مستقیم (Direct Influence Matrix) برای تعیین شدت اثرگذاری هر پیشران بر سایر پیشران‌ها تشکیل شد.

ماتریس اثرات متقابل توسط ۵۰ خبره مشارکت کننده در پژوهش تکمیل شد. در این ماتریس، هر خبره میزان اثرگذاری پیشران واقع در سطر بر پیشران واقع در ستون را به‌صورت زوجی ارزیابی کرد. برای سنجش شدت اثرگذاری از مقیاس چهاردرجه‌ای ۰ تا ۳ استفاده شد؛ به‌طوری‌که امتیاز ۰ نشان‌دهنده نبود اثرگذاری، امتیاز ۱ بیانگر اثرگذاری ضعیف، امتیاز ۲ نشان‌دهنده اثرگذاری متوسط و امتیاز ۳ بیانگر اثرگذاری قوی بود. اثرگذاری هر پیشران بر خودش نیز در قطر اصلی ماتریس لحاظ نشد و مقدار آن صفر در نظر گرفته شد.

پس از تکمیل ماتریس توسط خبرگان، به‌منظور دستیابی به یک ماتریس واحد برای ورود به نرم‌افزار MICMAC، قضاوت‌های فردی خبرگان برای هر رابطه دوتایی تجمیع شد. بدین منظور، میانگین حسابی امتیازات خبرگان برای هر سلول از ماتریس محاسبه شد؛ به‌گونه‌ای که مقدار نهایی هر سلول نشان‌دهنده میانگین ارزیابی خبرگان درباره شدت اثرگذاری پیشران سطر بر پیشران ستون بود. بنابراین، ماتریس نهایی اثرات متقابل مستقیم، بیانگر قضاوت جمعی خبرگان براساس تجمیع کمی ارزیابی‌های فردی آنان بود.

ماتریس نهایی حاصل از تجمیع قضاوت‌های خبرگان در نرم‌افزار MICMAC وارد شد. این نرم‌افزار با تحلیل

ماتریس اثرات متقابل، میزان اثرگذاری و اثرپذیری مستقیم و غیرمستقیم هر یک از پیشران‌ها را محاسبه و جایگاه آنها را در ساختار سیستم تعیین کرد. بر این اساس، پیشران‌های دارای نقش ساختاری برجسته به‌عنوان پیشران‌های کلیدی شناسایی و برای ورود به مرحله سناریونگاری انتخاب شدند.

شایان ذکر است که در این پژوهش، تجمیع قضاوت‌های خبرگان به معنای حصول اجماع رسمی از طریق روش دلفی چندمرحله‌ای نیست؛ بلکه به معنای ترکیب کمی ارزیابی‌های خبرگان از طریق میانگین حسابی و تشکیل یک ماتریس نهایی برای تحلیل ساختاری است. این تفکیک مفهومی به‌منظور شفافیت روش‌شناختی و جلوگیری از خلط میان فرایند دلفی و تجمیع قضاوت‌های کارشناسی در تحلیل MICMAC لحاظ شد.

در گام نهایی پژوهش، پیشران‌های کلیدی شناسایی‌شده در تحلیل ساختاری MICMAC و وضعیت‌های محتمل هر یک از پیشران‌ها در نرم‌افزار Scenario Wizard استفاده شدند. این نرم‌افزار با بررسی روابط سازگاری و ناسازگاری میان وضعیت‌های مختلف پیشران‌ها، ترکیب‌های سازگار را شناسایی و مبنای تدوین سناریوهای محتمل آینده را فراهم کرد. بدین‌ترتیب، سناریوهای نهایی حاصل از ترکیب وضعیت‌هایی بودند که از نظر روابط متقابل میان پیشران‌ها با یکدیگر سازگاری داشتند.

پس از استخراج سناریوها، به‌منظور کنترل کیفی و افزایش اعتبار محتوایی آن‌ها، سناریوهای حاصل در اختیار خبرگان منتخب پژوهش قرار گرفت. ارزیابی خبرگان بر سه معیار اصلی انجام شد: (۱) سازگاری منطقی وضعیت‌های تشکیل‌دهنده هر سناریو با یکدیگر، (۲) امکان هم‌زیستی و تحقق هم‌زمان وضعیت‌های انتخاب‌شده در چارچوب روابط متقابل پیشران‌ها، و (۳) انطباق سناریو با روابط اثرگذاری و اثرپذیری شناسایی‌شده در مرحله تحلیل ساختاری MICMAC. خبرگان موارد دارای ناسازگاری مفهومی، ترکیب غیرمنطقی وضعیت‌ها یا عدم انطباق با ساختار روابط پیشران‌ها را مشخص کردند و نظرات آنان در بازبینی نهایی سناریوها استفاده شد.

بنابراین، کنترل سازگاری سناریوها در این پژوهش در دو سطح انجام شد: در سطح نخست، سازگاری ساختاری وضعیت‌ها براساس روابط سازگاری و ناسازگاری در نرم‌افزار Scenario Wizard بررسی شد و در سطح دوم، سناریوهای استخراج‌شده از نظر منطق محتوایی و امکان هم‌زیستی وضعیت‌ها توسط خبرگان کنترل شد. این فرایند با هدف کاهش ترکیب‌های غیرمنطقی، افزایش انسجام سناریوها و اطمینان از انطباق آنها با ساختار پیشران‌های شناسایی‌شده انجام گرفت. درخور ذکر است که این ارزیابی کارشناسی به‌منزله اجرای روش دلفی یا آزمون آماری اعتبار سناریوها تلقی نمی‌شود، بلکه به‌عنوان مرحله کنترل کیفی و کارشناسی سناریوهای حاصل از تحلیل ساختاری انجام شد.

یافته‌ها

داده‌های جمع‌آوری‌شده در هر گام که در قالب یادداشت‌های میدانی بود توسط محقق در محیط نرم‌افزار Word پیاده‌سازی و پس از بررسی جمله به جمله مصاحبه‌ها، جملات مرتبط با سؤال پژوهش شناسایی و مشخص شدند. مرور مجدد متن مصاحبه‌ها و مقایسه دائمی داده‌ها تکنیکی بود که به محقق در طول فرآیند تحلیل داده‌ها کمک کرد.

شایان ذکر است که تجزیه‌وتحلیل و تفسیر داده‌ها در قالب سه مرحله استخراج مفاهیم اولیه (کدگذاری باز)، طبقه‌بندی مفاهیم براساس قرابت معنایی (کد گذاری محوری) و سپس استنباط یک روایت یا داستان از روابط درونی طبقات با یکدیگر (کدگاری انتخابی) در محیط نرم‌افزار MAXQDA انجام گرفت که در جدول (۲) آمده است. در ادامه به تشریح نتایج این بخش پرداخته شده است.

جدول ۲: مفهوم‌پردازی پیشران‌های کلیدی آینده تکنولوژی‌های مدیریت آب در کشاورزی

Table: Conceptualization of Key Drivers Shaping the Future of Agricultural Water Management Technologies

نمونه جملات کلیدی	مفهوم استخراج شده/کد باز	مقوله‌ها	مفاهیم اصلی
فناوری نوین در آبیاری سبب افزایش رلندمان آبیاری به میزان درخور توجهی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در سیستم بارانی کنونی راندمان آبیاری تا ۷۰ درصد و در سیستم قطره‌ای تا ۹۵ درصد افزایش می‌یابد؛ مشروط بر اینکه بهره‌وری صحیح انجام گیرد.	آگاه‌کردن کشاورزان دربارهٔ نحوه صحیح به‌کارگیری فناوری‌ها	نگرش و باورهای کشاورزان	عامل اجتماعی
فناوری تأثیری ندارد؛ به دلیل اینکه بهره بردار یا همان کشاورز فقط و فقط در جهت منافع مالی خود اقدام کرده است و هیچ‌گونه ارزشی برای استفاده درست از منابع آب قائل نیست؛ بنابراین استفاده درست مستلزم تأمین مالی و آموزش فرهنگی است.	اختصاص وام و حمایت مالی کشاورزان	سودآوری و بازگشت سرمایه	عامل اقتصادی
توسعه در فناوری و به‌روزرسانی آن از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ منوط بر اینکه این فناوری‌ها در منطقه مورد مطالعه سازگار با شرایط آب‌وهوایی و میزان زمان باشد.	متناسب‌بودن و سازگار سازی فناوری با شرایط محیطی	بومی‌سازی و سازگار کردن	عامل زیست محیطی
قطعاً مؤثر هستند؛ بشرط آنکه به دلیل کمبود آب بهره برداری اصولی از سیستم‌های موجود انجام گیرد. درضمن در صورت به‌کارگیری فناوری‌های نوین مصرف آب بهینه‌تر و هدررفت آن به حداقل می‌رسد.	کمبود آب‌های در دسترس برای کشت	محدودیت منابع سطحی و زیرزمینی	عامل زیست محیطی
صرفاً فناوری‌ها مؤثر نیستند؛ بلکه چگونگی استفاده از این فناوری‌ها توسط بهره‌برداران از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. متأسفانه عدم نظارت بر عملکرد کشاورزان توسط دستگاه‌های زیربط باعث شده است که این فناوری خیلی مثمر ثمر نباشد.	نظارت دستگاه‌های زیربط بر کشاورزان در استفاده از فناوری‌ها و به‌کارگیری بازخور آنان	شبکه‌ها و انجمن‌های حمایت	عامل سیاسی
در کنار به‌روزرسانی فناوری‌های آبیاری، باید هزینه و جریمه‌ای در استفاده بیشتر از آب اعمال شود که این فناوری‌ها تأثیری در صرفه‌جویی به وجود بیاید.	اختصاص جریمه به استفاده بیستر از آب و کشت بیشتر از مقدار تعیین‌شده	هزینه انرژی و آب	عامل اقتصادی
برای هر فناوری افق اهدافی ترسیم شود. به نظر اینجانب با فناوری موجود می‌توانستیم به مصرف بهینه‌تر دست یابیم و از نظر اهداف ترسیم‌شده به دلیل عدم اجرا و بهره‌برداری مناسب از فناوری موجود به دلیل ناآگاهی و عدم باور، اهداف مدنظر به‌طور پذیرفتنی محقق نشده است.	آموزش اصولی و برگزاری دوره‌هایی آموزشی برای آشنایی با کاربرد فناوری	توانمندسازی کشاورزان	عامل اجتماعی
چالش‌هایی در این زمینه وجود دارد؛ مانند عدم سرمایه‌گذاری کافی، کمبود فرهنگ‌سازی و آموزش، هزینه بالای تأمین برخی از این فناوری‌ها.	حمایت‌های دولت و دادن وام‌های بلاعوض و یارانه	قوانین و سیاست‌های حمایتی	عامل سیاسی

نمونه جملات کلیدی	مفهوم استخراج شده/کد باز	مقوله‌ها	مفاهیم اصلی
قطعا بایستی وضعیت فعلی تغییر یابد و تناسب با تغییر اقلیم پیش‌آمده در کشور کشت‌ها بازنگری شود و با همکاری دولت و نخبه‌ها به‌ویژه در رابطه با بعضی محصولات آب بر به علت کشت‌های فرا زمینی هدایت شوند. درضمن جایگزینی سیستم‌های آبیاری فعلی با سیستم‌های نوین و کم مصرف با راندمان بالا پیشنهاد می‌شود.	استفاده از شرکت‌های دانش‌بنیان و مشارکت نخبگن و نظرات طراحان در به‌روزرسانی فناوری	هوشمندسازی سامانه‌ها	عامل فناورانه
توسعه و همکاری بین دانشگاه و صنعت و کشاورزی و استفاده از منابع جایگزین. حمایت از تصفیه و بازچرخانی آب کشاورزی.	ایجاد ارتباط بین کشاورزان و کارشناسان و زراحان	شبکه‌ها و انجمن‌های حمایتی	عامل سیاسی
استفاده از کشاورزی هوشمند در مصرف بهینه آب کشاورزی پیشنهاد می‌شود و اینکه روی فناوری‌های هیدروانفورماتیک سرمایه‌گذاری شود و استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی بخش آب. همچنین استفاده از دانش اساتید دانشگاه در این زمینه.	حرکت از کشاورزی سنتی به سمت کشاورزی مدرن	هوشمندسازی سامانه‌ها	عامل فناورانه
با وضع قوانین فقط فناوری‌هایی باید اولویت داشته باشند که برای کنترل برداشت از آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود؛ چون با عدم کنترل این موضوع بهروزی در کشاورزی وجود نخواهد داشت.	سیاست‌گذاری براساس وضعیت منطقه	حکمرانی	عامل سیاسی
انتخاب سیستم‌های جدید با شرایط محلی تصمیمی که با حداقل میزان آب و کاهش نیروی انسانی و بهینه‌سازی هزینه‌های اجرایی طرح‌های نو می‌توان چشم‌انداز مناسبی در این زمینه رقم زد.	استفاده از فناوری‌های به روز و نوین بجای فناوری‌های قدمی	اینترنت اشیا	عامل فناورانه
باتوجه به کاهش منابع آب در منابع آبی کشور، نصب کنتورهای هوشمند راهکار مناسبی برای آیندگان است و استفاده از لوازم و تجهیزاتی که عمر بیشتری دارند و استفاده از جنس خوب در ساخت و تولید تجهیزات آبیاری	استفاده از کنتور هوشمند آب و برق	هزینه انرژی و آب	عامل اقتصادی
بایستی از فناوری‌های اینترنت اشیا بیشتر بهره‌مند شوند و با استفاده از سنسورهای رطوبتی هوا و خاک و تنظیم خودکار آبیاری براساس نیاز گیاه و شرایط محیطی و استفاده از انواع روش‌های پیشرفته آبیاری بتوان مصرف آب را بهینه و از طرف دیگر افزایش عملکرد داشته باشند و از الگوی کشت کم‌مصرف و با صرفه اقتصادی استفاده کنند	به سمت به‌کارگیری فناوری‌های به‌روز جهانی	اینترنت اشیا	عامل فناورانه
قطعاً نیاز به تغییرات وجود دارد در دنیای هوش مصنوعی و رباتیک خیلی از امور نیاز به جابجایی با وسایل جدید دارند، همین‌طور حداقل استفاده از پهبادها در کشاورزی نوین.	تلفیق فناوری‌های کنونی با داده‌های جدید با در نظر گرفتن چشم‌اندازها	هوش مصنوعی	عامل فناورانه
مشارکت کشاورزان در تصمیم‌گیری‌ها، آموزش کشاورزان و کارشناسان مرتبط، مدیریت یکپارچه منابع آب، ایجاد قوانین جدید در حکمرانی آب	برنامه‌ریزی استراتژیک، و مشارکت ارگان‌ها	حکمرانی	عامل سیاسی
آموزش به کشاورزان، به‌کارگیری فناوری در مزارع نمونه در هر منطقه و بازدید کشاورزان دیگر از این مزارع و سایت‌های الگویی و آشنایی با افزایش عملکرد و کارایی فناوری.	آموزش کشاورزان و آگاه‌سازی آنان	توانمندسازی کشاورزان	عامل اجتماعی
بایستی در سطح وزارتخانه‌های نیرو و جهاد کشاورزی مدیریت منابع آب	تشکیل شبکه‌ها و زنجیره‌های	شبکه‌ها و	عامل سیاسی

نمونه جملات کلیدی	مفهوم استخراج شده/کد باز	مقوله‌ها	مفاهیم اصلی
در سه سطح زیرین قانون، نظام اداری و مالی، ارائه فناوری‌های سازگار با شرایط تغییرات اقلیمی و پتانسیل محلی اصلاح شود.	اطلاع رسانی	انجمه‌های حمایتی	

پس از اتمام فرآیند کدگذاری و استخراج شاخص‌های اصلی، مقوله‌های اولیه با متغیرهای به‌دست‌آمده از مراحل پیشین پژوهش مقایسه و تطبیق داده شدند. در نهایت، تعداد ۹ مفهوم اصلی یا همان عامل کلیدی احصا شد که در مجموع شامل ۲٤ مقوله را شامل می‌شد (جدول ۳).

