Agricultural Economics and Development

Vol. 33, No. 129, Spring 2025

Research Paper

Identifying and Prioritizing the Smart Wheat Supply Chain Management Barriers with a Sustainable Development Approach

A. Otarkhani [1], S. Alemi Neisi [2], A. Rad [3], A. Hassanzadeh [4]

Received: 19 January, 2025 Accepted: 24 April, 2025

Introduction: Wheat is one of the most strategic agricultural commodities globally serving as a critical foundation for food security, national economic stability, and sustainable development. In Iran, wheat has a particularly vital role, not only because it constitutes a major share of household caloric intake but also because it symbolizes self-sufficiency efforts in the agricultural sector. Nevertheless, the traditional wheat supply chain in Iran is characterized by inefficiencies including excessive consumption of water and energy, limited utilization of digital technologies, low transparency in information flow, outdated infrastructure, and multiple economic and policy-related constraints. These inefficiencies are further exacerbated by the country's vulnerability to climate change, water scarcity, and international sanctions, which together pose significant challenges to maintaining and improving food security. The advent of smart supply chain technologies, including the Internet of Things, blockchain, artificial intelligence, big data analytics, and digital twins, has opened new pathways for improving supply chain efficiency, traceability, and sustainability. A smart wheat supply chain can enable real-time monitoring of production, predictive analytics for resource optimization, transparent transactions among

1. Corresponding Author and Assistant Professor, Department of Industrial Management and Information Technology, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (a_otarkhani@sbu.ac.ir).
2. PhD Candidate for Industrial Management and Information Technology, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Industrial Management and Information Technology, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
4. Professor, Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

DOI: 10.30490/aead.2025.367370.1654

stakeholders, and resilient logistics systems that are adaptable to environmental and market shocks. Transitioning to such a model is increasingly seen as not merely an option but a necessity for Iran's agricultural future. However, this transformation is neither simple nor automatic. It is hampered by multiple technological, social, economic, and environmental barriers, the identification and prioritization of which are critical for effective policy formulation and implementation.

Materials and Methods: The present study was designed to systematically identify, validate, and prioritize the key challenges associated with managing a smart wheat supply chain within the framework of sustainable development. A qualitative research strategy was employed, combining meta-synthesis, fuzzy Delphi, and fuzzy FOCUM methodologies. Initially, a comprehensive meta-synthesis was conducted on scholarly articles published between 2014 and 2024, accessed through reputable databases such as Web of Science and Scopus. Inclusion criteria mandated that articles should address technological, environmental, economic, or social barriers to smart supply chain implementation. Following the extraction of relevant challenges from the literature, a fuzzy Delphi method was utilized to validate these barriers. A panel of 23 experts participated in two iterative rounds of the Delphi process. This fuzzy approach was selected to handle uncertainties inherent in expert opinions and to provide a more nuanced assessment. Finally, the validated challenges were prioritized using the fuzzy FOCUM. This method offers an efficient and consistency-checked prioritization of factors by requiring fewer pairwise comparisons than traditional methods like AHP, making it particularly suitable for complex decision-making scenarios with multiple criteria under uncertainty.

Results and Discussion: The analysis resulted in the identification of a wide range of barriers, which were classified into three main dimensions as follows: (1) Environmental barriers included high energy consumption during production and transportation, lack of recycling systems for electronic and smart agricultural equipment, dependency on non-renewable energy sources, and inefficient water resource management. These factors not only increase operational costs but also undermine the environmental sustainability of the wheat supply chain, posing risks to long-term agricultural resilience in Iran's water-scarce context; (2) Social challenges were found to be particularly complex and multi-layered. A significant proportion of farmers and supply chain actors displayed limited digital literacy,

with inadequate access to training programs that could bridge the technological knowledge gap. Cultural resistance to change, lack of trust in new technologies, and weak collaboration among supply chain participants were also prominent barriers. Moreover, digital divides between rural and urban areas hindered equitable access to smart solutions, creating imbalances in technological adoption. The absence of supportive policies and regulatory frameworks further compounded these challenges, making it difficult to build momentum for widespread digital transformation; and (3) Economic barriers were among the most critical. High initial investment costs for smart technologies, uncertainty regarding return on investment, technological dependence on foreign suppliers, and financial constraints, especially among smallholder farmers and medium-sized enterprises, were major issues. The impact of international sanctions, which restrict access to advanced technologies and international financing, emerged as a uniquely significant barrier in Iran's case. Furthermore, the lack of robust digital infrastructure, such as high-speed internet connectivity in rural areas, posed additional obstacles to the successful implementation of smart supply chains. In response to these findings, a set of comprehensive policy recommendations were developed. These include the establishment of a National Smart Agriculture Council to orchestrate multi-stakeholder efforts, the formulation of a detailed operational roadmap for smart supply chain transformation, and the provision of financial incentives for renewable energy adoption and local technology development. Expanding digital infrastructure in rural areas, setting up specialized e-waste recycling centers, and adopting flexible financial models such as "Everything-as-a-Service" (XaaS) were also proposed to lower adoption costs and risks. Promoting collaborative ecosystems and enhancing transparency through blockchain technology could additionally support stakeholder trust and cooperation.

Conclusion and Suggestions: The successful development of a smart wheat supply chain in Iran hinges on addressing a complex interplay of environmental, social, and economic barriers. Strategic policymaking at the national level must be complemented by effective institutional coordination and robust capacity-building initiatives at the operational level. There is an urgent need for investment not only in physical infrastructure but also in human capital through training and education programs that can raise digital literacy among all supply chain actors. Moreover, given the unique challenges posed by international sanctions, Iran must pursue localized technological innovation and foster indigenous capacity-building to reduce reliance on external sources. Transparent governance structures, data security frameworks, and regulatory standards must be developed to foster trust

and ensure ethical management of digital resources. This study contributes to the existing literature by offering a comprehensive and context-specific analysis of the barriers to smart agricultural supply chain transformation, emphasizing the importance of a holistic and integrated approach that balances technological advancement with environmental stewardship, economic viability, and social inclusiveness. By providing actionable insights, the findings can guide policymakers, researchers, and industry practitioners in designing interventions that not only enhance the efficiency and resilience of the wheat supply chain but also promote broader goals of sustainable agricultural development.

Keywords: *Smart Supply Chain, Sustainable Development, Technology Implementation Challenges, Wheat, Food Security.*

JEL Classification: Q01, O32, M15

اقتصاد کشاورزی و توسعه

سال ۳۳، شماره ۱۲۹، بهار ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌های مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم با رویکرد توسعه پایدار

علی اوتارخانی[۱]، سمیه عالمی نیسی[۲]، عباس راد[۳]، علیرضا حسن‌زاده[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۴

چکیده

زنجیره تأمین هوشمند گندم به‌عنوان یکی از ارکان اصلی امنیت غذایی و توسعه پایدار دارای نقشی بی‌بدیل در ارتقای بهره‌وری، کاهش ضایعات و بهینه‌سازی مصرف منابع طبیعی بوده و استقرار موفق آن مستلزم شناسایی و مدیریت نظام‌مند چالش‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی مؤثر بر فرآیند تحول دیجیتال در کشاورزی است. در پژوهش حاضر، با هدف شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌های استقرار زنجیره تأمین هوشمند گندم در ایران، از ترکیبی از روش‌های پژوهش کیفی و تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی بهره گرفته شد. ابتدا با استفاده از روش فراترکیب، چالش‌های اساسی از منابع علمی معتبر استخراج و سپس، با بهره‌گیری از روش دلفی فازی و اخذ نظرات خبرگان دانشگاهی، دولتی و صنعتی، این چالش‌ها اعتبارسنجی

۱- نویسندهٔ مسئول و استادیار گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. (a_otarkhani@sbu.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری مدیریت فناوری اطلاعات، مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استادیار گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکدهٔ مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

٤- استاد گروه مدیریت فناوری اطلاعات، دانشکدهٔ مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