جدول ۳: لیست نهایی پیشران‌های کلیدی و مقوله‌ها

Table 3. Final List of Key Drivers and Themes

ردیف	مضمون نهایی/ عوامل کلیدی	مقوله‌ها
۱	عوامل اجتماعی فرهنگی	- توانمندسازی کشاورزان (C1) - نگرش و باورهای کشاورزان (C2)
۲	عوامل فناورانه	- اینترنت اشیا (C3) - هوش مصنوعی (C4) - هوشمندسازی سامانه‌ها (C5)
۳	عوامل اقتصادی	- هزینه انرژی و آب (C6) - سرمایه‌گذاری و یارانه‌ها (C7) - سودآوری و بازگشت سرمایه (C8)
٤	عوامل زیست محیطی	- خشکسالی و تغییر اقلیم (C9) - محدودیت منابع سطحی و زیرزمینی (C10) - بومی‌سازی یا سازگارکردن (C11)
٥	عوامل سیاست‌گذاری	- قوانین و سیاست‌های حمایتی (C12) - حکمرانی (C13) - شبکه‌ها و انجمن‌های حمایت (C14)
٦	برنامه‌ریزی	- چشم‌انداز (C15) - نیازسنجی (C16)
۷	عوامل مدیریتی	- سازگارسازی دانش نوین با دانش بومی (C17) - راه‌اندازی دوره‌های آموزشی (C18)
۸	عوامل زیرساختی	- تشکیل شرکت‌های دانش‌بنیان (C19) - بهبود شبکه‌ها و مشارکت کشاورزان (C20) - یکپارچه‌سازی اراضی (C21)
۹	عوامل آموزشی پژوهشی	- آموزش دانش و مهارت فنی تخصصی (C22) - آگاه‌سازی (C23) - برگزاری نمایشگاه‌ها و بازدید مزارع (C24)

در مرحله بعدی تمامی متغیرهای اســـتخراج‌شـــده در جدول (۳) به‌عنوان زیرکد در ماتریس ۲٤*۲٤ وارد نرم‌افزار MICMAC شد که در ادامه به‌طور کامل تشریح می‌شود.

تشکیل ماتریس ارتباطات مستقیم

در این بخش، میزان اثرگذاری مستقیم ۲٤ معیار پژوهش بر یکدیگر (مندرج در جدول ٤) توسط خبرگان و براساس طیف (۰: بدون اثر، ۱: اثر کم، ۲: اثر متوســـط، ۳: اثر زیاد و P: اثر بالقوه/احتمالی) تعیین شـــد. در نهایت، نظرات با استفاده از روش میانگین حسابی تجمیع و در قالب ماتریس ارتباطات مستقیم نهایی شد.

جدول ٤: ماتریس ارتباطات مستقیم میان معیارهای پژوهش

Table 4. Direct Relation Matrix among Research Criteria

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24
C1	۰	۳	P	P	۳	۳	۳	۳	۱	۱	۳	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۱	۳	۳	۱	۳	۳
C2	۳	۰	۲	۱	۳	۱	۲	۱	۰	۲	۲	۱	۲	۱	۲	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲
C3	P	P	۰	۲	۲	P	۲	۳	۰	۰	۲	۱	۲	۲	۳	۰	۳	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۱
C4	P	P	۳	۰	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
C5	۳	۳	۱	۲	۰	۲	۳	۳	۱	۲	۲	۳	۲	۳	۳	۳	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۲	۲
C6	۲	۳	۲	۲	۲	۰	۳	۳	۱	۳	۳	۱	۲	۳	۳	۳	۲	۳	۱	۳	۳	۳	۳	۳
C7	۳	۲	۱	۳	۳	۳	۰	۲	۲	۲	۳	۱	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۰	۲	۱	۳	۳	۳
C8	۳	۳	۱	۱	۲	۱	۳	۰	۰	۱	۳	۱	۲	۲	۳	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۰
C9	۰	۲	۲	۱	۳	۱	۳	۳	۰	۳	۲	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۳	P	P	P	۳	۳	۳
C10	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۲	۳	۰	۱	۲	۲	۲	۰	۰	۳	۳	۱	۲	۳	۳	۳	۳
C11	۳	۳	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۳	۰	۱	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	۲	۲	۳	۳	۳
C12	۳	۲	۱	۱	۱	۲	۳	۱	۳	۲	۲	۰	۲	۳	۲	۳	۱	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۳
C13	۳	۳	۲	۱	۲	۲	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۰	۳	۳	۳	۲	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۳
C14	۱	۲	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۳	۲	۱	۱	۰	۱	۲	۱	۲	۰	۱	۲	۲	۳	۳
C15	۱	۲	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۲	۱	۰	۳	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳
C16	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۲	۲	۲	۰	۲	۲	۱	۲	۳	۳	۳	۳
C17	۳	۳	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۰	۲	۱	۲	۱	۳	۳	۳	۰	۲	۱	۲	۳	۳	۳	۳
C18	۳	۳	۳	۱	۱	۰	۲	۲	۰	۲	۲	۰	۱	۳	۲	۲	۲	۰	۱	۱	۲	۳	۳	۳
C19	۳	۳	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۰	۳	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۱	۳	۰	۳	۳	۳	۳	۳
C20	۲	۳	۳	۱	۲	۳	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۲	۲	۱	۲	۰	۳	۳	۳	۳
C21	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۲	۱	۰	۲	۳	۱	۳	۳	۲	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۲	۲	۳
C22	۳	۳	۳	۲	۳	۲	۲	۱	۰	۲	۲	۱	۳	۱	۱	۲	۲	۳	۱	۳	۱	۰	۳	۳
C23	۲	۲	۳	۱	۲	۲	۱	۱	۰	۰	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۰	۳
C24	۲	۲	۲	۱	۳	۱	۲	۲	۰	۰	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۰

پس از ورود ماتریس روابط مستقیم به نرم‌افزار MICMAC، ویژگی‌های اولیه ماتریس استخراج شد که نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است. ماتریس مورد بررسی دارای ۲۴ عامل و در مجموع ۵۷۶ خانه است. از این تعداد، ۵۷ رابطه دارای مقدار صفر بوده و ۵۱۹ رابطه دارای مقدار غیرصفر شامل مقادیر ۱، ۲، ۳ و P بوده است. بر این اساس، درجه پرشدگی ماتریس با در نظر گرفتن کل خانه‌های ماتریس برابر با ۹۰/۱ درصد (۵۱۹ از ۵۷۶ رابطه) محاسبه شده است. این شاخص بیانگر میزان وجود روابط مستقیم میان عوامل مورد بررسی است و به‌تنهایی نشان‌دهنده شدت تأثیرگذاری روابط نیست.

از میان روابط موجود، ۱۲۸ رابطه دارای مقدار ۱ بوده که بیانگر تأثیر ضعیف، ۱۶۹ رابطه دارای مقدار ۲ بوده که بیانگر تأثیر نسبتاً قوی، و ۱۹۲ رابطه دارای مقدار ۳ بوده که نشان‌دهنده تأثیر قوی است. همچنین، ۳۰ رابطه با نماد P مشخص شده‌اند که بیانگر وجود تأثیر بالقوه میان عوامل است. در مجموع، ۵۱۹ رابطه غیرصفر در ماتریس شناسایی شد.

۱جدول ۵: تحلیل اولیه داده‌های ماتریس و تأثیرات متقاطع

Table 5. Initial Data Analysis of the Cross-Impact Matrix

شاخص	ارزش
ابعاد ماتریس	۲۴
تعداد چرخش	۲
تعداد ۰	۵۷
تعداد ۱	۱۲۸
تعداد ۲	۱۶۹
تعداد ۳	۱۹۲
تعداد P	۳۰
تعداد کل	۵۱۹
درجه پرشدگی	٪۹۰/۱

تعیین اثرات مستقیم و غیرمستقیم

در جدول (۶) اثرات مستقیم و غیرمستقیم معیارها آورده شده است. اثرات مستقیم از جمع سطر و ستون ماتریس ارتباطات مستقیم حاصل می‌شود که به ترتیب تأثیرگذاری و تأثیرپذیری است. اثرات غیرمستقیم معیارها با استفاده از نرم‌افزار MICMAC و از طریق فرایند تکرار ضرب متوالی ماتریس ارتباطات مستقیم در خودش محاسبه می‌شود. در هر مرحله از تکرار، رتبه‌بندی معیارها از نظر تأثیرگذاری و تأثیرپذیری تعیین و با رتبه‌بندی حاصل از مرحلهٔ قبل مقایسه می‌شود؛ این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که رتبه‌بندی‌ها به ثبات نسبی برسند (همگرایی رتبه‌ها). در این پژوهش، این پایداری در توان ۳ حاصل شد و مقادیر ارائه‌شده در جدول (۶) مربوط به همین سطح از پایداری است. بر این اساس معیارهای حکمرانی (C13) و هزینه انرژی و آب (C6) رتبه‌های اول و دوم را از نظر تأثیرگذاری مستقیم و غیر مستقیم دارند. معیارهای آگاه‌سازی (C23) و برگزاری نمایشگاه‌ها و بازدید مزارع (C24) رتبه‌های اول و دوم را از نظر تأثیرپذیری مستقیم و غیرمستقیم دارند.

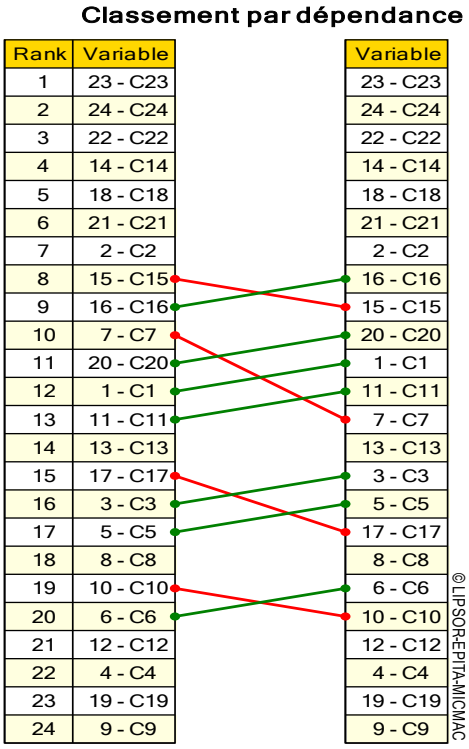
جدول ٦: اثرات مستقیم و غیرمستقیم معیارها

Table 6: Direct and Indirect Effects of Criteria

کد	نام معیار	اثرات مستقیم		اثرات غیرمستقیم	
		تأثیرگذاری	تأثیرپذیری	تأثیرگذاری	تأثیرپذیری
C1	توانمندسازی کشاورزان	٤٦	٤٥	٩٠١٣٢	٨٧٠٧٤
C2	نگرش و باورهای کشاورزان	٤٣	٤٩	٨١٧١٠	٩٢٦٧٩
C3	اینترنت اشیا	٣٧	٤١	٦٨٩٤٨	٧٩٩٨٢
C4	هوش مصنوعی	٣	٢٩	٤٨١٨	٥٦٠٥٧
C5	هوشمندسازی سامانه‌ها	٥٣	٤١	٩٨٥٩٣	٧٩٧٤٦
C6	هزینه انرژی و آب	٥٧	٣٦	١٠٣٨٠٥	٦٨٦٨٩
C7	سرمایه‌گذاری و یارانه‌ها	٥٤	٤٦	٩٧٨٧١	٨٣٦٤٠
C8	سودآوری و بازگشت سرمایه	٤٤	٤٠	٨٤٠٢٧	٧٢٩٦٥
C9	خشکسالی و تغییر اقلیم	٤٩	١٧	٩١١٤٢	٢٩٥٨٠
C10	محدودیت منابع سطحی و زیرزمینی	٣٧	٣٧	٧٢٨٧٦	٦٥٨٤٠
C11	بومی‌سازی یا سازگارکردن	٤٥	٤٥	٨٣٦٩٩	٨٣٩٣٦
C12	قوانین و سیاست‌های حمایتی	٥٢	٣٢	٩٧٧٧٣	٥٨١٣٩
C13	حکمرانی	٦١	٤٢	١١٤٣٦٢	٨٠١٤٣
C14	شبکه‌ها و انجمن‌های حمایتی	٣٢	٥٢	٥٧٨١٣	٩٥٠٧٤
C15	چشم‌انداز	٣٩	٤٩	٧٢٧٧٤	٨٩٦٤٢
C16	نیازسنجی	٣٧	٤٩	٦٨٩٥١	٩٠٥٦٠
C17	سازگارسازی دانش نوین با دانش بومی	٤٨	٤٢	٨٨٥٠٨	٧٨٣٣٧
C18	راه‌اندازی دوره‌های آموزشی	٤٢	٥٢	٧٥٨٧٤	٩٤٥٠١
C19	تشکیل شرکت‌های دانش‌بنیان	٥٣	٢٧	٩٨٣٣٠	٥٢٨٩٨
C20	بهبود شبکه‌ها و مشارکت کشاورزان	٤٧	٤٦	٨٨٣٨٦	٨٧٧٠٥
C21	یکپارچه‌سازی اراضی	٤٢	٥٠	٧٥٩٥٢	٩٤٢٤٣
C22	آموزش دانش و مهارت فنی تخصصی	٤٧	٥٦	٨٨٠٧٨	١٠٢٢٥١
C23	آگاه‌سازی	٤٠	٦٠	٧٥٧٨١	١١١١٦٧
C24	برگزاری نمایشگاه‌ها و بازدید مزارع	٣٤	٥٩	٦٥٣٧١	١١٠٧٢٦

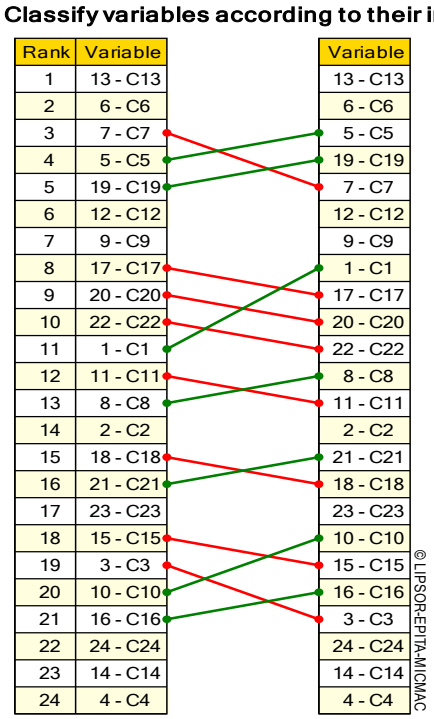
در شکل ۲ و شکل ۳، معیارها از نظر تأثیرگذاری و تأثیرپذیری در ماتریس اثرات مستقیم و غیرمستقیم رتبه‌بندی شده‌اند. با توجه به شکل ۳، دو معیار معیارهای حکمرانی (C13) و هزینه انرژی و آب (C6) رتبه‌های اول و دوم را از نظر تأثیرگذاری مستقیم و غیرمستقیم دارند معیار سرمایه‌گذاری و یارانه‌ها (C7) رتبه سوم از نظر تأثیرگذاری مستقیم و رتبه پنجم از نظر تأثیرگذاری غیر مستقیم دارند. معیارهای هوشمندسازی سامانه‌ها (C5) و تشکیل شرکت‌های دانش بنیان (C19) چهارم و پنجم از نظر تأثیرگذاری مستقیم و رتبه سوم و چهارم از نظر تأثیرگذاری غیرمستقیم کسب کرده‌اند. رتبه دیگر معیارها نیز از نظر تأثیرگذاری مستقیم و غیرمستقیم در شکل ۳ مشخص شده است.

براساس شکل ۲، رتبه‌بندی معیارها از نظر تأثیرپذیری مستقیم و غیرمستقیم آورده شده است تا رتبه هفتم معیارها در تأثیرپذیری مستقیم و غیرمستقیم با هم یکسان هستند؛ یعنی معیارهای C23، C24، C22، C14، C18، C21، C2 رتبه‌های اول تا هفتم را کسب کرده‌اند.



شکل ۲: رتبه معیارها از نظر تأثیرپذیری ماتریس اثرات مستقیم و غیرمستقیم

Figure 2: Ranking of Criteria Based on Dependence (Influenceability) in the Direct and Indirect Effects Matrix



شکل ۳: رتبه معیارها از نظر تأثیرگذاری ماتریس اثرات مستقیم و غیرمستقیم

Figure 3: Ranking of Criteria Based on Influence (Driving Power) in the Direct and Indirect Effects Matrix

در جدول (۷) نیز میزان پایداری ماتریس اثرات مستقیم در چرخش اول ۱۰۰ درصد و در چرخش دوم ۱۰۱ درصد برای تأثیرگذاری است؛ یعنی در اولین بار محاسبه، نتایج تقریباً پایدار بوده‌اند. برای تأثیرگذاری در چرخش اول ۱۰۰ درصد و در چرخش دوم ۱۰۲ درصد آورده شده است؛ این یعنی نتایج بعد از تکرار محاسبات کاملاً تثبیت شده‌اند و تغییر محسوسی ندارند.

جدول ۷: پایداری (ثبات) ماتریس اثرات مستقیم

Table 7: Stability of the Direct Effects Matrix

چرخش	تأثیرگذاری	تأثیرپذیری (وابستگی)
۱	٪۱۰۰	٪۱۰۱
۲	٪۱۰۲	٪۱۰۰

نقشه تأثیرگذاری و وابستگی ماتریس اثرات مستقیم و غیرمستقیم

به‌منظور شناسایی نقش و جایگاه هر یک از متغیرهای پژوهش در توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی، با تحلیل روابط مستقیم و غیرمستقیم میان متغیرها، امکان طبقه‌بندی آنها را در چهار گروه اصلی براساس میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری فراهم می‌سازد. نقشه‌های حاصل از این تحلیل در شکل (٤)، شکل (٥) و شکل (٦) ارائه شده‌اند.

در شکل (٤)، که روابط مستقیم میان متغیرها را نمایش می‌دهد، معیارها در چهار ناحیه جای‌گذاری شده‌اند:

ناحیه بالا – چپ (تأثیرگذاری بالا، تأثیرپذیری پایین): در این ناحیه معیارهای هزینه انرژی و آب (C6)، خشکسالی و تغییر اقلیم (C9)، محدودیت منابع سطحی و زیرزمینی (C10)، قوانین و سیاست‌های حمایتی (C12) و تشکیل شرکت‌های دانش‌بنیان (C19) قرار گرفته‌اند. این متغیرها به‌عنوان عوامل کلیدی و محرک‌های راهبردی شناخته می‌شوند. ویژگی اصلی این دسته آن است که می‌توانند تحولات گسترده‌ای در سایر متغیرها ایجاد کنند؛ درحالی‌که خود کمتر از سایر عوامل متأثر می‌شوند؛ ازاین‌رو، در تدوین سیاست‌ها و طراحی سناریوهای آینده‌نگر، توجه ویژه به این دسته متغیرها ضروری است؛ زیرا آنها نقش «موتور محرک» تغییرات در سیستم کشاورزی آب‌محور ایران را ایفا می‌کنند.

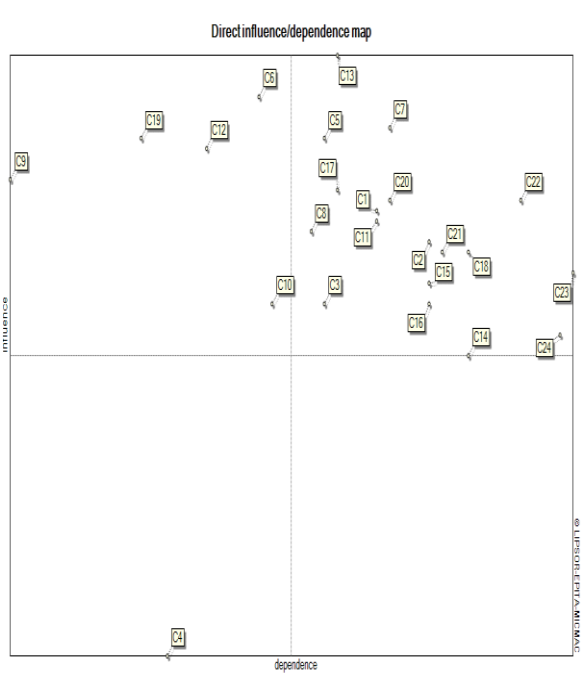
ناحیه پایین – چپ (تأثیرگذاری و تأثیرپذیری پایین): در این ناحیه تنها متغیر هوش مصنوعی (C4) قرار دارد. براساس روابط مستقیم، این متغیر هم تأثیرگذاری و هم تأثیرپذیری محدودی دارد و در ظاهر یک متغیر نسبتاً منفعل محسوب می‌شود؛ بااین‌حال، بررسی روابط در شکل (٤) نشان می‌دهد که این عامل دارای تأثیرگذاری بالقوه بسیار زیاد و تأثیرپذیری بالقوه اندک است. این بدان معناست که هرچند در کوتاه‌مدت اثرگذاری مستقیم آن محدود است، در بلندمدت و با تقویت زیرساخت‌ها می‌تواند به یکی از موتورهای کلیدی تحول در بخش کشاورزی بدل شود. درخور ذکر است که این استنتاج بر پایه ماتریس اثرات بالقوه در نرم‌افزار MICMAC استوار است که به‌طور مجزا از روابط کدگذاری‌شده با نماد «P» در جدول (٤) ساخته می‌شود. بررسی جدول (٤) نشان می‌دهد که از میان ۲۳ رابطه معیار هوش مصنوعی (C٤) با سایر معیارها، تنها یک رابطه (با معیار اینترنت اشیا، C۳) به‌صورت قطعی نمره‌گذاری شده و ۲۱ رابطه دیگر توسط خبرگان با کد P (اثر بالقوه/احتمالی) ثبت شده‌اند. این الگو، در کنار نقشه تأثیرگذاری – وابستگی اثرات بالقوه (شکل ٦)، مبنای تجربی نتیجه‌گیری درباره پتانسیل بلندمدت این متغیر است؛ هرچند این نتیجه‌گیری ماهیتی اکتشافی و مبتنی‌بر قضاوت خبرگی دارد و نیازمند اعتبارسنجی تکمیلی (مانند پایش روند واقعی پذیرش فناوری در دوره‌های آتی) است.

ناحیه پایین – راست (تأثیرگذاری پایین، تأثیرپذیری بالا): در تحلیل روابط مستقیم (شکل ٤)، هیچ متغیری در این ناحیه قرار نداشت. این ناحیه عموماً شامل متغیرهای تابع یا پیامدی است که تغییرات آنها ناشی از تأثیرات سایر عوامل است و خود توانایی جهت‌دهی به سیستم را ندارند؛ بنابراین، چنین متغیرهایی را می‌توان به‌عنوان شاخص‌های کارآمد برای پایش اثرات سیاست‌ها و اقدامات کلان در نظر گرفت.

ناحیه بالا – راست (تأثیرگذاری بالا، تأثیرپذیری بالا): سایر متغیرها در این ناحیه قرار گرفته‌اند. این دسته از عوامل معمولاً به‌عنوان متغیرهای ناپایدار یا دووجهی شناخته می‌شوند؛ زیرا هم اثرگذارند و هم به‌شدت از سایر عوامل تأثیر می‌پذیرند. نقش این متغیرها بیشتر در ایجاد تعاملات پویا و متقابل میان بخش‌های مختلف سیستم نمایان می‌شود.

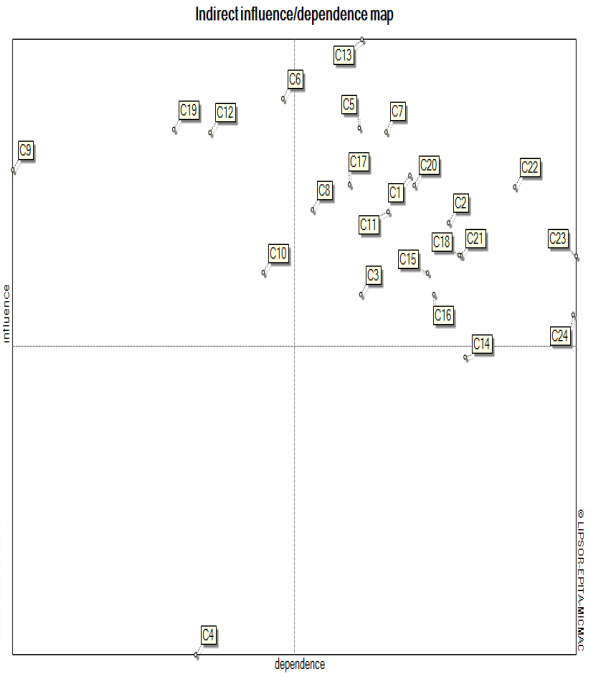
در ادامه و در شکل (۵) روابط غیرمستقیم میان متغیرها ترسیم شده است. این شکل بیانگر تأثیراتی است که از طریق واسطه‌ها منتقل می‌شوند. نتایج نشان داد که اغلب متغیرهایی که در نقشه روابط مستقیم در ناحیه‌های بالا – چپ و پایین – چپ قرار داشتند، در نقشه غیرمستقیم نیز در همان ناحیه‌ها باقی مانده‌اند. تنها تغییر قابل توجه در این نقشه، ورود معیار شبکه‌ها و انجمن‌های حمایتی (C14) به ناحیه پایین – راست بود. این امر نشان می‌دهد که نقش این عامل بیشتر به‌صورت تابعی و غیرمستقیم در سیستم ظاهر می‌شود و تغییرات آن عمدتاً تحت‌تأثیر سایر متغیرهای کلیدی رخ می‌دهد.

به‌طور کلی، تحلیل میک مک نشان داد که متغیرهایی نظیر هزینه انرژی و آب، خشکسالی و تغییر اقلیم، محدودیت منابع آب، قوانین و سیاست‌های حمایتی و شرکت‌های دانش‌بنیان به‌عنوان محرک‌های اصلی آینده توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی آب‌محور شناخته می‌شوند. همچنین، هوش مصنوعی با وجود اثرگذاری مستقیم اندک، در بلندمدت ظرفیت بالقوه بالایی برای هدایت تغییرات دارد. در مقابل، عواملی همچون شبکه‌ها و انجمن‌های حمایتی بیشتر به‌عنوان متغیرهای تابع و پیامدی عمل می‌کنند.



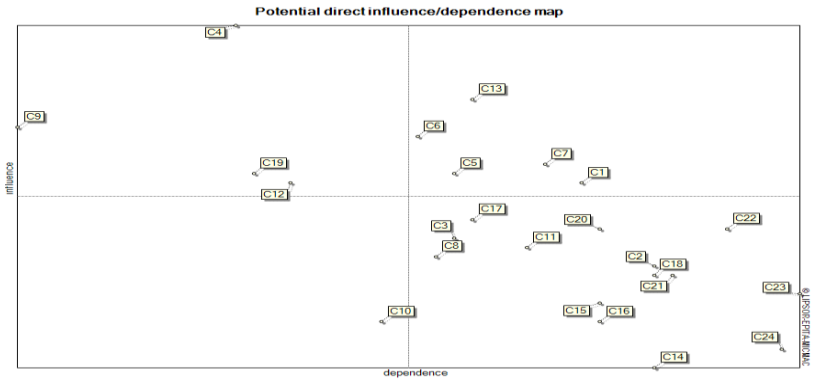
شکل ٤: نقشه تأثیرگذاری و وابستگی اثرات غیرمستقیم

Figure 4: Influence-Dependence Map of Direct Effects



شکل ۵: نقشه تأثیرگذاری و وابستگی اثرات مستقیم

Figure 5: Influence-Dependence Map of Indirect Effects

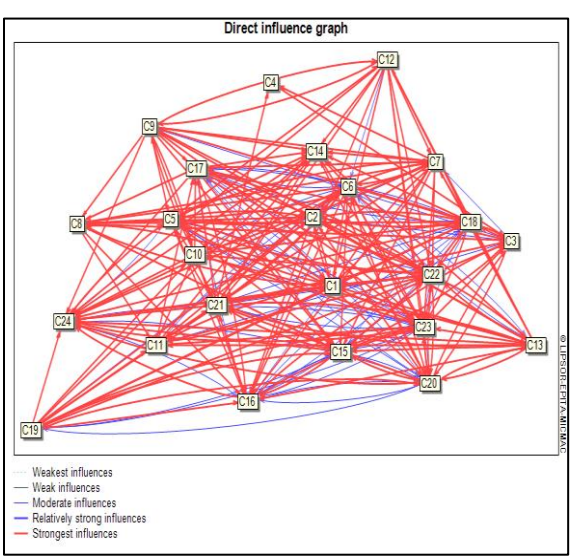


شکل ٦: نقشه تأثیرگذاری و وابستگی اثرات بالقوه

Figure 6: Influence-Dependence Map of Potential Effects

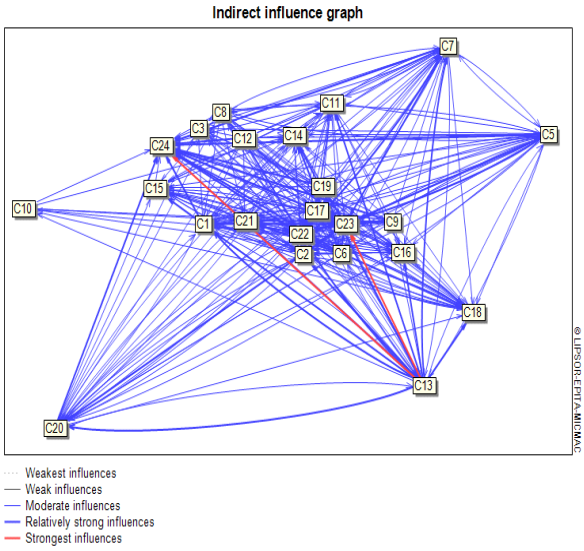
گراف اثرات مستقیم و غیرمستقیم معیارها

در شکل ۷ و شکل ۸ گراف اثرات مستقیم و غیر مستقیم معیارها براساس ۵۰ درصد شدت روابط آورده شده است بر این اساس در شکل (۷) که گراف اثرات مستقیم نشان از روابط در سطح بسیار قوی بین متغیرها است. در شکل (۸)، نیز روابط غیرمستقیم بین متغیرها در سطح نسبتاً قوی قرار دارد.