DOI: 10.30490/aead.2025.367370.1654

شدند. در ادامه، به روش فوکام فازی، اولویت‌بندی چالش‌ها بر اساس میزان اهمیت و تأثیرگذاری آنها صورت گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که مصرف بالای انرژی، فقدان نظام‌های مؤثر بازیافت تجهیزات دیجیتال، کمبود شایستگی‌های دیجیتال و فناورانه در میان ذی‌نفعان، ضعف سیاست‌های حمایتی، هزینه‌های بالای فناوری‌های نوین و موانع ناشی از تحریم‌های بین‌المللی از جمله چالش‌های کلیدی و بازدارنده به‌شمار می‌روند. برای مواجهه مؤثر با این چالش‌ها، در سطح کلان، تشکیل «ستاد ملی کشاورزی هوشمند»، تدوین نقشه راه جامع، طراحی مشوق‌های مالی برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، گسترش زیرساخت‌های ارتباطی و داده‌محور و تقویت تولید داخلی فناوری‌های کشاورزی پیشنهاد می‌شود. در سطح اجرایی نیز توسعه آموزش‌های مهارتی متناسب با فناوری‌های نوین، ایجاد مراکز تخصصی بازیافت تجهیزات دیجیتال، بهره‌گیری از مدل‌های اقتصادی نوآورانه نظیر «همه چیز به‌عنوان خدمت» و حمایت هدفمند از کسب‌وکارهای فناورانه کشاورزی ضرورت دارد. یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند ضمن ارتقای ادبیات علمی حوزه زنجیره تأمین هوشمند، مبنایی برای تدوین سیاست‌های دقیق، توسعه ظرفیت‌های فناورانه بومی و تحقق توسعه پایدار در زنجیره‌های تأمین کشاورزی کشور فراهم آورد.

کلیدواژه‌ها: *زنجیره تأمین هوشمند، توسعه پایدار، چالش‌های پیاده‌سازی فناوری، گندم، امنیت غذایی.*

طبقه‌بندی JEL : Q01, O32, M15

مقدمه

امنیت غذایی، به‌عنوان توانایی همگانی در دسترسی پایدار به غذای کافی، سالم، مغذی و مقرون‌به‌صرفه، یکی از اصلی‌ترین اولویت‌های سیاست‌گذاری در سطوح ملی و بین‌المللی است که عواملی نظیر رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع طبیعی آن را به یک چالش جهانی تبدیل کرده‌اند (Langridge et al., 2022). در این میان، توسعه پایدار به‌مثابه راهبردی بنیادین برای تضمین امنیت غذایی در افق بلندمدت مطرح است. کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه، در گزارش مشهور خود با عنوان «گزارش برانتلند» (UN, 1987)، مفهوم توسعه پایدار را «توسعه‌ای که پاسخ‌گوی نیازهای نسل حاضر باشد، بدون آنکه ظرفیت نسل‌های آینده را در تأمین نیازهای خود به مخاطره اندازد» تبیین کرده است. این رویکرد، با تأکید هم‌زمان بر اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، چارچوبی فراگیر را برای سیاست‌گذاری در کشاورزی و منابع طبیعی ارائه می‌کند (UN, 2015). از این منظر، توسعه پایدار در زنجیره تأمین محصولات کشاورزی به معنی مدیریت و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، توزیع و مصرف محصولات کشاورزی است که ضمن پاسخ‌گویی به نیازهای نسل کنونی، منابع و زیست‌بوم را برای نسل‌های آتی نیز محفوظ نگه دارد. این مفهوم ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را توأمان دربرمی‌گیرد و بر ارتقای بهره‌وری، کاهش ضایعات، بهینه‌سازی مصرف منابع آب و انرژی و حمایت ویژه از کشاورزان خرده‌پا تأکید می‌ورزد (Yadav et al., 2022).

در میان محصـــولات کشـــاورزی، گندم نقش راهبردی در تضـــمین امنیت غذایی دارد. این محصول، به‌دلیل تأمین بخش عمدهٔ کالری و پروتئین جمعیت جهان، به لحاظ تغذیه‌ای اهمیت فراوان دارد و در عین حال، در تجارت جهانی و سـهم تولید ناخالص داخلی بسـیاری از کشـورها نیز نقشـی برجسته ایفا می‌کند (Motevalli-Taher et al., 2020). بر اساس داده‌های مندرج در سالنامه آماری ۲۰۲۴ سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو)[1]، در سال ۲۰۲۲، گندم هشت درصد از مجموع تولید محصـولات کشـاورزی اسـاسـی را به خود اختصـاص داده اسـت (FAO, 2024). همچنین، چشم‌انداز ۲۰۳۳-۲۰۲۴ سازمان همکاری و توسعه اقتصادی[2] و فائو نشان می‌دهد که این محصـول همچنان یکی از ارکان اصـــلی تولیدات کشـــاورزی در ســـطح جهان خواهد بود، به‌گونه‌ای که طبق پیش‌بینی‌ها، تولید گندم تا سـال ۲۰۳۳ به ۸۷۲ میلیون تن می‌رسـد، رقمی که از افزایشـی ۸۳ میلیون تنی نسبت به سال ۲۰۲۲ حکایت دارد (OECD/FAO, 2024).

در ایران نیز گندم از منظر اقتصادی و امنیت غذایی نقش راهبردی دارد. سرانه مصرف روزانه نان گندم در کشور معادل ۳۲۰ گرم است و به‌تنهایی چهل تا پنجاه درصد انرژی و ۴۵ درصد پروتئین خانوارها را تأمین می‌کند (Allipour Birgani et al., 2021). با توجه به موقعیت حساس جغرافیایی ایران در خاورمیانه، خودکفایی در تولید گندم در زمره اولویت‌های راهبردی ملی قرار گرفته و قانون اساسی نیز دولت را موظف به پیشبرد سیاست‌های حمایتی برای دستیابی بدین هدف ساخته است (Alipour et al., 2018). در این راستا، دولت از طریق سیاست‌هایی نظیر خرید تضمینی، ارائه یارانه و بیمه محصولات کشاورزی کوشیده است تا بستری مناسب برای افزایش تولید و کاهش وابستگی به واردات فراهم آورد (Vaezi et al., 2024). دستیابی به امنیت غذایی پایدار در محصول راهبردی گندم نیازمند مدیریت کارآمد زنجیره تأمین آن است. زنجیره تأمین گندم شبکه‌ای پیچیده و چندبعدی است که مجموعه‌ای از فعالیت‌های پیوسته و مرتبط شامل تولید (کاشت، داشت و برداشت)، حمل‌ونقل (از مزرعه تا مراکز ذخیره‌سازی یا فرآوری)، ذخیره‌سازی (سیلوها و انبارهای واسطه‌ای)، فرآوری (تبدیل گندم به آرد و محصـــولات دیگر)، توزیع و در نهایت، فروش به مصـــرف‌کننده نهایی را دربرمی‌گیرد (Gholamian & Taghanzadeh, 2017). در این زنجیره، ذی‌نفعان متعدد ازجمله کشـــاورزان، کارخانه‌های آرد، تجار، مراکز ذخیره‌سـازی، مشـاوران کشـاورزی، نهادهای دولتی و مصـرف‌کنندگان حضـور دارند، که هماهنگی و تعامل اثربخش میان آنها شـرط لازم برای موفقیت زنجیره تأمین اسـت

1. United Nations Food and Agriculture Organization (FAO)
2. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)

(Deng et al., 2021). علاوه بر این، مدیریت جریان‌های اصـــلی شـــامل جریان مواد، جریان اطلاعات و جریان مالی نیز از الزامات اساسی مدیریت بهینه زنجیره تأمین گندم محسوب می‌شود (Rathore et al., 2022). از سوی دیگر، جنبه‌های حاکمیتی و قانون‌گذاری شامل تدوین استانداردها، مقررات ایمنی و کیفیت محصول، ایجاد شفافیت اطلاعاتی و تنظیم ارتباط بین ذی‌نفعان نقشی کلیدی در ارتقای کارآیی و پایداری این زنجیره دارد (Dündar et al., 2016).

با این همه، دستیابی به خودکفایی پایدار در تولید گندم با چالش‌های متعدد مواجه است. گندم، به‌عنوان یکی از محصولات راهبردی کشور، سهمی قابل توجه از منابع آبی بخش کشاورزی را به خود اختصاص داده است. مطالعات نشان می‌دهد که میانگین مصرف آب مجازی[۱] برای تولید هر تن گندم در ایران بین ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ مترمکعب بوده که در مقایســـه با میانگین جهانی آن (۹۳۰ مترمکعب بر تن)، بیش از پنجاه درصد بالاتر است (Heydari & Taran, 2025). افزون بر این، میانگین بهره‌وری آب فیزیکی[۲] در تولید گندم در ایران بین ۰/۴۸ تا ۰/۹۳ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بوده که بســـیار پایین‌تر از بازه جهانی ۰/۲ تا ۱/۷ کیلوگرم بر مترمکعب است (Nouri et al., 2023). این ارقام نه‌تنها ناکارآمدی الگوهای آبیاری و ضعف‌های مدیریتی را آشکار می‌سازد، بلکه در بستر اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران، تهدیدی جدی برای پایداری تولید گندم و تحقق اهداف کلان توسعه پایدار به‌شمار می‌رود.

نقشــه تنش آبی جهانی در شــکل ۱ نشــان می‌دهد که ایران، همانند بســیاری از کشــورهای آســیای مرکزی، غرب آســیا و شــمال آفریقا، با تنش آبی روزافزون روبه‌روســت (FAO, 2021). از یک‌ســو، تداوم خشــکســالی‌های شــدید، کاهش منابع آب تجدیدپذیر و بهره‌وری پایین مصــرف آب، پایداری تولید گندم را با تهدیدات جدی مواجه کرده است؛ و از سوی دیگر، افزایش دما ناشی از تغییر اقلیم کشـــاورزان را وادار خواهد کرد که برای جلوگیری از کاهش عملکرد محصـــول، از منابع آبی بیشتری استفاده کنند (Salehnia, 2023). این موضوع نه‌تنها منابع آب و خاک را تحت فشار مضاعف قرار می‌دهد، بلکه با تشــدید فرســایش خاک و کاهش کیفیت اراضــی کشــاورزی، مانعی جدی برای تحقق اهداف توسعه پایدار در بخش کشاورزی محسوب می‌شود.

پیش‌بینی‌ها حاکی از آن اســت که تغییرات اقلیمی ممکن اســت تا ســال ۲۰۵۰، عملکرد گندم دیم در ایران را ده تا چهارده درصد کاهش دهد، که وابستگی به واردات و فاصله از خودکفایی در تولید

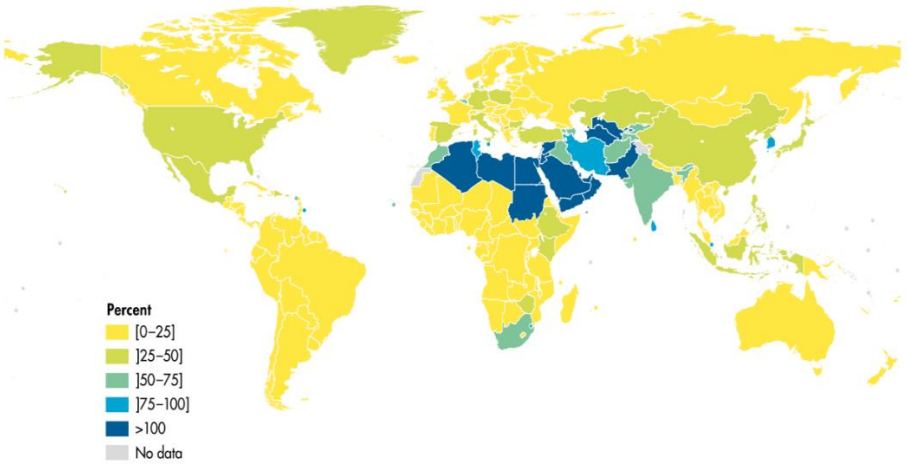
۱- virtual water (آب مجازی)؛ به مجموع حجم آبی گفته می‌شود که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم، برای تولید یک کالا یا محصول کشاورزی مصرف شده است، اما در خود محصول قابل مشاهده نیست.

۲- Physical Water Productivity؛ به میزان عملکرد محصول (کیلوگرم) به ازای هر مترمکعب آب مصرفی در تولید آن گفته می‌شود. این شاخص بازتابی از کارآیی مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی است.

این محصـول راهبردی را تشـدید می‌کند (Heydari & Taran, 2025). در حال حاضـر، ایران در فهرسـت پنج واردکننده بزرگ گندم جهان قرار دارد و پیش‌بینی می‌شـود که تا سـال ۲۰۳۳ نیز در این جایگاه باقی بماند (OECD/FAO, 2024)، روندی که به‌ویژه در بحران‌های بین‌المللی، امکان آسیب‌پذیری امنیت غذایی را افزایش می‌دهد (Gholamian & Taghanzadeh, 2017).

همچنین، اسـتفاده از ماشـین‌آلات فرسـوده، مدیریت ناکارآمد و ضـعف در زیرسـاخت‌های ذخیره‌سـازی، حمل و فراوری موجب کاهش بهره‌وری تولید گندم شـده و افزایش قابل توجه میزان ضایعات در مراحل برداشت، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی را در پی داشته است، به‌گونه‌ای که حدود سی درصـد از گندم تولیدی دچار هدررفت می‌شـود (Allipour Birgani et al., 2021). برای نمونه، در بخش برداشـت، به‌کارگیری کمباین‌های فرسـوده موجب ریزش بالای محصـول می‌شـود و در مرحله حمل‌ونقل نیز ضعف در زیرساخت‌های ردیابی و مدیریت ناوگان به افزایش تأخیر، آسیب‌دیدگی محموله‌ها و هدررفت در فرآیند جابه‌جایی بین‌اسـتانی می‌انجامد (Gholamian & Taghanzadeh, 2017). همچنین، ضـعف در پایش دمای سـیلوها و رطوبت محیط نگهداری به فسـاد گندم ذخیره‌شـده و افت کیفیت آن شتاب می‌بخشد (Rajabzadeh et al., 2021). در بخش مصرف نیز کیفیت پایین آرد یا فرآیند نامناسب فراوری موجب هدررفت چشمگیر نان می‌شود (Allipour Birgani et al., 2021). علاوه بر این، کمبود زیرسـاخت‌های اطلاعاتی برای گردآوری و پردازش داده‌های مرتبط با ضـایعات وضـعیت تولید و ذخایر گندم و نیز مدیریت تقاضـا و عرضـه را با مشـکلات عدیده مواجه کرده اسـت (Gholamian & Taghanzadeh, 2017).

فقدان شـفافیت اطلاعاتی نه‌تنها تصـمیم‌گیری‌های کلان در حوزه تأمین و توزیع گندم را مختـل می‌کنـد، بلکـه اثرات نـامطلوب بر عـدالـت اجتمـاعی و ملاحظـات زیسـت‌محیطی دارد (Ajodani et al., 2021). در این شرایط، رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای گندم فشار بر منابع طبیعی از جمله آب و خاک را دوچندان می‌سازد و گسـترش سـطح زیر کشـت برای تأمین این تقاضـا با پیامدهایی همچون کاهش حاصل‌خیزی خاک و فرسایش اراضـی همراه خواهد بود (Alipour et al., 2018). این روند نگران‌کننده الزامی بودن ارتقای نظام‌های مدیریتی و بهره‌گیری از فناوری‌های هوشـمند را برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین گندم و تحقق توسعه پایدار دوچندان می‌کند.