شکل ۸: گراف اثرات مستقیم معیارها

Figure 8: Graph of Indirect Effects among Criteria



شکل ۷: گراف اثرات غیرمستقیم معیارها

Figure 7: Graph of Direct Effects among Criteria

تدوین و تحلیل سناریوهای آینده توسعه فناوری‌های آب محور کشاورزی با بهره‌گیری از نرم‌افزار Scenario Wizard

سناریوهای این پژوهش با استفاده از خروجی نرم‌افزار Scenario Wizard تدوین و تحلیل شدند. به‌منظور شناسایی پیشران‌های کلیدی مؤثر بر آینده توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی، ابتدا تحلیل ساختاری با استفاده از نرم‌افزار MICMAC انجام گرفت. نتایج این تحلیل نشان داد که از میان متغیرهای شناسایی‌شده، پنج پیشران کلیدی و یک پیشران بالقوه بیشترین نقش را در شکل‌دهی آینده سیستم دارند. این پیشران‌ها عبارتند از:

هوش مصنوعی در کشاورزی (S1)

هزینه انرژی و آب (S2)

خشکسالی و تغییر اقلیم (S3)

منابع سطحی و زیرزمینی آب (S4)

قوانین و سیاست‌های حمایتی (S5)

تأسیس شرکت‌های دانش‌بنیان در حوزه فناوری‌های مدیریت آب (S6)

در مرحله بعد، برای هر یک از پیشران‌های منتخب، سه وضعیت آینده شامل خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه تعریف شد. این وضعیت‌ها با هدف نمایش طیف‌های مختلف تحول هر پیشران در افق زمانی پژوهش و براساس نظر خبرگان تدوین شدند. سپس ماتریس حالات و روابط سازگاری میان آنها به‌عنوان ورودی نرم‌افزار Scenario Wizard تعریف شد تا سناریوهای سازگار و محتمل آینده استخراج شوند. حالات تعریف‌شده برای هر یک از پیشران‌ها در جدول (۸) ارائه شده است.

پس از تعیین حالات، ماتریس تأثیر متقابل[1] برای این حالات تشکیل گردید. این ماتریس شامل بررسی میزان اثر هر حالت از یک معیار بر سایر حالات معیارهای دیگر بود که توسط خبرگان حوزه، براساس طیف عددی منفی ۳ تا مثبت ۳ (۳ تا ۳-) تکمیل شد. به‌منظور تحلیل کمی این روابط، داده‌های ماتریس در نرم‌افزار Scenario Wizard وارد شد.

جدول ۸: حالات مختلف معیارها براساس خوشبینانه، محتمل و بدبینانه

Table 8: Different States of Criteria Based on Optimistic, Probable, and Pessimistic Scenarios

معیار	وضعیت	نوع سناریو	نماد
هوش مصنوعی	توسعه گسترده و بومی‌سازی سیستم‌های هوش مصنوعی در مدیریت آبیاری، پیش‌بینی نیاز آبی و افزایش بهره‌وری کشاورزی	خوش‌بینانه	O1
	استفاده محدود و آزمایشی از فناوری‌های هوش مصنوعی در برخی مناطق و محصولات خاص	محتمل	L1
	عدم سرمایه‌گذاری و مقاومت ساختاری، استفاده بسیار ناچیز از هوش مصنوعی در کشاورزی	بدبینانه	P1
هزینه انرژی و آب	اصلاح الگوی مصرف و به‌کارگیری فناوری‌های کم‌مصرف، کاهش نسبی هزینه‌ها	خوش‌بینانه	O2
	افزایش تدریجی اما کنترل‌شده هزینه‌های انرژی و آب	محتمل	L2
	افزایش شدید هزینه انرژی و آب به دلیل کمبود منابع و فشار اقتصادی	بدبینانه	P2
خشکسالی و تغییر اقلیم	خشکسالی‌های ملایم و مدیریت‌شده با سازگاری کشاورزی	خوش‌بینانه	O3
	تداوم خشکسالی‌های متوسط و تغییرات اقلیمی با اثر منفی بر تولید	محتمل	L3
	خشکسالی‌های شدید و بحران اقلیمی تهدیدکننده امنیت غذایی	بدبینانه	P3
محدودیت منابع سطحی و زیرزمینی	احیای نسبی منابع با اجرای مدیریت پایدار آب و کاهش برداشت بی‌رویه	خوش‌بینانه	O4
	تداوم محدودیت منابع با امکان مدیریت نسبی	محتمل	L4
	افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش کیفیت منابع → تهدید جدی کشاورزی	بدبینانه	P4
قوانین و سیاست‌های حمایتی	تصویب و اجرای قوانین کارآمد برای حمایت از کشاورزی پایدار و فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی	خوش‌بینانه	O5

[1]. Cross Impact Matrix (CIM)

معیار	وضعیت	نوع سناریو	نماد
	حمایت‌های مقطعی و ناهماهنگ دولت از فناوری‌های آب‌محور	محتمل	L5
	نبود سیاست‌گذاری مؤثر یا اجرای ضعیف قوانین، مانع توسعه فناوری‌ها	بدبینانه	P5
تشکیل شرکت‌های دانش‌بنیان	رشد سریع شرکت‌های دانش‌بنیان فعال در حوزه کشاورزی آب‌محور و ورود آنها به بازار	خوش‌بینانه	O6
	فعالیت محدود و وابسته به حمایت‌های دولتی	محتمل	L6
	عدم شکل‌گیری یا شکست شرکت‌ها به دلیل کمبود سرمایه‌گذاری و زیرساخت	بدبینانه	P6

معرفی سناریوها

در جدول (۹) خلاصه‌ای از سناریوها و وضعیت هر کدام از معیارها آورده شده است.

جدول ۹: خلاصه معیارها و عوامل مؤثر بر آن

Table 9: Summary of Criteria and Their Influencing Factors

ردیف	عنوان پیشنهادی سناریو	هوش مصنوعی (S1)	هزینه انرژی و آب (S2)	خشکسالی و تغییر اقلیم (S3)	منابع سطحی و زیرزمینی (S4)	قوانین و سیاست‌ها (S5)	شرکت‌های دانش‌بنیان (S6)
۱	آینده نوآورانه و پایدار	O1	O2	O3	O4	O5	O6
۲	توسعه محدود با هزینه کنترل‌شده	L1	O2	O3	O4	L5	O6
۳	فشار هزینه و سیاست‌های ناکارآمد	L1	P2	O3	O4	L5	O6
٤	خشکسالی متوسط با حمایت محدود	L1	L2	L3	O4	L5	O6
٥	بحران هزینه و اقلیم ناپایدار	L1	P2	L3	O4	L5	O6
٦	بدترین حالت اقلیمی – فناورانه شکننده	L1	P2	P3	O4	L5	O6
۷	فشار منابع و هزینه‌های بالا	L1	P2	L3	L4	L5	O6
۸	خشکسالی شدید همراه با ضعف نهادی	L1	P2	P3	L4	L5	O6
۹	تداوم خشکسالی با هزینه‌های بالا	L1	P2	O3	O4	L5	L6
۱۰	محدودیت‌های نهادی و انرژی	L1	L2	L3	O4	L5	L6
۱۱	فشار مالی و خشکسالی پایدار	L1	P2	L3	O4	L5	L6
۱۲	بحران چندبعدی با خشکسالی شدید	L1	P2	P3	O4	L5	L6
۱۳	شکست نوآوری و بحران منابع	L1	P2	L3	L4	L5	L6

فراوانی حالات متغیرها در سناریوهای آینده‌پژوهی

جدول (۱۰) توزیع درصدی فراوانی هر وضعیت را برای شش متغیر اصلی پژوهش (هوش مصنوعی، هزینه انرژی و آب، خشکسالی و تغییر اقلیم، محدودیت منابع سطحی و زیرزمینی، قوانین و سیاست‌های حمایتی و تشکیل شرکت‌های دانش‌بنیان) ارائه می‌دهد. این جدول مبنای تحلیل عمیق‌تر سناریوهای آینده قرار گرفته است.

جدول ۱۰: فراوانی حالات متغیرها در سناریوهای آینده‌پژوهی

Table 10: Frequency of Variable States in Future Studies Scenarios

متغیر	خوش‌بینانه (O)	بدبینانه (P)	محتمل (L)	تفسیر
S1 – هوش مصنوعی	٪ ۷/۷	٪ ۹۲/۳	٪۰	غالب‌بودن حالت بدبینانه (توسعه‌نیافتگی هوش مصنوعی در کشاورزی)
S2 – هزینه انرژی و آب	٪۱۵/٤	٪۱۵/٤	٪۶۹/۲	بیشتر در حالت محتمل (افزایش تدریجی هزینه‌ها)
S3 – خشکسالی و تغییر اقلیم	٪۳۰/۸	٪٤٦/۲	٪۲۳/۱	بیشتر در حالت بدبینانه (تشدید بحران اقلیمی)
S4– محدودیت منابع آب سطحی و زیرزمینی	٪۷۶/۹	٪۲۳/۱	٪۰	بیشتر در حالت خوش‌بینانه (امکان مدیریت و احیای منابع)
S5 – قوانین و سیاست‌های حمایتی	٪ ۷/۷	٪۹۲/۳	٪۰	بیشتر در حالت بدبینانه (ضعف سیاست‌ها و قوانین حمایتی)
S6 – شرکت‌های دانش‌بنیان	٪۶۱/۵	٪۳۸/۵	٪۰	بیشتر در حالت خوش‌بینانه (رشد شرکت‌های نوآور)

نتایج حاصل از اجرای نرم‌افزار Scenario Wizard نشان می‌دهد که متغیرهای پژوهش در سناریوهای آینده‌پژوهی توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی آب‌محور در کشاورزی در استان کرمانشاه (به‌عنوان یک نمونه موردی از کشاورزی ایران)، دارای توزیع متفاوتی از نظر وضعیت خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه هستند. بررسی فراوانی حالت‌ها بیانگر آن است که برخی متغیرها بیشتر در وضعیت بدبینانه ظاهر شده‌اند؛ درحالی‌که برخی دیگر در مسیر خوش‌بینانه قرار گرفته و بعضی نیز حالت محتمل را تجربه کرده‌اند.

در متغیر هوش مصنوعی (S1)، بیش از ۹۲ درصد از سناریوها بر وضعیت بدبینانه (L1) تأکید دارند؛ به این معنا که توسعه کاربردهای هوش مصنوعی در کشاورزی ایران با موانع جدی همچون کمبود سرمایه‌گذاری، ضعف زیرساخت‌ها و مقاومت ساختاری مواجه خواهد بود. این امر نشان‌دهنده دشواری‌های موجود در زمینه دیجیتالی‌سازی و هوشمندسازی فرآیندهای آبیاری و مدیریت منابع آب است.

درخصوص هزینه انرژی و آب (S2)، نتایج حاکی از آن است که حدود ۶۹ درصد از حالت‌ها به سناریوی محتمل (P2) اختصاص دارد؛ بنابراین، می‌توان انتظار داشت روند افزایش هزینه‌ها تداوم یابد؛ اما این افزایش به‌صورت تدریجی و کنترل‌شده خواهد بود و نه در سطحی شدید یا کاملاً کاهشی.

بررسی متغیر خشکسالی و تغییر اقلیم (S3) نشان می‌دهد که حدود ٤٦ درصد از حالات در وضعیت بدبینانه (L3) قرار دارند. این یافته تأکید می‌کند که وقوع خشکسالی‌های شدید و بروز بحران‌های اقلیمی، تهدید جدی برای آینده کشاورزی ایران محسوب می‌شود و احتمال شکل‌گیری بحران‌های شدیدتر در حوزه آب وجود دارد.

در مقابل، متغیر محدودیت منابع آب سطحی و زیرزمینی (S4) بیش از ٧٦ درصد در حالت خوش‌بینانه (O4) ظاهر شده است. این موضوع بیانگر آن است که در صورت اجرای سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آب و کاهش برداشت‌های بی‌رویه، امکان احیای نسبی منابع آبی و بهبود وضعیت ذخایر وجود دارد.

متغیر قوانین و سیاست‌های حمایتی (S5) نیز همانند هوش مصنوعی، عمدتاً در وضعیت بدبینانه (L5) قرار دارد؛ به‌طوری‌که بیش از ۹۲ درصد از حالات به نبود سیاست‌گذاری‌های مؤثر و ضعف در اجرای قوانین حمایتی اختصاص یافته است. این نتیجه نشان‌دهنده آن است که ضعف سیاستی می‌تواند به‌عنوان یک مانع کلیدی در توسعه فناوری‌های آب‌محور مطرح باشد.

در نهایت، متغیر تشکیل شرکت‌های دانش‌بنیان (S6) بیش از ٦١ درصد در حالت خوش‌بینانه (O6) قرار گرفته است. این یافته حاکی از آن است که شرکت‌های دانش‌بنیان می‌توانند نقش مهمی در توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی در بخش کشاورزی ایفا کنند و در صورت حمایت مناسب، زمینه‌ساز نوآوری و افزایش بهره‌وری خواهند بود.

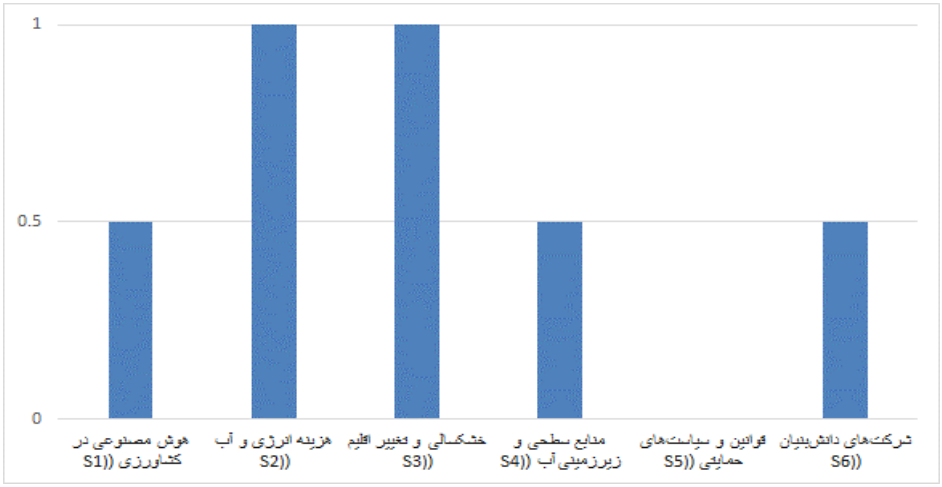
همچنین نتایج بخش «حضور حالات» نشان داد که از مجموع ۱۸ حالت ممکن، ١٤ حالت در سناریوهای سازگار حضور داشته‌اند (نسبت حضور ۸/۷۷ درصد). در این میان، برخی حالات محتمل (P1، P4، P5 و P6) اصلاً در ترکیب سناریوهای آینده ظاهر نشده‌اند. این مسئله بیانگر آن است که در ساختار آینده کشاورزی ایران، مسیرهای میانه‌روی (محتمل) در برخی متغیرها کمتر اهمیت دارند و تحولات عمدتاً به سمت حالات افراطی‌تر یعنی خوش‌بینانه یا بدبینانه متمایل خواهند شد.