مأخذ: فائو (FAO, 2021)

شکل ۱- نقشه تنش آبی جهانی

به‌دنبال تحولات اخیر در فناوری‌های هوشمند و نوآوری‌های مبتنی بر داده، زمینه برای شکل‌گیری زنجیره تأمین هوشمند گندم فراهم شده است. این تحول دیجیتالی نه‌تنها به‌عنوان یک پیشرفت فناورانه، بلکه به‌مثابه ابزاری کلیدی در تحقق اهداف توسعه پایدار در نظام کشاورزی و امنیت غذایی جهانی شناخته می‌شود (Sezer et al., 2024). زنجیره تأمین هوشمند گندم، برخلاف مدل‌های سنتی که با ناکارآمدی در مدیریت منابع، افزایش ضایعات، عدم شفافیت و وابستگی به روش‌های پرمصرف مواجه‌اند، بر یک نظام یکپارچه و داده‌محور استوار است که با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین همچون هوش مصنوعی[1]، اینترنت اشیا[2]، زنجیربست یا زنجیره‌بلوکی[3] و تحلیل کلان‌داده‌ها[4] امکان پایش بی‌درنگ، هماهنگی پیشرفته و تصمیم‌گیری هوشمند را در تمامی مراحل از کاشت و داشت تا برداشت، فراوری، ذخیره‌سازی و توزیع فراهم می‌آورد (Tripathi & Gupta, 2020). این زنجیره، با برخورداری از ویژگی‌هایی همچون شفافیت، پیوستگی میان اجزا، یکپارچگی عملیاتی، هوشمندی در تحلیل و پیش‌بینی، خودمختاری در تصمیم‌سازی، تاب‌آوری در برابر اختلالات، پاسخ‌گویی سریع به تغییرات، قابلیت ردیابی و ظرفیت نوآوری مستمر، ساختاری هوشمند و پویا پدید می‌آورد که توانایی

1. Artificial Intelligence (AI)
2. Internet of Things (IOT)
3. block chain
4. big data analysis

انطباق با شـــرایط متغیر محیطی، اقتصـــادی و اجتماعی را به‌گونه‌ای بی‌ســـابقه فراهم می‌ســـازد (Jararweh et al., 2023).

یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های زنجیره تأمین هوشـــمند پایش دقیق و مدیریت بی‌درنگ فرآیندهای تولید و توزیع اســـت که تأثیری مســـتقیم بر مدیریت منابع طبیعی و کاهش اثرات زیســت‌محیطی دارد. بهره‌گیری از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشـیا، حسـگرهای هوشـمند و پهپادها[1] امکان نظارت پیوســته و دقیق بر شــرایط خاک، میزان رطوبت، وضــعیت رشــد گیاهان و شــرایط ذخیره‌ســازی را فراهم می‌ســازد (Balyan et al., 2024). داده‌های به‌دســت‌آمده از این فناوری‌ها، با بهره‌گیری از تحلیل کلان‌داده‌ها و هوش مصنوعی، در راستای پیش‌بینی عملکرد محصول، بهینه‌سازی مصــرف منابع و کاهش تلفات تولید مورد اســتفاده قرار می‌گیرند (Khebbache et al., 2023). این زنجیره، همچنین، با به‌کارگیری سامانه‌های آبیاری هوشمند[2]، امکان کنترل خودکار آبیاری را بر اساس نیاز واقعی گیاه فراهم می‌کند و بدین‌ترتیب، موجب بهینه‌ســازی مصــرف آب و افزایش بهره‌وری در تولید گندم می‌شـود (Sehgal et al., 2022). این سـطح از مدیریت هوشـمند منابع آبی، به‌ویژه در مناطقی با محدودیت‌های شـدید مانند ایران، عاملی کلیدی در تضـمین پایداری کشـاورزی و افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین در برابر چالش‌های محیطی محسوب می‌شود.

افزون بر مدیریت منابع، زنجیره تأمین هوشمند نقشی کلیدی در افزایش تاب‌آوری کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی دارد. در حالی که تغییرات اقلیمی موجب کاهش عملکرد محصـــول و افزایش نوسان‌های عرضـه و قیمت می‌شـود، الگوریتم‌های یادگیری ماشـینی[3] و تحلیل کلان‌داده‌ها می‌توانند الگوهای اقلیمی را با دقت بالا پیش‌بینی کرده، کشـــاورزان را در انتخاب زمان‌بندی بهینه کشـــت و برداشـــت یاری کنند (Corallo et al., 2024). همچنین، مدل‌های یادگیری عمیق، با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و ســامانه‌های ســنجش از دور[4]، امکان تحلیل دقیق شــرایط اقلیمی و پیش‌بینی عملکرد محصـول را فراهم می‌کنند و مخاطرات ناشـی از تغییرات آب‌وهوایی را به‌گونه‌ای مؤثر کاهش می‌دهند (Asem-Hiablie et al., 2023). این قابلیت‌ها به کشاورزان کمک می‌کند تا با برنامه‌ریزی دقیق‌تر، از خسارات اقلیمی جلوگیری کرده، میزان تولید پایدار را حفظ کنند.

۱- drones؛ «پهپاد» واژهٔ اختصاری برساخته از «پرندهٔ هدایت‌پذیر از دور» است.

2. smart irrigation systems
3. Machine Learning Algorithm (MLAs)
4. remote sensing

در سطح کلان، زنجیره تأمین هوشمند گندم زمینه‌ای توانمند برای تصمیم‌سازی‌های راهبردی و سیاست‌گذاری مبتنی بر داده فراهم می‌سازد؛ به‌ویژه، فناوری همزاد دیجیتال[1]، با ترکیب داده‌های بی‌درنگ و مدل‌سازی مجازی فرآیندها، امکان شبیه‌سازی سناریوهای گوناگون، ارزیابی پیامدهای سیاستی و پایش اثرات تصمیم‌ها در مقیاس‌های محلی، ملی و جهانی را ممکن می‌سازد (Escribà-Gelonch et al., 2024). این زیرساخت هوشمند، از طریق تحلیل روندهای تولید، مصرف و عرضه، ابزاری مؤثر برای تنظیم بازار، تخصیص بهینه منابع، بهینه‌سازی الگوهای کشت و پیش‌بینی بحران‌های غذایی فراهم می‌کند (Purcell et al., 2023). در شرایط بحران، مانند خشکسالی یا نوسان‌های ناگهانی قیمت، همزاد دیجیتال، با ارزیابی بی‌درنگ اختلالات احتمالی، به ارتقای تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین یاری می‌رساند (Schmidt et al., 2024). همچنین، این فناوری با بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها، کاهش ضایعات و کنترل دقیق فرآیندهای تدارکاتی (لجستیکی)، بستری برای تحقق هم‌زمان اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی توسعه پایدار فراهم می‌آورد (Pelé et al., 2023).

از منظر پایداری اقتصادی و اجتماعی، زنجیره تأمین هوشمند گندم، با تکیه بر شفاف‌سازی فرآیندها و تسهیل تعامل مستقیم میان ذی‌نفعان، زمینه‌ای مؤثر برای تقویت عدالت توزیعی و ارتقای موقعیت اقتصادی کشاورزان خرده‌پا فراهم می‌سازد (Guixia et al., 2024). در این راستا، به‌کارگیری فناوری زنجیربست (بلاک‌چین)، با ایجاد ساختاری شفاف، غیرقابل تغییر و قابل ردیابی برای گردش اطلاعات در تمامی مراحل زنجیره تأمین، نقشی راهبردی ایفا می‌کند (Chiaraluce et al., 2024). این فناوری، با پشتیبانی از قراردادهای هوشمند[2]، امکان انجام معاملات مستقیم، ایمن و بدون واسطه‌های غیرضروری را فراهم می‌کند و در نتیجه، ضمن افزایش سودآوری تولیدکنندگان، به کاهش هزینه‌های نهایی برای مصرف‌کنندگان می‌انجامد (Farooq et al., 2024). افزون بر آن، رهگیری دقیق و لحظه‌به‌لحظه جریان محصول، امکان شناسایی و حذف گلوگاه‌های فسادزا از جمله تقلب، احتکار و جعل اطلاعات را فراهم می‌سازد و بدین‌ترتیب، به ارتقای اعتماد عمومی و کارآیی کلان زنجیره تأمین می‌انجامد (Rathore et al., 2022).