به‌طور کلی، نتایج تحلیل نشان می‌دهد که آینده فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی ایران با مجموعه‌ای از فرصت‌ها و تهدیدها روبه‌روست. از یک سو، رشد شرکت‌های دانش‌بنیان و امکان مدیریت پایدار منابع آبی به‌عنوان فرصت‌های کلیدی مطرح هستند؛ از سوی دیگر، تداوم بحران اقلیمی، افزایش هزینه‌ها و ضعف سیاست‌های حمایتی از مهم‌ترین تهدیدهای پیش‌رو محسوب می‌شوند. این یافته‌ها اهمیت برنامه‌ریزی آینده‌نگرانه و تدوین سیاست‌های منسجم را برای بهره‌گیری از فرصت‌ها و کاهش اثر تهدیدها بیش از پیش آشکار می‌سازد.

تحلیل تأثیر عدم قطعیت‌ها در سناریوهای توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی آب‌محور

در فرآیند تحلیل سناریوها، شناسایی و ارزیابی میزان تأثیر عدم قطعیت‌ها بر شکل‌گیری سناریوهای آینده، یکی از مراحل کلیدی برای تبیین پویایی‌های سیستم مورد مطالعه محسوب می‌شود. منظور از «عدم قطعیت» متغیری است که وضعیت آتی آن مشخص نیست و هرگونه تغییر در آن می‌تواند ساختار و مسیر آینده سیستم را دگرگون سازد. در واقع، عدم قطعیت‌ها همان عوامل کلیدی هستند که تفاوت میان سناریوهای مختلف را ایجاد می‌کنند و موجب می‌شوند هر سناریو نمایانگر تصویری متفاوت از آینده باشد.

در پژوهش حاضر، شش عدم قطعیت اصلی در قالب معیارهای «هزینه انرژی و آب (S2)»، «خشکسالی و تغییر اقلیم (S3)»، «منابع سطحی و زیرزمینی آب (S4)»، «قوانین و سیاست‌های حمایتی (S5)» و «شرکت‌های دانش‌بنیان (S6)» و «هوش مصنوعی در کشاورزی (S1)» شناسایی شدند. هر یک از این متغیرها در سه وضعیت ممکن شامل خوش‌بینانه (O)، محتمل (L) و بدبینانه (P) تحلیل شدند. به‌منظور سنجش میزان تأثیر هر عدم قطعیت، تغییرپذیری وضعیت آن در میان سیزده سناریوی نهایی، بررسی و با استفاده از شاخص نرمال‌شده‌ای بین صفر تا یک محاسبه شد؛ به‌گونه‌ای که عدد صفر بیانگر تأثیر حداقلی و عدد یک نشان‌دهنده بیشترین نقش در تمایز سناریوها است.



شکل ۹: تحلیل تأثیر عدم قطعیت‌ها در سناریوهای توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی آب‌محور

Figure 9: Analysis of the Impact of Uncertainties in Water-Centric Smart Agricultural Water Management Technology Development Scenarios

شکل ۹ میزان تأثیر هر یک از عدم قطعیت‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، متغیرهای «هزینه انرژی و آب (S2)» و «خشکسالی و تغییر اقلیم (S3)» بیشترین میزان تأثیر را با مقدار شاخص ۱/۰ دارند. این دو عامل، بیشترین تغییر وضعیت را در میان سناریوهای تولیدشده داشته و در تعیین ماهیت سناریوهای خوش‌بینانه یا بدبینانه نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نوسانات هزینه‌های انرژی و آب، و شدت تغییرات اقلیمی، محرک‌های اصلی در آینده کشاورزی آب‌محور استان کرمانشاه خواهند بود. به عبارت دیگر، هرگونه تغییر در روند قیمت انرژی و آب یا تشدید خشکسالی می‌تواند مسیر توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی آبی را به‌طور کامل تغییر دهد.

از سوی دیگر، متغیرهای «منابع سطحی و زیرزمینی آب (S4)»، «شرکت‌های دانش‌بنیان (S6)» و «هوش مصنوعی در کشاورزی (S1)» دارای شاخص تأثیر متوسط (۰/۵) هستند؛ این بدان معناست که هرچند وضعیت این عوامل نیز در برخی سناریوها متفاوت است؛ اما تأثیر آنها بر تمایز کلی سناریوها نسبتاً محدودتر است. در واقع، این متغیرها در آینده محتمل کشاورزی ایران نقش تقویتی دارند و در صورت ایجاد بسترهای مناسب، می‌توانند اثرات تهدیدهای اصلی (مانند هزینه انرژی یا تغییر اقلیم) را تا حدودی کاهش دهند.

در نهایت، متغیر «قوانین و سیاست‌های حمایتی (S5)» با شاخص تأثیر صفر (۰/۰) کمترین نقش را در تمایز میان سناریوها ایفا کرده است. این موضوع به آن معناست که وضعیت سیاست‌های حمایتی در تمامی سناریوها تقریباً مشابه بوده و تغییر محسوسی نداشته است؛ درنتیجه، می‌توان نتیجه گرفت که سیاست‌گذاری‌های حمایتی در وضعیت فعلی از پویایی و تنوع کافی برای تأثیرگذاری بر مسیر آینده برخوردار نیستند و لازم است در این حوزه بازنگری جدی صورت گیرد.

به‌طور کلی، نتایج تحلیل تأثیر عدم قطعیت‌ها (شکل ۹) نشان می‌دهد که از میان شش عدم قطعیت کلیدی، دو متغیر «هزینه انرژی و آب» و «خشکسالی و تغییر اقلیم» با بالاترین شاخص تأثیر، نقش تعیین‌کننده‌ای در تمایز سناریوهای سیزده‌گانه دارند. این یافته با نتایج تحلیل ساختاری MICMAC نیز همسو است؛ زیرا معیار «هزینه انرژی و آب» در جدول (٦) نیز از رتبه‌های بالای تأثیرگذاری مستقیم و غیرمستقیم برخوردار بود؛ هم‌راستایی این دو روش مستقل، اعتبار درونی یافته‌ها را تقویت می‌کند. متغیرهای «منابع سطحی و زیرزمینی آب»، «شرکت‌های دانش‌بنیان» و «هوش مصنوعی» با شاخص تأثیر متوسط، بیشتر نقش تعدیل‌کننده دارند و می‌توانند شدت اثرات دو محرک اصلی را کاهش یا تقویت کنند، بدون آنکه به‌تنهایی مسیر سناریوها را تغییر دهند.

نکتهٔ شایان توجه، جایگاه متغیر «قوانین و سیاست‌های حمایتی» با شاخص تأثیر صفر است. این عدد پایین به معنای بی‌اهمیت بودن این متغیر نیست، بلکه ناشی از آن است که وضعیت این متغیر در بیش از ۹۲ درصد سناریوهای سازگار به‌طور یکنواخت در حالت بدبینانه باقی مانده است (جدول ۱۰)؛ به بیان دیگر، ضعف سیاست‌های حمایتی به‌جای آنکه عاملی تمایزبخش میان سناریوها باشد، به یک قید ساختاری ثابت در کل سیستم بدل شده است. این تفسیر با رتبهٔ نخست معیار «حکمرانی» در تأثیرگذاری مستقیم و غیرمستقیم (جدول ٦) نیز سازگار است و نشان می‌دهد ضعف مزمن حکمرانی، عملکرد سایر متغیرها از جمله محرک‌های اصلی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد.

بر این اساس، پایداری آیندهٔ کشاورزی آب‌محور در استان کرمانشاه به دو سطح مرتبط از عدم قطعیت وابسته است: مدیریت پویای هزینه انرژی و آب و ریسک اقلیمی در سطح عملیاتی، و اصلاح بنیادین چارچوب حکمرانی و سیاست‌گذاری حمایتی در سطح ساختاری. ازاین‌رو، توصیهٔ سیاستی این پژوهش صرفاً به کنترل هزینه‌ها و مدیریت ریسک اقلیمی محدود نمی‌شود؛ بلکه بازطراحی نهادی و ایجاد انعطاف در چارچوب‌های قانونی را نیز به‌عنوان پیش‌نیاز تحقق سناریوهای خوش‌بینانهٔ توسعهٔ فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی ضروری می‌سازد.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی در استان کرمانشاه و تدوین سناریوهای آینده‌پژوهی انجام شد. یافته‌ها در دو سطح تحلیل ساختاری (MICMAC) و سناریوسازی (Scenario Wizard)به شرح زیر خلاصه می‌شوند.

یافته‌های حاصل از تحلیل MICMAC در این پژوهش که بر پایه نقشه‌های تأثیرگذاری و وابستگی و گراف‌های اثرات مستقیم و غیرمستقیم استوار است، نقش کلیدی متغیرهایی نظیر هزینه انرژی و آب (C6)، خشکسالی و تغییر

اقلیم (C9)، محدودیت منابع سطحی و زیرزمینی (C10)، قوانین و سیاست‌های حمایتی (C12) و تشکیل شرکت‌های دانش‌بنیان (C19) را به‌عنوان محرک‌های راهبردی در توسعه فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی آب‌محور کشاورزی استان کرمانشاه برجسته می‌سازد. این متغیرها در ناحیه بالا – چپ (تأثیرگذاری بالا، تأثیرپذیری پایین) قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده ظرفیت آنها برای ایجاد تحولات گسترده در سیستم بدون وابستگی زیاد به عوامل دیگر است. در مقابل، متغیر هوش مصنوعی (C4) در ناحیه پایین – چپ (تأثیرگذاری و تأثیرپذیری پایین) جای گرفت که نشانگر عدم بهره‌گیری عملیاتی از ظرفیت‌های آن در شرایط جاری است؛ با این حال، تحلیل اثرات بالقوه (شکل ٦ و الگوی کدهای P در جدول ٤)، پتانسیل بلندمدت این فناوری برای تبدیل‌شدن به یک موتور محرک را تأیید می‌کند. به‌طور مشخص، این نتیجه‌گیری بر پایه ماتریس اثرات بالقوه MICMAC استوار است که از روابط کدگذاری‌شده با نماد P در جدول (٤) ساخته می‌شود؛ در سطر معیار هوش مصنوعی (C٤)، ۲۱ از ۲۳ رابطه با سایر معیارها با کد P (اثر بالقوه) ثبت شده‌اند؛ درحالی‌که تنها یک رابطه (با اینترنت اشیا، C۳) نمره قطعی دارد. این الگو مبنای کمی ادعای پتانسیل بلندمدت است؛ هرچند ماهیتی اکتشافی و مبتنی‌بر قضاوت خبرگی دارد. شبکه‌ها و انجمن‌های حمایتی (C14) نیز در نقشه غیرمستقیم به ناحیه پایین – راست (تأثیرگذاری پایین، تأثیرپذیری بالا) منتقل شد که نقش تابعی و پیامدی این متغیر را در سیستم برجسته می‌سازد.

یافته‌های تحلیل MICMAC در پژوهش حاضر با نتایج پژوهش براتی و همکاران که با رویکرد ترکیبی AHP-MICMACدر سیستم کشاورزی ایران انجام شد، در یک نقطه مهم همخوانی دارد: در هر دو مطالعه، سیاست‌های اقتصادی و محدودیت‌های منابع آب به‌عنوان عوامل کلیدی و محرک اصلی سیستم شناسایی شدند (Barati et al., 2019, p. 33-34)؛ با این حال، تمایز اساسی میان دو پژوهش در این است که براتی و همکاران هوش مصنوعی را به‌عنوان متغیری وابسته‌تر ارزیابی کردند و بر روابط مستقیم تأکید داشتند؛ درحالی‌که پژوهش حاضر با تحلیل اثرات بالقوه، پتانسیل بلندمدت هوش مصنوعی را به‌عنوان محرکی نهفته برای مدیریت هوشمند آبیاری در شرایط اقلیمی ویژه کرمانشاه آشکار ساخت. این تفاوت را می‌توان به زمینه محلی استان کرمانشاه نسبت داد که با خشکسالی‌های شدیدتر و فشار بیشتر بر منابع آبی نسبت به میانگین کشوری مواجه است و همین موضوع ضرورت بهره‌گیری از راه‌حل‌های فناورانه پیشرفته‌تر را برجسته‌تر می‌سازد.

در مطالعه شیرمحمدی و همکاران که با رویکرد ترکیبی MICMAC و CIB برای شناسایی پیشران‌های مدیریت منابع آب در ایران انجام شد، خشکسالی، تغییر اقلیم و محدودیت منابع به‌عنوان محرک‌های اصلی شناسایی شدند که با موقعیت این متغیرها در ناحیه بالا – چپ پژوهش حاضر همسو است (Shirmohammadi et al., 2020, P. 1-9). با این حال، پژوهش حاضر از دو جهت از مطالعه مذکور فراتر می‌رود: نخست، با ادغام اثرات غیرمستقیم نشان می‌دهد که شرکت‌های دانش‌بنیان می‌توانند از طریق نوآوری در آبیاری هوشمند، تعاملات پویا و زنجیره‌های تأثیرگذاری پیچیده در ناحیه بالا – راست ایجاد کنند؛ دوم، با ارتباط‌دادن نتایج به سناریوهای عملیاتی مشخص برای استان کرمانشاه، پلی میان تحلیل ساختاری و سیاست‌گذاری محلی ایجاد می‌کند که در مطالعه شیرمحمدی و همکاران کمتر مورد توجه قرار گرفته بود.

از منظر جهانی، یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعه ژنو در زمینه تولید پایدار کشاورزی همسویی درخور توجهی دارد که فناوری‌های هوشمند مدیریت آب را با رویکرد MICMAC به‌عنوان متغیرهایی با تأثیرگذاری بلندمدت شناسایی کرد (Zhu, 2019, p. 124). تفاوت اصلی در این است که مطالعه مذکور و پژوهش‌هایی نظیر بیورنلوند و بیورنلوند در کشورهای با منابع آبی پایدارتر، بر کارایی فناوری به‌عنوان عامل مرکزی تمرکز دارند (Bjornlund & Bjornlund, 2019, p. 39)، درحالی‌که پژوهش حاضر نشان می‌دهد در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند کرمانشاه، هزینه انرژی و آب به‌مثابه محرکی ساختاری بر فراتر از کارایی فنی عمل می‌کند و شرط لازم برای هرگونه تحول فناورانه است. این یافته با روند جهانی به سمت ادغام MICMAC با ابزارهای آینده‌پژوهی برای کشاورزی پایدار مناطق نیمه‌خشک همخوانی دارد. همچنین یافته‌های این پژوهش با مطالعه ژانگ و همکاران در خصوص رقابت‌پذیری صنعت آب همسو است که بر تعاملات غیرخطی و نیاز به مدل‌های پویا برای بررسی اثرات بلندمدت تأکید می‌کند (Zhang et al., 2024, p. 49). این همسویی اهمیت مطالعات طولی برای پایش پویایی‌های زمانی تغییر اقلیم را در بستر کرمانشاه تأیید می‌کند. از سوی دیگر، یافته‌های مربوط به نقش محوری حکمرانی آب با آنچه (OECD, 2025, p. 51) درخصوص حکمرانی هوشمند آب به‌عنوان پیش‌نیاز کشاورزی دیجیتال مطرح کرده‌اند، انطباق کامل دارد.