رباتیک و سامانه‌های اتوماسیون، با بهره‌گیری از حسگرهای پیشرفته، بینایی ماشینی[3] و الگوریتم‌های تصمیم‌یار، انجام فعالیت‌هایی نظیر کاشت، داشت و برداشت را با دقت بالا و یکنواختی

1. digital twin
2. smart contracts
3. machine vision

بیشتر ممکن ساخته‌اند، عاملی که در کنار کاهش وابستگی به نیروی انسانی، از بروز خطاهای عملیاتی و آسیب به محصول در مراحل حساس، به‌ویژه پس از برداشت، جلوگیری می‌کند. استقرار این فناوری‌ها در بخش‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی نیز امکان کنترل بهینه شرایط نگهداری را فراهم می‌کند و در مجموع، به کاهش ضایعات، ارتقای بهره‌وری و پایداری زنجیره تأمین گندم منجر می‌شود (Moshayedi et al., 2024).

در مجموع، زنجیره تأمین هوشمند گندم، با بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال پیشرفته، نه‌تنها ابزارهایی برای بهبود عملکرد عملیاتی در اختیار کنشگران زنجیره قرار می‌دهد، بلکه بستری راهبردی را برای ارتقای تاب‌آوری، بهره‌وری، عدالت توزیعی و حفاظت از منابع طبیعی فراهم می‌آورد. این زنجیره، با تلفیق فناوری‌های هوش‌محور و زیرساخت‌های ارتباطی نوین، هم‌زمان پاسخ‌گوی نیازهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بخش کشاورزی است و از این‌رو، می‌تواند به‌عنوان الگویی اثربخش در تحقق اهداف چندسطحی توسعه پایدار در نظام تولید و توزیع گندم مطرح شود. ادغام داده‌های بی‌درنگ، تصمیم‌گیری مبتنی بر شبیه‌سازی و به‌کارگیری سامانه‌های خودکار و شفاف، افقی جدید از حکمرانی هوشمند در زنجیره‌های تأمین کشاورزی گشوده است، که می‌تواند در مقابله با چالش‌های فزاینده جهانی همچون تغییرات اقلیمی، فشار بر منابع و بحران‌های غذایی، نقش‌آفرینی مؤثر داشته باشد.

اگرچه فناوری‌های هوشمند مزایای بسیاری برای زنجیره تأمین گندم فراهم می‌کنند، اما پیاده‌سازی آنها با چالش‌های متعدد روبه‌روست که در مدیریت زنجیره تأمین هوشمند آن، باید مورد توجه قرار گیرند (Dibbern et al., 2024). نتایج پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهد که بهره‌گیری از فناوری‌های نوین می‌تواند بهره‌وری را افزایش و ضایعات را کاهش دهد و مسیر دستیابی به پایداری را هموار کند؛ اما درعین‌حال، موانع متعدد در پذیرش این فناوری‌ها وجود دارد. برای نمونه، هدایتی و همکاران (Hedayati et al., 2024) به بررسی موانع پذیرش فناوری زنجیربست در صنایع غذایی ایران پرداختند و نشان دادند که هزینه‌های بالا، کمبود زیرساخت‌های فنی و مقاومت در برابر تغییر از جمله موانع اصلی به‌شمار می‌روند. عباس‌پور گیلانده و محتسبی (Abbaspour Gilandeh & Mohtasebi, 2024) نیز بر فناوری‌هایی مانند پهپادها و رباتیک متمرکز شدند و نشان دادند که این فناوری‌ها می‌توانند بازده مصرف سموم کشاورزی را تا سی درصد افزایش دهند و مدیریت مزارع کوچک را بهبود بخشند. رجب‌زاده و همکاران (Rajabzadeh et al., 2021) به بررسی عوامل مؤثر بر به‌کارگیری اینترنت اشیا در بخش ذخیره‌سازی زنجیره تأمین گندم در ایران پرداختند؛ به باور آنها،

فناوری اینترنت اشـــیا، با بهبود کیفیت، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری، نقش کلیدی در ارتقای ذخیره‌سازی هوشمند ایفا می‌کند. ویرمانی و سینگ (Virmani & Singh, 2024) نیز با بررسی موانع پذیرش زنجیربسـت در زنجیره تأمین کشـاورزی- غذایی در کشـور هند، نشـان دادند که موانع اصـلی شامل پیچیدگی عملیاتی، هزینه‌های بالا و کمبود سازگاری با نظام‌های موجود است. آنها تأکید کردند که پذیرش زنجیربســت می‌تواند شــفافیت و کارآیی را افزایش دهد، اما نیازمند حمایت‌های نهادی و قانونی است.

به همین ترتیب، دیبرن و همکاران (Dibbern et al., 2024) در برزیل زیرســاخت‌های فناوری، شرایط مالی و دانش فنی را از عوامل مهم پذیرش فناوری‌های دیجیتال در کشاورزی دانسته و بر ضــرورت افزایش دســترســی به آموزش و فناوری تأکید کرده‌اند. لیمپامونت و همکاران (Limpamont et al., 2024) نیز با تمرکز بر کشاورزان خرده‌پا، چالش‌های پذیرش فناوری در تایلند را بررسـی کردند. یافته‌های این پژوهش بیانگر آن اسـت که عوامل اجتماعی و اقتصـادی نظیر کمبود آموزش، انگیزه‌های مالی ناکافی و فقدان زیرسـاخت‌های مناسـب از موانع اصـلی پذیرش فناوری‌های کشـاورزی به‌شـمار می‌روند. همچنین، این پژوهش ارائه آموزش‌های فنی و توسـعه زیرسـاخت‌ها را به‌عنوان راهکارهای کلیدی معرفی کرده اســت. ســاها و همکاران (Saha et al., 2025)، با تحلیل چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال در زنجیره تأمین کشاورزی- غذایی هند، بر این باورند که مقاومت در برابر تغییر، کمبود زیرساخت‌های فناوری و هزینه‌های بالا از موانع اصلی به‌شمار می‌روند. همچنین، این مطالعه بر اهمیت مهارت‌های دیجیتال و نقش آموزش در رفع این موانع تأکید کرده است. دا سیلویرا و همکاران (Da Silveira et al., 2023a) در برزیل موانع توسعه کشاورزی صنعت ۴ را واکاوی کرده و نشان دادند که کمبود زیرساخت‌ها، نیاز به تحقیقات و توسعه و تفاوت‌های سنی از جمله چالش‌های اصـلی هسـتند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ایجاد دسـترسـی به فناوری و بهبود داده‌های محیطی می‌تواند به افزایش بهره‌وری کمک کند.

با توجه به تعدد موانع در فرآیند گذار از زنجیره تأمین ســنتی به زنجیره تأمین هوشــمند، شــناســایی و اولویت‌بندی این موانع برای کاهش مخاطرات پیاده‌ســازی، بهینه‌ســازی منابع، تدوین راهبردهای مقابله‌ای، افزایش پذیرش فناوری، ارتقای شـفافیت و رقابت‌پذیری و مهم‌تر از همه، تحقق توسـعه پایدار ضـرورتی انکارناپذیر اسـت. این مسـئله، در ایران، به‌دلیل نقش راهبردی گندم در امنیت غذایی، اولویتی دوچندان می‌یابد. در عین حال، مطالعات داخلی بیشــتر به جولنب اقتصــادی و فنی پرداخته و ابعاد اجتماعی و زیست‌محیطی را کمتر مد نظر قرار داده‌اند؛ پژوهش‌های خارجی نیز با وجود

جامعیت بیشتر، کمتر به شرایط زیرساختی و محدودیت‌های اقتصادی کشور توجه کرده‌اند. همچنین، در بسیاری از تحقیقات، محصولات کشاورزی به‌صورت کلی بررسی شده و کمتر به چالش‌های خاص زنجیره تأمین هوشمند گندم توجه شده است.

بر این اساس، پژوهش حاضر، با هدف شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌های مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم، با رویکرد توسعه پایدار طراحی شده و هدف اصلی آن شناسایی چالش‌های کلیدی مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم و ارائه راهکارهایی برای اولویت‌بندی آنها با تأکید بر ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی توسعه پایدار بوده است. پرسش‌های اصلی پژوهش عبارت‌اند از: «چالش‌های اصلی مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم با رویکرد توسعه پایدار کدامند؟ و چگونه می‌توان این چالش‌ها را اولویت‌بندی کرد؟».

برای رسیدن بدین هدف، در گام نخست، از روش فراترکیب برای شناسایی چالش‌ها استفاده شده و سپس، با بهره‌گیری از روش دلفی فازی و مشارکت خبرگان، اعتبارسنجی چالش‌های استخراج‌شده صورت گرفته است. در گام بعدی، از روش فوکام فازی[1] برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی چالش‌ها بهره گرفته شده است. با توجه به نقش حیاتی گندم در امنیت غذایی ایران و اهمیت فناوری‌های هوشمند در ارتقای کارآیی و پایداری زنجیره تأمین، نتایج پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی عملی برای سیاست‌گذاران و مدیران بخش کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد و در راستای دستیابی به توسعه پایدار و بهبود تاب‌آوری زنجیره تأمین گندم، راهکارهایی قابل جرا ارائه کند.

مواد و روش‌ها

پژوهش پیش رو، با هدف شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌های مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم با رویکرد توسعه پایدار و با در نظر گرفتن اهداف و پرسش‌های پژوهش، بر پایه مبانی فلسفی در چارچوب پارادایم تفسیری استوار بوده و از نظر جهت‌گیری نیز پژوهشی کاربردی محسوب می‌شود؛ همچنین، از حیث هدف، اکتشافی بوده و از منظر رویکرد، استقرایی است؛ و بر اساس افق زمانی نیز در گروه مطالعات مقطعی جای می‌گیرد.

روش پژوهش حاضر کیفی بوده و گردآوری داده‌ها در دو مرحله انجام شده است. در مرحله نخست، با استفاده از روش فراترکیب و مرور منابع کتابخانه‌ای، چالش‌های مدیریت زنجیره تأمین

1. Fuzzy Full Consistency Method (FUCOM)

هوشمند گندم مبتنی بر ابعاد توسعه پایدار شناسایی شده و سپس، به‌منظور اعتبارسنجی این چالش‌ها، پرسشنامه‌ای بر اساس روش دلفی فازی طراحی شده و در اختیار خبرگان قرار گرفته است.

پس از نهایی شدن چالش‌ها در این مرحله، برای اولویت‌بندی آنها، پرسشنامه دیگری مبتنی بر روش فوکام فازی تهیه و در اختیار گروهی از خبرگان با تجربه تخصصی و سابقه کاری بیشتر قرار داده شده است تا وزن و اهمیت هر کدام از چالش‌ها مشخص شود. مشارکت‌کنندگان این بخش از پژوهش به روش نمونه‌گیری گلوله‌برفی انتخاب شدند. به‌منظور دستیابی به دیدگاهی جامع و چندبعدی در مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم، اپژوهش حاضر از سه گروه خبرگان دانشگاهی و بخش‌های دولتی و خصوصی بهره گرفته شد. انتخاب این سه گروه بر اساس نقش کلیدی آنها در زنجیره تأمین کشاورزی و توسعه فناوری‌های هوشمند صورت گرفته است. خبرگان دانشگاهی دیدگاه‌های علمی و پژوهشی را ارائه می‌دهند؛ خبرگان دولتی، با تمرکز بر سیاست‌گذاری و مدیریت اجرایی زنجیره تأمین، شناخت دقیق از چالش‌های عملیاتی دارند؛ و خبرگان بخش خصوصی، با تجربه در توسعه و پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال، دیدگاه‌های اجرایی و فنی را ارائه می‌کنند. حضور این سه گروه امکان بررسی هم‌زمان ابعاد علمی، اجرایی و صنعتی را فراهم کرده، موجب افزایش اعتبار و جامعیت نتایج پژوهش می‌شود. انتخاب این افراد با توجه به میزان دانش، تجربه کاری و تخصص آنها صورت گرفته است. در ادامه، جزئیات مربوط به هر کدام از این روش‌ها به‌تفصیل بیان می‌شود.

فراترکیب

فراترکیب روشی است که در آن، یافته‌های پژوهش‌های کیفی مختلف به‌صورت نظام‌مند ترکیب می‌شوند تا درک کلی و جامع از یک موضوع یا پدیده حاصل شود. این روش به پژوهشگران کمک می‌کند تا یافته‌های پژوهش‌های کیفی مختلف را با یکدیگر مقایسه و هماهنگ کنند و از آنها برای پاسخ‌گویی به پرسش‌های پژوهشی خود بهره گیرند. هدف اصلی فراترکیب عبارت است از توسعه نظریه، تلخیص و تعمیم در سطحی پیشرفته تا با ارتقای دسترسی به یافته‌های کیفی، امکان بهره‌برداری عملی از آنها فراهم شود (Abedi Jafari & Amiri, 2019). به‌منظور پاسخ به سؤال پژوهش و شناسایی چالش‌های مدیریت زنجیره تامین هوشمند گندم، روش هفت‌مرحله‌ای سندلوسکی و باروسو (Sandelowski & Barroso, 2007) به‌ترتیب زیر به‌کار گرفته شد:

- طراحی مطالعه: تعیین هدف پژوهش و پرسش‌های کلیدی به‌منظور هدایت فرآیند فراترکیب.
- جستجوی مطالعات: شناسایی و گردآوری نظام‌مند پژوهش‌های کیفی مرتبط از طریق پایگاه‌های علمی و منابع معتبر.

- انتخاب مطالعات: ارزیابی و گزینش پژوهش‌های مناسب بر اساس معیارهای ورود و خروج تعیین‌شده.
- استخراج داده‌ها: بررسی مطالعات منتخب و شناسایی نکات کلیدی، مضامین و یافته‌های محوری.
- تحلیل و ترکیب یافته‌ها: کدگذاری، دسته‌بندی و ترکیب یافته‌ها به‌منظور شناسایی الگوها و مضامین مشترک.
- تفسیر نتایج: تعمیم و تفسیر یافته‌های ترکیب‌شده در قالب چارچوب یا مدل مفهومی.
- ارائه نتایج: تدوین گزارش نهایی و نمایش یافته‌ها برای استفاده عملی و توسعه نظری.

روش دلفی فازی

در این بخش، به‌منظور اولویت‌بندی چالش‌ها و اعتبارسنجی چارچوب مفهومی استخراج‌شده از فرآیند فراترکیب، از روش دلفی فازی استفاده شد. این روش، با تلفیق دلفی سنتی و منطق فازی، ابزاری کارآمد برای جمع‌آوری و تحلیل نظرات خبرگان در شرایط عدم قطعیت فراهم می‌کند و امکان دستیابی به اجماع کارشناسی با دقت و انعطاف‌پذیری بیشتر را مهیا می‌سازد (Bayatzadeh & Amiri, 2024). در ادامه، مراحل اجرای این روش ارائه می‌شود.

۱- شناسایی شاخص‌های پژوهش با استفاده از مرور جامع مبانی نظری پژوهش

۲- جمع‌آوری نظرات متخصصان تصمیم‌گیرنده: تعیین اهمیت هر شاخص بر اساس طیف جدول ۱.