به‌طور کلی، این تحلیل تأکید می‌کند که توسعه فناوری‌های آب‌محور نه تنها به عوامل فنی وابسته است، بلکه به شدت تحت تأثیر عوامل ساختاری (حکمرانی، سیاست‌ها) و زیست‌محیطی (هزینه‌ها، خشکسالی) قرار دارد. این روابط متقابل، ضرورت رویکردهای یکپارچه و آینده‌نگرانه را برای سیاست‌گذاران کشاورزی در حوزهٔ آب ایران آشکار می‌سازد. در چارچوب تحولات جهانی کشاورزی دیجیتال، نتایج تحلیل MICMAC نشان می‌دهد که آینده فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی صرفاً تابع توسعه تجهیزات آبیاری نیست، بلکه تحت تأثیر برهم‌کنش میان حکمرانی آب، ظرفیت‌های نوآوری دیجیتال، زیرساخت‌های داده و شدت تغییرات اقلیمی قرار دارد. در بسیاری از کشورهای پیشرو، گذار به سمت Digital Agriculture مبتنی بر ادغام اینترنت اشیا(IOT) ، هوش مصنوعی (AI) ، تحلیل کلان‌داده‌ها و سامانه‌های پشتیبان تصمیم در حال شکل‌گیری است و این فناوری‌ها به‌عنوان ابزارهای کلیدی سازگاری اقلیمی (Climate Adaptation) شناخته می‌شوند. بنابراین یافته‌های پژوهش حاضر را می‌توان در چارچوب گذار از مدیریت سنتی آب به حکمرانی هوشمند آب (Smart Water Governance) تفسیر کرد؛ گذاری که در آن داده، یادگیری ماشینی و تصمیم‌گیری مبتنی بر پیش‌بینی به اندازه زیرساخت‌های فیزیکی اهمیت پیدا می‌کنند (FAO, 2024, p. 25; OECD, 2025, p. 51).

نتایج تحلیل ساختاری و سناریونگاری نشان داد که آینده فناوری‌های هوشمند مدیریت کشاورزی ایران عمدتاً تحت تأثیر شش پیشران کلیدی شامل هوش مصنوعی، هزینه آب و انرژی، خشکسالی و تغییر اقلیم، منابع آب، سیاست‌های حمایتی و ظرفیت شرکت‌های دانش‌بنیان قرار دارد. برای تحلیل دقیق‌تر سناریوها لازم است ابتدا وضعیت موجود ایران در حوزه کشاورزی و منابع آب بررسی شود. در حال حاضر، ایران با مشکلات و روندهای زیر مواجه است:

هوش مصنوعی (S1): استفاده محدود و بیشتر در سطح آزمایشی و پژوهشی؛ هنوز فراگیر و بومی‌سازی نشده.

هزینه آب و انرژی (S2): روند افزایش هزینه‌ها مشهود است، گرچه دولت با یارانه‌ها بخشی از فشار را کنترل می‌کند.

خشکسالی و تغییر اقلیم (S3): ایران با خشکسالی‌های مکرر و کاهش بارش‌ها مواجه است، اغلب در سطح متوسط تا شدید.

منابع آب زیرزمینی (S4): افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و افت کیفیت منابع، به‌ویژه در دشت‌های مرکزی کشور.

سیاست‌ها و قوانین (S5): حمایت‌های دولت بیشتر مقطعی و ناهماهنگ است و سیاست‌گذاری بلندمدت قوی وجود ندارد.

شرکت‌های دانش‌بنیان (S6): تعدادشان رو به افزایش است؛ اما وابسته به حمایت‌های دولتی و محدود در مقیاس بازار.

با تطبیق این سناریوها بر وضعیت موجود استان کرمانشاه، پنج سناریو به‌عنوان محتمل‌ترین مسیرهای آینده شناسایی شدند. این سناریوها با تمرکز بر توسعه فناوری‌هایی مانند سامانه‌های آبیاری هوشمند (با استفاده از IoT و AI)، گلخانه‌های تابع اقلیم، مدل‌های پیش‌بینی آب‌وهوا، و فناوری‌های صرفه‌جویی در آب (مانند روش‌های به زراعی و اصلاح نباتات) طراحی شده‌اند. وجه مشترک این سناریوها استفاده محدود از فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی، فشارهای زیست‌محیطی و اقتصادی، و ضعف نهادی است که می‌تواند چالشی برای مدیریت فناوری در بخش آب و آبیاری باشد. با عناصر خلاقانه مانند فناوری‌های سبز مستقل از انرژی فسیلی و شبکه‌های همکاری جهانی، مسیرهای تحول با تمرکز بر بدبینانه برای هشدار، اما با نقاط خلاقانه برای الهام‌بخشی ترسیم می‌شود.

سناریو ۳: آینده فناوری‌های آب‌محور با فشار هزینه‌ها و سیاست‌های ناکارآمد توسعه

این سناریو، که بیشترین انطباق را با شرایط فعلی بخش کشاورزی ایران دارد، آینده‌ای را ترسیم می‌کند که در آن توسعه کشاورزی دیجیتال و فناوری‌های هوشمند مدیریت آب به دلیل کمبود سرمایه‌گذاری، ضعف زیرساخت‌های فناورانه، محدودیت دسترسی به داده‌های معتبر و ناکارآمدی سیاست‌های حمایتی با روندی کند مواجه است؛ درنتیجه، کاربرد فناوری‌هایی نظیر سامانه‌های آبیاری هوشمند، اینترنت اشیا و هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب محدود مانده است و تصمیم‌گیری‌های آبیاری همچنان عمدتاً بر تجربه کشاورزان متکی خواهد بود. استمرار این شرایط، تاب‌آوری اقلیمی بخش کشاورزی را کاهش می‌دهد و الگوهای سنتی مصرف آب را تداوم می‌بخشد.

از سوی دیگر، افزایش هزینه‌های آب و انرژی همراه با کاهش بارندگی، فشار اقتصادی چشمگیری بر تولیدکنندگان وارد می‌کند و مانع توسعه گسترده فناوری‌های نوین می‌شود. پیامد این وضعیت، محدودماندن فناوری‌ها در سطح پروژه‌های آزمایشی، کاهش بهره‌وری محصولات راهبردی و تشدید مهاجرت روستایی است.

با این حال، سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های سبز، توسعه شرکت‌های دانش‌بنیان و حمایت از سامانه‌های

مستقل از شبکه انرژی، مانند سامانه‌های خورشیدی برداشت آب جوی و گلخانه‌های هوشمند، می‌تواند مصرف آب را تا ٤٠ درصد کاهش دهد و تاب‌آوری بخش کشاورزی را ارتقا دهد؛ بنابراین، تحقق این مسیر مستلزم تمرکز سیاست‌گذاری بر توسعه فناوری‌های کم‌مصرف، ارتقاپذیر و چندمنظوره، همراه با تقویت زیرساخت‌های انسانی، اطلاعاتی و نهادی و ایجاد پیوند مؤثر میان نوآوری، سیاست‌گذاری و پذیرش اجتماعی فناوری است.

سناریو ٤: توسعه فناوری‌های آب‌محور در شرایط خشکسالی متوسط با حمایت محدود

این سناریو، بیانگر گذار تدریجی و قابل مدیریت بخش کشاورزی در شرایط تداوم خشکسالی متوسط، کاهش منابع آب و افزایش تدریجی هزینه‌های آب و انرژی است. اگرچه این شرایط فشار فزاینده‌ای بر نظام تولید کشاورزی وارد می‌کند، هنوز به مرحله بحران ساختاری نرسیده است. در چنین وضعیتی، فناوری‌های آب‌محور از جمله سامانه‌های پیش‌بینی خشکسالی مبتنی بر هوش مصنوعی، تحلیل کلان‌داده‌ها و سامانه‌های آبیاری دقیق، ظرفیت کاهش مصرف آب تا حدود ٤٠ درصد را دارند؛ بااین‌حال، ضعف سیاست‌گذاری، محدودیت حمایت‌های مالی و نبود هماهنگی نهادی، توسعه فراگیر این فناوری‌ها را با محدودیت مواجه می‌سازد.

این سناریو با مفهوم سازگاری با تغییر اقلیم (Climate Adaptation) همخوانی دارد و نشان می‌دهد که حرکت تدریجی به سوی فناوری‌های دیجیتال کم‌هزینه، نظیر حسگرهای هوشمند، سامانه‌های محلی اینترنت اشیا، اپلیکیشن‌های مدیریت مزرعه و مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی، می‌تواند زمینه شکل‌گیری کشاورزی دیجیتال تاب‌آور را فراهم سازد. شواهد پژوهشی نیز حاکی از آن است که این رویکرد در مناطق نیمه‌خشک، بهره‌وری آب را افزایش می‌دهد، آسیب‌پذیری اقلیمی را کاهش می‌دهد و تاب‌آوری معیشت کشاورزان را تقویت می‌کند.

سناریو ٥: فناوری‌های آب‌محور آینده در شرایط اقلیم ناپایدار و بحران هزینه

این سناریو یکی از پرریسک‌ترین آینده‌های محتمل بخش کشاورزی ایران را ترسیم می‌کند که در آن تشدید خشکسالی، افزایش هزینه‌های آب و انرژی، ضعف سیاست‌های حمایتی و محدودیت توسعه فناوری، ظرفیت سازگاری بخش کشاورزی را کاهش می‌دهد. در چنین شرایطی، کاهش منابع آب و افزایش هزینه‌های تولید، به‌ویژه در مزارع کوچک و متوسط، امکان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین مدیریت آب را محدود و آسیب‌پذیری اقتصادی و معیشتی بهره‌برداران را تشدید می‌کند.

اگرچه فناوری‌هایی نظیر گلخانه‌های هوشمند، سامانه‌های هیدروپونیک، مدیریت ماهواره‌ای منابع آب و کاربردهای هوش مصنوعی در پایش و پیش‌بینی خشکسالی و نیاز آبی محصولات، ظرفیت بالایی برای افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف آب دارند، ضعف حکمرانی آب، محدودیت زیرساخت‌های داده، کمبود سازوکارهای مالی و هزینه بالای استقرار فناوری، مانع از توسعه گسترده آنها می‌شود؛ درنتیجه، این فناوری‌ها عمدتاً در سطح پروژه‌های محدود باقی می‌مانند و تحول ساختاری در مدیریت منابع آب کشاورزی تحقق نمی‌یابد.

سناریو ۹: آینده فناوری‌های آب‌محور با تداوم خشکسالی با هزینه‌های بالا

این سناریو یکی از بحرانی‌ترین آینده‌های محتمل برای بخش کشاورزی ایران را ترسیم می‌کند که در آن تداوم خشکسالی، افزایش هزینه‌های آب و انرژی، محدودیت توسعه فناوری و ضعف شرکت‌های دانش‌بنیان، ظرفیت سازگاری بخش کشاورزی را به‌طور درخور توجهی کاهش می‌دهد. تداوم کاهش منابع آب، افزایش موج‌های گرمایی و ناکارآمدی سیاست‌های حمایتی، توسعه و مقیاس‌پذیری فناوری‌های نوین مدیریت آب را محدود می‌کند و وابستگی به شیوه‌های سنتی را تداوم می‌بخشد.

در این شرایط، راهکارهای آب‌محور عمدتاً بر فناوری‌های کم‌هزینه، شامل به‌زراعی، مدیریت آبیاری مبتنی بر رطوبت خاک و توسعه ارقام مقاوم به خشکی، متمرکز می‌شوند؛ بااین‌حال، افزایش هزینه‌های تولید و کمبود ابزارهای حمایتی، از جمله بیمه خشکسالی، اعتبارات بلندمدت و مشوق‌های سرمایه‌گذاری، مانع از گسترش این فناوری‌ها در مقیاس گسترده خواهد شد. پیامد این روند، کاهش بهره‌وری و تولید محصولات کشاورزی، تشدید ناامنی غذایی، افزایش قیمت مواد غذایی، مهاجرت روستایی و در سناریوی بدبینانه، کاهش حدود ۲۰ درصدی تولید است.

سناریو ۱۰: آینده فناوری‌های آب‌محور با محدودیت‌های نهادی و انرژی

این سناریو وضعیتی را ترسیم می‌کند که در آن، با وجود پایداری نسبی منابع آب و نبود بحران شدید آبی، محدودیت‌های نهادی، افزایش تدریجی هزینه‌های آب و انرژی، ضعف سیاست‌های حمایتی و ظرفیت محدود شرکت‌های دانش‌بنیان، مانع توسعه فناوری‌های نوین مدیریت آب می‌شود. اگرچه افزایش تدریجی هزینه‌ها می‌تواند انگیزه بهینه‌سازی مصرف منابع را ایجاد کند، ضعف نهادهای مالی، اعتباری و سازوکارهای تجاری‌سازی، مانع از تبدیل نوآوری‌های فناورانه به تحول پایدار در بخش کشاورزی خواهد شد. در این شرایط، توسعه فناوری‌هایی مانند سامانه‌های آبیاری هوشمند و زیرسطحی و کاربرد اینترنت اشیا در مدیریت آبیاری با کندی پیش می‌رود و منافع آن عمدتاً به بهره‌برداران برخوردار محدود می‌شود. پیامد این روند، تشدید نابرابری‌های منطقه‌ای، افزایش آسیب‌پذیری اقتصادی کشاورزان و کاهش اثربخشی سرمایه‌گذاری‌های فناورانه است.

در مقابل، اصلاح حکمرانی آب، تقویت ظرفیت تجاری‌سازی نوآوری، توسعه ابزارهای مالی هدفمند و ارتقای هماهنگی میان نهادهای متولی آب و کشاورزی، می‌تواند زمینه استقرار تدریجی فناوری‌های هوشمند مدیریت آب را فراهم سازد. این سناریو نشان می‌دهد که موفقیت فناوری‌های آب‌محور بیش از توسعه فناوری، به کیفیت حکمرانی آب، اشتراک‌گذاری داده‌ها، هماهنگی نهادی و مشارکت فعال بهره‌برداران وابسته است؛ ازاین‌رو، گذار به حکمرانی هوشمند آب (Smart Water Governance) به‌عنوان پیش‌شرط توسعه پایدار کشاورزی دیجیتال و مدیریت هوشمند منابع آب مطرح می‌شود.