جدول ۱- عبارات زبانی و اعداد دلفی فازی

عبارات زبانی	اعداد فازی مثلثی
خیلی کم	(۰،۰،۰,۲۵)
کم	(۰،۰,۲۵،۰,۵)
متوسط	(۰,۲۵،۰,۵،۰,۷۵)
زیاد	(۰,۵،۰,۷۵،۱)
خیلی زیاد	(۰,۷۵،۱،۱)

مأخذ: بیات‌زاده و امیری (Bayatzadeh & Amiri, 2024)

۱- اعتبارسنجی و غربالگری شاخص‌ها: برای هر عدد فازی که بر اساس رابطه (۱) باشد، ابتدا میانگین هر کدام از کران‌های فازی بر اساس روابط (۲) تا (۴) محاسبه می‌شود:

$$\tilde{\tau}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, C_{ij}), \quad i = 1,2, \dots, n \quad j = 1,2, \dots, m \tag{۱}$$

$$a_j = \sum \frac{a_{ij}}{n} \tag{۲}$$

$$b_j = \sum \frac{b_{ij}}{n} \tag{۳}$$

$$c_j = \sum \frac{c_{ij}}{n} \tag{۴}$$

سپس، با استفاده از رابطه (۵)، اعداد فازی نهایی به عدد غیرفازی تبدیل می‌شود:

$$Crisp = \frac{a + b + c}{3} \tag{۵}$$

در پژوهش حاضر، مقدار آستانه حذف برابر با ۰/۷ تعیین شده است، بدین معنی که شاخص‌هایی با مقدار غیرفازی کمتر از ۰/۷ از فرآیند تحلیل حذف می‌شوند.

روش فوکام فازی

روش فوکام یا سازگاری کامل (FUCOM)، برای اولین‌بار توسط پاموکار و همکاران (Pamučar et al., 2018) معرفی شد. رایج‌ترین کاربرد روش فوکام در تعیین ضرایب وزن معیارها در فرآیندهای تصمیم‌گیری است. این روش، در مقایسه با روش‌های مشابه مانند AHP و BWM، تعداد مقایسه‌های زوجی کمتری دارد که ضمن کاهش پیچیدگی محاسباتی، کارآیی آن را در مسائل با معیارهای متعدد بهبود می‌بخشد. توسعه این روش در محیط‌های عدم قطعیت از طریق به‌کارگیری نظریه اعداد فازی، به‌عنوان یک رویکرد ترکیبی، موجب افزایش محبوبیت آن در میان پژوهشگران شده است. این رویکرد امکان مدل‌سازی بهتر عدم قطعیت و ارتقای دقت در تعیین ضرایب وزن معیارها را فراهم می‌کند. برای اجرای فوکام فازی، ابتدا معیارهای ارزیابی Cj, j= 1, 2, …, n تعیین می‌شوند و سپس، با توجه به اهمیت آنها بر اساس نظرات خبرگان، رتبه‌بندی می‌شوند. در این راستا، خبرگان نظرات خود را در مورد معیارها به‌صورت عبارات زبانی (کلامی) جدول ۲ بیان می‌کنند (Ocampo, 2022).

جدول ۲- قوانین تبدیل عبارات زبانی به اعداد فازی مثلثی برای مقایسات زوجی

عبارات کلامی	عدد فازی
اهمیت برابر	(۱ , ۱ ,۱)
اهمیت کم	(۰/۶۷ , ۱ , ۱/۵)
نسبتاً مهم	(۱/۵ , ۲ , ۲/۵)
خیلی مهم	(۲/۵ , ۳ , ۳/۵)
کاملاً مهم	(۳/۵ , ۴ , ۴/۵)

مأخذ: اُکامپو (Ocampo, 2022)

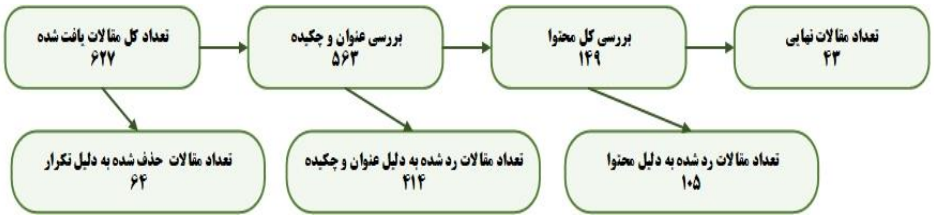
پس از تعیین وزن‌های اولیه فازی برای هر معیار، فرآیند مقایسات زوجی انجام می‌شود که در آن، محاسبهٔ اهمیت هر معیار نسبت به معیار دیگر بر اساس نسبت وزن‌های فازی آنها صورت می‌گیرد. این مقادیر فازی به‌عنوان اهمیت مقایسه‌ای معیارها ثبت و در قالب برداری از روابط فازی نمایش داده می‌شوند. در گام بعدی، ضرایب وزن نهایی معیارها تعیین می‌شود که باید شرایط سازگاری و گذارندگی را برآورده کنند، که منظور از آن حفظ روابط منطقی میان اهمیت معیارها در مقایسات چندسطحی است. سپس، یک مدل بهینه‌سازی برای حداقل‌سازی انحراف از سازگاری کامل[1] تدوین می‌شود تا اطمینان حاصل شود که وزن‌های به‌دست‌آمده به‌طور هماهنگ و معتبر توزیع شده‌اند. در نهایت، وزن‌های فازی نهایی با استفاده از رابطه مرکز ثقل به مقادیر عددی غیرفازی تبدیل می‌شوند تا امکان استفاده از آنها در تحلیل‌های بعدی فراهم شود. این روش دقت فرآیند تصمیم‌گیری را افزایش می‌دهد و قابلیت مدیریت عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی‌های خبره‌محور را نیز تقویت می‌کند.

نتایج و بحث

فرآیند پژوهش حاضر با روش فراترکیب آغاز شد که نخستین گام آن، طراحی دقیق پرسش پژوهش به‌منظور تبیین هدف کلی و تعیین مسیر تحقیق بود. در این راستا، سؤالات اصلی پژوهش عبارت‌اند از: «چالش‌های کلیدی مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم کدامند؟» و «این چالش‌ها در ابعاد توسعه پایدار چگونه دسته‌بندی می‌شوند؟». این سؤالات زمینه را برای شناسایی جامع و عمیق چالش‌های مرتبط فراهم کرده‌اند.

1. Deviation from Full Consistency (DFC)

در گام بعد، فرآیند جست‌وجوی نظام‌مند با هدف شناسایی و گردآوری مطالعات مرتبط انجام شده، که این کار در پایگاه‌های معتبر Web of Science و Scopus با استفاده از کلمات کلیدی نظیر digital, smart, intelligent, agri-food, agriculture, wheat, supply chain management, challenges, barriers صورت گرفته است. بازه زمانی جست‌وجو بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ تعیین شده و مقالات علمی منتشرشده در نشریات داوری‌شده انتخاب شده است. نتیجه این جست‌وجو شناسایی ۵۲۳ مقاله در Web of Science و ۱۰۴ مقاله در Scopus بود. سپس، مقالات شناسایی‌شده با هدف تضمین کیفیت و ارتباط با موضوع پژوهش مورد ارزیابی دقیق قرار گرفتند. ابتدا عناوین، کلیدواژه‌ها و چکیده‌ها بررسی شدند و تنها مقالاتی که بیشترین ارتباط را با موضوع تحقیق داشتند، انتخاب شدند. معیارهای ورود مقالات شامل ارتباط مستقیم با چالش‌های مدیریت زنجیره تأمین هوشمند محصولات کشاورزی و گندم، استفاده از فناوری‌های هوشمند، تمرکز بر ابعاد توسعه پایدار (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) و انتشار در نشریات معتبر علمی بودند. همچنین، مقالاتی که روش‌شناسی ضعیف یا تحلیل ناکافی داشتند، فاقد ارتباط با موضوع بودند، یا به زبان‌هایی غیر از انگلیسی نوشته شده بودند، از فهرست حذف شدند. این معیارها به‌منظور اطمینان از جامعیت و کیفیت بالای مقالات انتخاب‌شده تعریف شدند. در شکل ۲، خلاصه فرآیند انتخاب مطالعات نمایش داده شده است.