این سناریوها نشان می‌دهند که آینده کشاورزی آب‌محور در استان کرمانشاه در صورت ادامه روند فعلی، با چالش‌های جدی روبرو است، و تحقق پتانسیل فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی نیازمند سیاست‌گذاری منسجم، سرمایه‌گذاری پایدار و همکاری بین‌المللی است.

در تحلیل این سناریو، مشخص می‌شود که ترکیب عواملی نظیر نابرابری در توزیع آب، وقوع خشکسالی‌های با شدت متوسط و ضعف نهادی، به‌طور مستقیم به تشدید نابرابری‌های اجتماعی و بحران‌های اجتماعی – اقتصادی منجر خواهد شد؛ بااین‌حال، نقطه قوت استراتژیک در این شرایط، ورود کارآمد بخش خصوصی به بازار آب دیجیتال از طریق برون‌سپاری تخصص از طریق بهره‌گیری از خدمات تخصصی و مشاوره‌ای بین‌المللی است. این مداخله باید با سرمایه‌گذاری هدفمند در زیرساخت‌های انرژی (نظیر استفاده از پنل‌های خورشیدی برای تأمین انرژی شبکه‌های اینترنت اشیا یا IoT) به‌عنوان واسطه عملیاتی همراه شود. هنگامی که این مداخلات فناورانه با همکاری‌های منطقه‌ای هدفمند (مانند تبادل فناوری‌های آبیاری میان ایران و ترکیه) ترکیب شوند، این هم‌افزایی فناورلنه و انسانی در حکمرانی آب می‌تواند با بهبود بهره‌وری و افزایش نرخ بازیافت منابع آبی، زمینه کاهش هزینه‌های مرتبط با مدیریت و تأمین آب را فراهم کند.

تحلیل مسیرهای گذار

تحلیل مسیرهای گذار به بررسی چگونگی حرکت نظام کشاورزی کرمانشاه از وضعیت فعلی به سوی آینده‌های محتمل می‌پردازد. هدف از این تحلیل، درک پیشران‌ها، موانع و نیروهای مؤثری است که موجب انتقال سیستم از وضعیت موجود به یکی از سناریوهای پیش‌بینی‌شده می‌شوند. در واقع، مسیر گذار بیانگر زنجیره‌ای از تغییرات تدریجی یا جهشی در ابعاد فناورانه، نهادی، اقتصادی و زیست‌محیطی است که می‌تواند منجر به تحقق هر سناریو شود. در ادامه، مسیرهای گذار از وضعیت فعلی به هر یک از سناریوهای محتمل به صورت خلاصه در قالب جدول (۱۱) ارائه شده است.

جدول ۱۱: خلاصه مسیرهای گذار هر سناریو

Table 11: Summary of transition paths for each scenario

سناریو ۳: فشار هزینه و سیاست‌های ناکارآمد	تداوم روندهای اقتصادی و نهادی موجود شکل می‌گیرد؛ به‌گونه‌ای که افزایش مستمر هزینه‌های آب و انرژی، ضعف سیاست‌های حمایتی و بی‌ثباتی تصمیم‌گیری، بهره‌برداران را به برداشت بیشتر از منابع آب و کاهش سرمایه‌گذاری در فناوری‌های هوشمند سوق می‌دهد. هرچند شرکت‌های دانش‌بنیان به فعالیت خود ادامه می‌دهند، نبود حمایت پایدار اثربخشی آنها را محدود می‌کند. افزایش سالانه ۲۰ تا ۳۰ درصدی هزینه‌های آب و انرژی بدون رشد متناسب بهره‌وری، احتمال کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی تولید محصولات کشاورزی تا افق ۱٤۱۰ را افزایش می‌دهد.
سناریوی ٤: خشکسالی متوسط با حمایت محدود	این مسیر بر اثر تداوم خشکسالی‌های خفیف تا متوسط و اجرای سیاست‌های حمایتی کوتاه‌مدت دولت ایجاد می‌شود. حمایت‌های مقطعی از بروز بحران شدید جلوگیری می‌کند؛ اما ناهماهنگی نهادی و محدودیت سرمایه‌گذاری، توسعه فناوری‌های مدیریت آب را با چالش مواجه می‌سازد. با توجه به پیش‌بینی کاهش ۲۵ تا ٤۰ درصدی بارش در دهه آینده، این مسیر از احتمال وقوع نسبتاً بالایی برخوردار بوده و بیانگر شرایطی با خشکسالی مزمن اما قابل مدیریت است.
سناریوی ۵: بحران هزینه و اقلیم ناپایدار	هم‌زمانی فشارهای اقتصادی ناشی از افزایش هزینه‌های آب و انرژی با تشدید تغییرات اقلیمی، این مسیر را شکل می‌دهد. کاهش بارندگی، افزایش دما و افت شدید منابع آب زیرزمینی، در کنار ضعف سیاست‌گذاری و

	سرمایه‌گذاری، توان فناوری را برای کاهش پیامدهای اقلیمی محدود می‌کند. پیامدهای این مسیر شامل کاهش سطح زیرکشت، افزایش وابستگی غذایی و تشدید مهاجرت روستایی است.
سناریوی ۹: تداوم خشکسالی با هزینه‌های بالا	در این مسیر، تداوم خشکسالی‌های شدید همراه با افزایش هزینه‌های تولید و محدودیت منابع مالی، موجب خروج بخشی از کشاورزان از چرخه تولید و کاهش فعالیت شرکت‌های دانش‌بنیان می‌شود. براساس گزارش‌های موجود، احتمال افزایش ورشکستگی واحدهای تولیدی کشاورزی به بیش از ۲۵ درصد وجود دارد.
سناریوی ۱۰: محدودیت‌های نهادی و انرژی	این مسیر از ضعف حکمرانی آب و انرژی، ناهماهنگی نهادی و نبود راهبرد ملی برای توسعه فناوری‌های آب‌محور ناشی می‌شود. کاهش سرمایه‌گذاری بلندمدت، ظرفیت نوآوری را تضعیف می‌کند و روند افت منابع آبی را تداوم می‌بخشد. با استمرار رشد سالانه مصرف انرژی در بخش کشاورزی، شدت مصرف انرژی تا افق ۱۴۱۰ می‌تواند به حدود ۱/۵ برابر مقدار فعلی برسد.

نتایج این پژوهش با نتایج مطالعات بین‌المللی همخوانی درخور توجهی دارد (Khan et al., 2021, p.1-31) نشان دادند که موفقیت فناوری‌های هوشمند مدیریت آب به وجود زیرساخت‌های دیجیتال، سیاست‌های حمایتی و پذیرش بهره‌برداران وابسته است؛ موضوعی که در تمامی سناریوهای این پژوهش نیز به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده مشاهده شد. همچنین نتایج با یافته‌های (Ingrao et al., 2023, P. 1-16) همسو است که توسعه سامانه‌های کشاورزی هوشمند و گلخانه‌های پیشرفته را مشروط به حمایت‌های نهادی، سرمایه‌گذاری پایدار و حکمرانی یکپارچه منابع آب می‌دانند. از سوی دیگر (Qian et al., 2024, P. 1-23) تأکید می‌کنند که هوش مصنوعی و تحلیل کلان‌داده‌ها می‌توانند نقش مهمی در پیش‌بینی خشکسالی و بهینه‌سازی مصرف آب ایفا کنند؛ بااین‌حال، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد در کشورهای در حال توسعه، شکاف میان ظرفیت فناورانه و قابلیت بهره‌برداری عملی همچنان یک چالش اساسی است. همچنین یافته‌های پژوهش با نتایج (Wanyama et al., 2024, p. 412) مبنی بر نقش شبکه‌های نوآوری، همکاری‌های چندبازیگری و شرکت‌های دانش‌بنیان در افزایش تاب‌آوری کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی و محدودیت‌های ناشی از کمبود منابع مطابقت دارد.

تفاوت اصلی نتایج این پژوهش با برخی مطالعات بین‌المللی در آن است که بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده در کشورهای توسعه‌یافته بر توسعه فناوری تمرکز دارند؛ درحالی‌که نتایج حاضر نشان می‌دهد در شرایط ایران، محدودیت‌های نهادی، اقتصادی و سیاستی بیش از خود فناوری بر آینده مدیریت آب کشاورزی اثرگذارند. به عبارت دیگر، چالش اصلی نه کمبود فناوری، بلکه ضعف در انتقال، تجاری‌سازی، مقیاس‌پذیری و پذیرش فناوری است.

از منظر سیاستی، نتایج نشان می‌دهد که تمرکز صرف بر توسعه فناوری‌های آب‌محور نمی‌تواند به ارتقای تاب‌آوری کشاورزی منجر شود. موفقیت این فناوری‌ها مستلزم اصلاح حکمرانی آب، ایجاد مشوق‌های اقتصادی برای پذیرش فناوری، توسعه زیرساخت‌های داده‌ای و دیجیتال، حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان، گسترش نظام‌های بیمه اقلیمی و تسهیل دسترسی کشاورزان به منابع مالی است. همچنین یکپارچه‌سازی فناوری‌های هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، سنجش از دور و سامانه‌های تصمیم‌یار با برنامه‌ریزی کشاورزی و مدیریت منابع آب باید به‌عنوان یک اولویت راهبردی مورد توجه قرار گیرد.

به‌طور کلی، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که آینده مدیریت آب کشاورزی در استان کرمانشاه بیش از آنکه به توسعه منفرد تجهیزات آبیاری وابسته باشد، به میزان موفقیت گذار به کشاورزی دیجیتال، توسعه سامانه‌های مبتنی بر

اینترنت اشیا و هوش مصنوعی، ارتقای ظرفیت سازگاری اقلیمی و استقرار حکمرانی هوشمند آب وابسته است. از منظر آینده‌پژوهی، عدم‌قطعیت‌های ناشی از تغییر اقلیم، تحولات فناورانه، سیاست‌گذاری و شرایط اقتصادی می‌توانند مسیرهای متفاوتی را برای توسعه این فناوری‌ها رقم بزنند؛ بنابراین راهبردهای آینده باید به جای تمرکز صرف بر زیرساخت‌های آبیاری، بر ایجاد اکوسیستم یکپارچه «Climate-Smart Digital Agriculture» مبتنی بر داده، نوآوری و مشارکت ذی‌نفعان متمرکز شوند.

تحلیل مسیرهای گذار نشان داد که سناریو ٤ محتمل‌ترین مسیر گذار از وضعیت فعلی استان کرمانشاه است؛ زیرا با سطح نیمه‌مدرن فناوری موجود و توان مالی متوسط کشاورزان انطباق بیشتری دارد. در این چارچوب، آبیاری هوشمند نیمه‌متمرکز مبتنی بر سنسورهای ارزان‌قیمت و اینترنت اشیا محلی به‌عنوان فناوری پیشنهادی معرفی شد که قادر است ۳۰ تا ٤۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب را بدون نیاز به زیرساخت‌های پیشرفته ارتباطی یا سرمایه‌گذاری کلان محقق سازد.

انتخاب آبیاری هوشمند نیمه‌متمرکز به‌عنوان فناوری پیشنهادی، حاصل تلفیق سه‌سویه یافته‌های پژوهش است و نه استخراج مستقیم از یک تحلیل واحد. از یک سو، تحلیل ساختاری MICMAC نشان داد که هزینه انرژی و آب (C٦) و خشکسالی و تغییر اقلیم (C۹) به‌عنوان پیشران‌های راهبردی سیستم، بالاترین تأثیرگذاری و کمترین تأثیرپذیری را دارند؛ این یافته الزام می‌کند که هر فناوری پیشنهادی مستقیماً کاهش هزینه و مصرف آب را هدف قرار دهد. از سوی دیگر، تحلیل فراوانی حالات پیشران‌ها در خروجی Scenario Wizard (جدول ۱۰) نشان داد که متغیر هوش مصنوعی (S۱) در بیش از ۹۲ درصد و متغیر سیاست‌های حمایتی (S٥) نیز در بیش از ۹۲ درصد سناریوها در وضعیت بدبینانه قرار دارند؛ حال آنکه متغیر شرکت‌های دانش‌بنیان (S٦) در اکثریت سناریوها وضعیت خوش‌بینانه را نشان می‌دهد. این ترکیب به‌صورت ضمنی راهکارهای متمرکز، پرهزینه و متکی به زیرساخت گسترده هوش مصنوعی یا حمایت مستمر دولتی را کم‌احتمال می‌سازد و در مقابل، راهکارهای غیرمتمرکز و کم‌هزینه متکی بر نوآوری بخش خصوصی را تقویت می‌کند. در نهایت، تحلیل مسیرهای گذار، سناریو ٤ (خشکسالی متوسط با حمایت محدود) را به این دلیل به وضعیت فعلی کرمانشاه نزدیک‌تر از سایر سناریوها معرفی کرد که با سطح فناوری نیمه‌مدرن موجود و توان مالی متوسط کشاورزان منطقه هم‌خوانی بیشتری دارد. بر همین اساس، فناوری پیشنهادی باید هم‌زمان سه شرط را برآورده سازد: کاهش مصرف آب و هزینه انرژی (براساس پیشران‌های راهبردی)، عدم اتکا به زیرساخت پیشرفته هوش مصنوعی یا حمایت نهادی گسترده (براساس فراوانی حالات بدبینانه)، و تطابق با ظرفیت فناورانه و مالی موجود کشاورزان (براساس نزدیکی سناریو ٤ به وضع موجود). آبیاری هوشمند نیمه‌متمرکز مبتنی بر سنسورهای ارزان‌قیمت و اینترنت اشیا محلی، تنها گزینه‌ای است که هر سه شرط را به‌طور هم‌زمان پوشش می‌دهد.

با توجه به شرایط موجود و مسیر گذار سناریوها، آبیاری هوشمند نیمه‌متمرکز مبتنی بر سنسورهای ارزان‌قیمت و IoTمحلی همان فناوری پیشنهادی است؛ این سیستم یک راهکار مقاوم (Resilient) و مقرون به صرفه-(Cost Effective)است که با اتکا به داده‌های سنسورهای نزدیک به گیاه و مدیریت محلی مبتنی بر اینترنت اشیا، دقت آبیاری را بهبود می‌بخشد و به افزایش بهره‌وری آب در مناطقی که زیرساخت‌های ارتباطی یا مالی پیشرفته ندارند،

کمک می‌کند. در ادامه ویژگی‌های این نوع سیستم در جدول (۱۲) آمده است.

جدول ۱۲: ویژگی‌های سیستم آبیاری هوشمند نیمه متمرکز

Table 12: Features of a semi-centralized smart irrigation system

هزینه متوسط	سازگاری با توان مالی کشاورزان متوسط
نیاز به زیرساخت محدود	استفاده از شبکه‌های موبایل موجود (GPRS/4G)
قابلیت همکاری گروهی	وجود یک ایستگاه مرکزی برای چند مزرعه
آموزش‌پذیری بالا	قابل اجرا بودن با برنامه‌های ترویجی جهاد کشاورزی
صرفه جویی ۴۰-۳۰٪ در آب	همسو با اهداف بهره‌وری
بومی‌سازی توسط شرکت‌های دانش بنیان	قابل تولید در پارک‌های علم و فناوری کرمانشاه

بنابراین با توجه نتایج، مسیر تحول آبیاری هوشمند برای کشاورزی بر پایه نتایج مدل‌های تحلیلی تدوین شده و شامل نقشه راه فناوری است.

دستاوردهای تحقیق

مطالعه حاضر نه‌تنها وضعیت کنونی فناوری‌های آبیاری در یکی از مناطق حساس کشور را ترسیم می‌کند، با ارائه چارچوبی تحلیلی، امکان تصمیم‌گیری داده محور و باز طراحی استراتژی‌های بهبود بهره‌وری منابع آب در بخش کشاورزی را فراهم می‌آورد؛ به‌طوری‌که می‌تواند مبنایی برای رصد پیشرفت فناوری‌های آبیاری، سیاست‌گذاری هدفمند و طراحی چارچوب‌های ارزشیابی بومی در سایر مناطق با شرایط اقلیمی و ساختاری مشابه باشد؛ بنابراین، با توجه به تأثیر تغییرات اقلیمی (مانند خشکسالی در کرمانشاه)، اصلاحات نهادی باید بر تاب‌آوری تمرکز کند. ادغام رویکردهای یکپارچه مدیریت منابع آب (IWRM) در برنامه‌های توسعه استانی، با تأکید بر اصلاحات نهادی برای شهرنشینی و کشاورزی می‌تواند راهکار آن باشد. نتایج حاصل از این پژوهش، دو عامل کلیدی کیفیت حکمرانی و سازوکار نهادی مدیریت منابع آب، و سیاست‌گذاری هدفمند هزینه‌های انرژی را به‌عنوان اهرم‌های اصلی برای برانگیختن موج تحول در این بخش معرفی کرده‌اند. همچنین سناریوهای پویا و محتمل آینده مدل‌سازی و ترسیم شدند تا مسیرهای پیش‌روی کشاورزی ایران در مواجهه با تغییرات اقلیمی و فناوری‌های هوشمند مدیریت آب کشاورزی تعیین شدند.

محدودیت‌ها و پیشنهادهای آتی

محدودیت‌های اصلی این پژوهش بیش از آنکه ناشی از شرایط اجرایی باشند، از ماهیت روش‌شناختی به کار رفته نشأت می‌گیرند. نخست، در مرحله تحلیل محتوای کیفی، فرایند کدگذاری و استخراج مضامین متکی بر تفسیر پژوهشگر است و اگرچه تلاش شد از طریق بازبینی مکرر داده‌ها انسجام کدگذاری حفظ شود، احتمال تأثیر ذهنیت کدگذار بر مقوله‌بندی نهایی عوامل قابل حذف کامل نیست. دوم، ماتریس اثرات متقابل در تحلیل ساختاری MICMACحاصل قضاوت زوجی ۵۰ خبره است که با میانگین حسابی تجمیع شده است؛ این رویکرد، هرچند رایج

در مطالعات آینده‌پژوهی، معادل اجماع دلفی چندمرحله‌ای نیست و نتایج به ترکیب، تخصص و توزیع دیدگاه پانل خبرگان حساس است. سوم، نرم‌افزار Scenario Wizard صرفاً ترکیب‌های درونی‌سازگار حالات پیشران‌ها را شناسایی می‌کند و بنابراین سناریوهای رادیکال، ناپیوسته یا کم‌احتمال اما پرتأثیر به‌طور نظام‌مند از دامنه تحلیل خارج می‌مانند؛ حتی اگر در عمل رخ‌دادنی باشند. چهارم، طراحی پژوهش مقطعی و محدود به یک استان (کرمانشاه) در یک بازه زمانی مشخص (۱۴۰۲–۱۴۰۳) است؛ ازاین‌رو یافته‌ها با محدودیت زمانی و مکانی داده‌ها مواجه‌اند و تعمیم آنها به سایر استان‌ها یا دوره‌های زمانی متفاوت باید با احتیاط صورت گیرد. پژوهش‌های آتی می‌توانند با تکرار این چارچوب تحلیلی در مناطق دیگر و در بازه‌های زمانی متوالی، به ارزیابی پایداری الگوهای شناسایی‌شده و افزایش تعمیم‌پذیری نتایج کمک کنند.

منابع

افشاری‌پور، علی، برقی، حمید، و قنبری، یوسف (۱۳۹۹). تبیین شاخص‌های اثرگذار در سیاست‌گذاری برای مدیریت نواحی روستایی (نمونه پژوهش: استان کرمان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۱(۲)، ۷۱–۸۸.*
https://doi.org/10.22108/gep.2020.124287.1336

عبدی، آمنه، و میرک‌زاده، علی‌اصغر (۱۴۰۱). آینده فناوری‌های آب‌محور در کشاورزی استان کرمانشاه. در مجموعه مقالات سومین *همایش کم‌آبیاری و استفاده از آب‌های نامتعارف در مناطق خشک.*
https://civilica.com/doc/1666247

کریم‌زاده مطلق، زینب، لطفی، علی، پورمنافی، سعید، و احمدی‌زاده، سید سعیدرضا (۱۴۰۱). ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل CA-Markov. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۳(۲)، ۶۷–۸۴.*
https://doi.org/10.22108/gep.2022.130601.1458

گل‌کرمی، عابد، و کاویانی‌راد، مراد (۱۳۹۶). تأثیر محدودیت منابع آب بر تنش‌های هیدروپلیتیک (نمونه موردی: حوضه آبریز مرکزی ایران با تأکید بر حوضه آبریز زاینده‌رود). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۸(۱)، ۱۱۳–۱۳۴.*
https://doi.org/10.22108/gep.2017.97903.0

References

AbdelRahman, M. A. E. (2026). Smart water for sustainable agriculture through climate resilient assessment and integrated soil water crop management. *Discover Water*, *6*, 33. https://doi.org/10.1007/s43832-026-00354-x

Abdi, A., Mirkazadeh, A. A. (2022). *The future of water-based technologies in agriculture in Kermanshah province. In the proceedings of the third conference on irrigation scarcity and the use of unconventional waters in arid regions.* https://civilica.com/doc/1666247 [In Persian]

Abiadi, Y., Elamrani Abou Elassad, Z., El Meslouhi, O., Elamrani Abou Elassad, D., & Abdel Majid, A M. (2024). The application of machine learning techniques for smart irrigation systems: A systematic literature review. *Smart Agricultural Technology*, *7*, 100425. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100425

Afsharipour, A., Barghi, H., & Ghanbari, Y. (2020). Explaining the indicators affecting Policy-making for rural management (Case Study: Kerman Province). *Geography and Environmental Planning*, *31*(2), 71-88. https://doi.org/10.22108/gep.2020.124287.1336 [In Persian]

Alharbi, S., Felemban, A., Abdelrahim, A., & Al-Dakhil, M. (2024). Agricultural and Technology-Based

Strategies to Improve Water-Use Efficiency in Arid and Semiarid Areas. *Water*, *16*(13), 1842. https://doi.org/10.3390/w16131842

Amer, M., Daim, T. U., & Jetter, A. (2013). A review of scenario planning. *Futures*, *46*, 23–40. https://doi.org/10.1016/j.futures.2012.10.003

Antu, U. B., Islam, M. S., Ahmed, S., Arifuzzaman, M., Saha, S., Islam, M. S., Al-Mamun, M. A., Rahman, M. M., Idris, A. M., & Alfarraj, S. (2024). Emerging technologies for efficient water use in agriculture: A review of current trends and future directions. *Journal of Water Process Engineering*, *68*, 106317. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106317

Argente García, J. E., Yazici, B., Richa, A., Touil, S., Richart Díaz, V. J., Ramallo-González, A. P., & Skarmeta Gómez, A. F. (2024). Digitalising governance processes and water resources management to foster sustainability strategies in the Mediterranean agriculture. *Environmental Science and Policy*, *158*, Article 103805. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103805

Barati, A. A., Azadi, H., Dehghani Pour, M., Lebailly, P., & Qafori, M. (2019). Determining key agricultural strategic factors using AHP-MICMAC. *Sustainability*, *11*(14), 3947. https://doi.org/10.3390/su11143947

Batisha, A. (2022). Horizon scanning process to foresight emerging issues in Arabsphere's water vision. *Scientific Reports*, *12*, 12709. https://doi.org/10.1038/s41598-022-16803-1

Bjornlund, V., & Bjornlund, H. (2019). Understanding agricultural water management in a historical context using a socioeconomic and biophysical framework. *Agricultural Water Management*, *213*, 454–467. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.037

Bounajra, A., El Guemmat, K., Mansouri, K., & Akef, F. (2024). Towards efficient irrigation management at field scale using new technologies: A systematic literature review. *Agricultural Water Management*, *295*, 108758. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108758

Dai, Y., Huang, Z., Khan, N., & Labbo, M. S. (2025). Smart water management: Governance innovation, technological integration, and policy pathways toward economic and ecological sustainability. *Water*, *17*(13), 1932. https://doi.org/10.3390/w17131932

Durance, p., & Godet, M. (2010). Scenario building: Uses and abuses. *Technological Forecasting and Social Change*, *77*(9), 1488-1492. 10.1016/j.techfore.2010.06.007

FAO. (2024). *The State of Food and Agriculture 2024—value-driven transformation of agrifood systems*. Book (series).

Golkarami, A., & Kaviani-Rad, M. (2017). The effect of limited water resources on hydropolitic tensions (Case Study: Iran's Central Catchment with Emphasis on Zayandehrood Basin) .*Geography and Environmental Planning*, *28*(1), 113-134. https://doi.org/10.22108/gep.2017.97903.0 [In Persian]

Ingrao, C., Strippoli, R., Lagioia, G., & Huisingh, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. *Heliyon*, *9*(8), e18507. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18507

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Khan, S., & Suman, R. (2023). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, *4*, 203–217. https://doi.org/10.1016/j.susoc.2023.01.008

Karimzadeh Motlagh, Z., Lotfi, A., Pourmanafi, S., & Ahmadizadeh, S. S. R. (2022). Evaluation and prediction of land-use changes using the CA_Markov Model. *Geography and Environmental*

Planning, *33*(2), 67–84. https://doi.org/10.22108/gep.2022.130601.1458 [In Persian]

Khan, N., Ray, R. L., Sargani, G. R., Ihtisham, M., Khayyam, M., & Ismail, S. (2021). Current progress and future prospects of agriculture technology: Gateway to sustainable agriculture. *Sustainability*, *13*(9), 4883. https://doi.org/10.3390/su13094883

Lakhiar, I., Yan, H., Zhang, Ch., Wang, G., He, B., Hao, B., Han, Y., Wang, B., Bao, R., & Rakibuzzaman, M. (2024). A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate for enhancing water use efficiency, crop yield, and environmental footprints. *Agriculture*, *14*(7), 1141. https://doi.org/10.3390/agriculture14071141

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, *2*(2), e1500323. https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323

Miller, R. (2018). *Transforming the future: Anticipation in the 21st century*. Taylor & Francis. https://doi.org/10.10.4324/9781351048003

Mokari Ghahroodi, E., Noory, H., & Liaghat, A. M. (2015). Performance evaluation study and hydrologic and productive analysis of irrigation systems at the Qazvin irrigation network (Iran). *Agricultural Water Management*, *148*, 189–195. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.003

Munguía, L., Escalante, J. C., & Robles Belmont, E. (2023). The management of scientific and technological infrastructures: The case of the Mexican National Laboratories. *Quantitative Science Studies*, *4*(1), 246-261. https://doi.org/10.1162/qss_a_00230

Nosh, B., Katimbo, A., Guo, H., Heeren, D. M., Nakabuye, H. N., Qiao, X., Ge, Y., Rudnick, D. R., Wanyama, J., & Kiraga, S. (2024). Internet of Things-Based Automated Solutions Utilizing Machine Learning for Smart and Real-Time Irrigation Management: A Review. *Sensors*, *24*(23), 7480. https://doi.org/10.3390/s24237480

OECD. (2025). *Environmental Outlook on the Triple Planetary Crisis*. OECD Publishing.

Pahl-Wostl, C., & Christian, K. (2023). Pathways towards improved water governance: The role of polycentric governance systems and vertical and horizontal coordination. *Environmental Science & Policy*, *144*, 151–161. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.03.011

Parra-López, C., Ben Abdallah, S., Garcia-Garcia, G., Hassoun, A., Trollman, H., Jagtap, S., Gupta, S., Aït-Kaddour, A., Makmuang, S., & Carmona-Torres, C. (2025). Digital technologies for water use and management in agriculture: Recent applications and future outlook. *Agricultural Water Management*, *309*, 109347. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109347

Pereira, L. S., Paredes, P., Melton, F., Johnson, L., Wang, T., & López-Urrea, R. (2020). Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data. *Agricultural Water Management*, *241*, 106197. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106197

Qian, M., Qian, C., Xu, G., Tian, P., & Yu, W. (2024). Smart Irrigation Systems from Cyber–Physical Perspective: State of Art and Future Directions. *Future Internet*, *16*(7), 234. https://doi.org/10.3390/fi16070234

Rosa, L., Chiarelli, D. D., Sangiorgio, M., Beltran-Peña, A. A., Rulli, M. C., D'Odorico, P., & Fung, I. (2020). Potential for sustainable irrigation expansion in a 3 °C warmer climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(47), 29526–29534. https://doi.org/10.1073/pnas.2017796117

Shahab, H., Iqbal, M., Sohaib, A., Khan, F. U., & Waqas, M. (2024). IoT-based agriculture management techniques for sustainable farming: A comprehensive review. *Computers and Electronics in Agriculture*, *220*, 108851. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108851

Shirmohammadi Chelan, B., Malekian, A., Salajegh, A., Taheri, B., Azarnivand, H., Malek, Z., & Verburg, P. H. (2020). Scenario analysis for integrated water resources management under future land use change in the Urmia Lake region, Iran. *Land Use Policy*, *90*, 104299.

https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104299

Sivagurunathan, V., Elsawah, S., & Khan, S. J. (2022). Scenarios for urban water management futures: A systematic review. *Water Research*, *211*, 118079. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118079

UN-Water. (2024). *United Nations World Water Development Report 2024: Water for prosperity and peace*. UNESCO. https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2024

Vallejo-Gomez, D., Osorio, M., & Hincapie, C. A. (2023). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. *Agronomy*, *13*(2), 342. https://doi.org/10.3390/agronomy13020342

Wanyama, J., Bwambale, E., Kiraga, S., Katimbo, A., Nakawuka, P., Kabenge, I., & Oluk, I. (2024). A systematic review of fourth industrial revolution technologies in smart irrigation: Constraints, opportunities, and future prospects for sub-Saharan Africa. *Smart Agricultural Technology*, *7*, 100412. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100412

Wei, H., Xu, W., Kang, B., Eisner, R., Muleke, A., Rodriguez, D., deVoil, P., Sadras, V., Monjardino, M., & Harrison, M. T. (2024). Irrigation with Artificial Intelligence: Problems, Premises, Promises. *Human-Centric Intelligent Systems*, *4*(2), 187–205. https://doi.org/10.1007/s44230-024-00072-4

Zhang, W., Deng, B., Yang, X., & Tian, K. (2024). International comparison and insights on sustainable competitiveness of water industry management models: Evidences from France and China. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(46), 57048–57064. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31363-1

Zhu, T. (2019). Viewing agricultural water management through a systems analysis lens. *Water Resources Research*, *55*(1), 142–148. https://doi.org/10.1029/2017WR021007