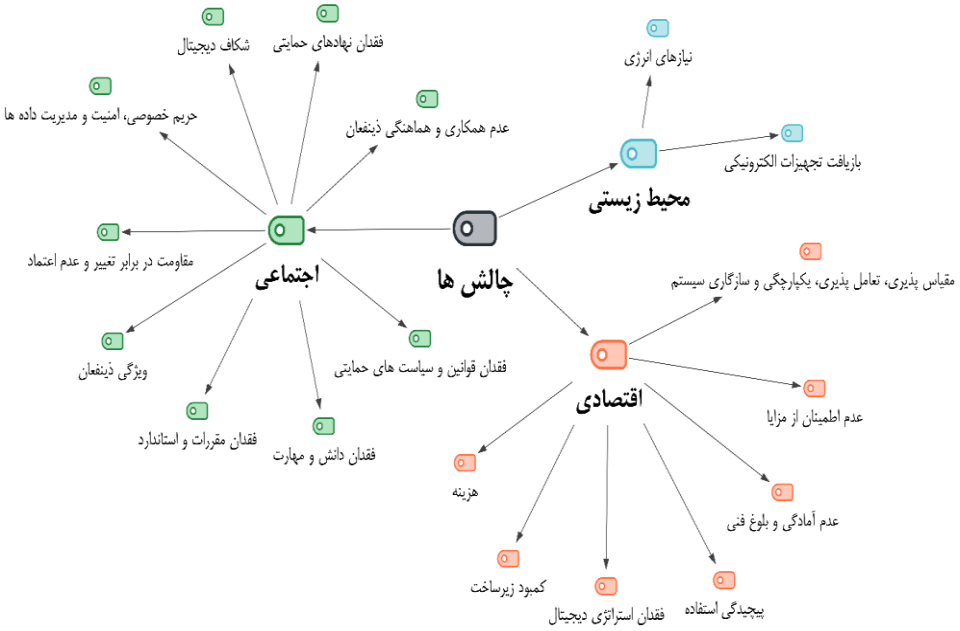
مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۲- خلاصه فرآیند انتخاب مطالعات

در گام استخراج داده‌ها و تحلیل و ترکیب یافته‌ها، تحلیل مقالات نهایی با استفاده از روش کدگذاری نظری و نرم‌افزار MAXQDA انجام شد. مراحل تحلیل به‌شرح زیر انجام گرفت:

- کدگذاری باز: استخراج کدهای اولیه از متن مقالات.
- کدگذاری محوری: ادغام و پالایش کدها برای تبدیل آنها به مضامین اصلی.
- کدگذاری گزینشی: دسته‌بندی مضامین اصلی بر اساس شباهت مفهومی و نزدیکی کاربردی.

این فرآیند منجر به شناسایی و دسته‌بندی چالش‌های کلیدی مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم در سه بعد اصلی توسعه پایدار (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) شد.



مأخذ: یافته‌های پژوهش

شکل ۳- کدهای نظری چالش‌های مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم

در نهایت، نتایج این تحلیل به‌صورت یک چارچوب مفهومی ارائه شد که در جدول ۳ و شکل ۳ نمایش داده شده‌اند. این چارچوب نمایی جامع از چالش‌های مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم با رویکرد توسعه پایدار ارائه می‌دهد و مبنایی برای ارائه راهکارهای عملیاتی فراهم می‌کند.

جدول ۳- چالش‌های مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم

بعد	مؤلفه	مفاهیم	منبع
زیست‌محیطی	بازیافت تجهیزات الکترونیکی	◆ عدم وجود زیرساخت‌های جامع و کارآمد ◆ وجود مواد شیمیایی خطرناک ◆ چرخه عمر کوتاه تجهیزات هوشمند ◆ آگاهی محدود ذی‌نفعان درباره پیامدهای زیست‌محیطی	Da Silveira et al., 2021; Narwane et al., 2022; Nisar et al., 2024
	نیازهای انرژی	◆ فقدان زیرساخت‌های مناسب انرژی ◆ وابستگی به منابع تجدیدناپذیر ◆ چرخه عمر کوتاه سامانه‌های ذخیره‌سازی	Kumar et al., 2022a; Da Silveira et al., 2023b; Derakhti et al., 2023; Lezoche et al., 2020; Mowla et al., 2023; Narwane et al., 2022; Nurgazina et al., 2021; Virmani & Singh, 2024
اجتماعی	ویژگی ذی‌نفعان	◆ تفاوت‌های نسلی و سنی ◆ سواد دیجیتال پایین ◆ آگاهی محدود از فناوری‌ها ◆ ذهنیت دیجیتال سنتی ◆ فرهنگ سنتی و محدودیت‌های اجتماعی	Kumar et al., 2022a; Aamer et al., 2021; Amentae & Gebresenbet, 2021; Balyan et al., 2024; Carmela Annosi et al., 2020; Chanchaichujit et al., 2024; Dibbern et al., 2024; Gupta & Kumar, 2023; Lahane et al., 2023; Limpamont et al., 2024; Nayal et al., 2023; Nurgazina et al., 2021; Kumar et al., 2022b; Saha et al., 2025; Shepherd et al., 2020; Sonar et al., 2024
	فقدان دانش و مهارت	◆ کمبود دانش و آگاهی عمومی ◆ فقدان مهارت‌های عملی ◆ کمبود نیروی متخصص ◆ کمبود زیرساخت‌های آموزشی	Kumar et al., 2022a; Aamer et al., 2021; Carmela Annosi et al., 2020; Chanchaichujit et al., 2024; Da Silveira et al., 2023a; Derakhti et al., 2023; Dibbern et al., 2024; Dos Santos Silva et al., 2024; Gupta & Kumar, 2023; Khan et al., 2023; Lahane et al., 2023; Lezoche et al., 2020; Limpamont et al., 2024; Menon & Jain, 2024; Mohammed et al., 2023; Narwane et al., 2022; Nayal et al., 2023; Nurgazina et al., 2021; Kumar et al., 2022b; Saha et al., 2025; Shepherd et al., 2020; Sullivan et al., 2024; Toader et al., 2024; Vern et al., 2023; Virmani & Singh, 2024; Wang et al., 2024; Weerabahu et al., 2022; Zhao et al., 2024; Zkik et al., 2023

بعد	مؤلفه	مفاهیم	منبع
	مقاومت در برابر تغییر و عدم اعتماد	◆ تهدید هویت شغلی و فرهنگی ◆ مقاومت فرهنگی در برابر تغییر ◆ جایگزینی شغل با فناوری ◆ اختلال در دانش تجربی و بومی ◆ عدم اعتماد به فناوری‌های هوشمند ◆ عدم اعتماد میان ذی‌نفعان ◆ فشار روانی ناشی از تغییرات ◆ نبود سابقه مثبت ◆ چالش‌های اخلاقی در تحول دیجیتال	Kumar et al., 2022a; Amentae & Gebresenbet, 2021; Chanchaichujit et al., 2024; Costa et al., 2023; Da Silveira et al., 2023b; Dibbern et al., 2024; Dora et al., 2022; Dos Santos Silva et al., 2024; Khan et al., 2023; Lahane et al., 2023; Lezoche et al., 2020; Limpamont et al., 2024; Manning et al., 2022; Mowla et al., 2023; Narwane et al., 2022; Nayal et al., 2023; Nisar et al., 2024; Nurgazina et al., 2021; Rose et al., 2021; Kumar et al., 2022b; Saha et al., 2025; Shepherd et al., 2020; Sullivan et al., 2024; Vern et al., 2023; Virmani & Singh, 2024; Weerabahu et al., 2022; Yadav & Majumdar, 2024; Zhao et al., 2024; Zkik et al., 2023
	عدم همکاری و هماهنگی ذی‌نفعان	◆ حفظ مزیت رقابتی و مقاومت در اشتراک‌گذاری اطلاعات ◆ چالش‌های ارتباطی میان بازیگران زنجیره تأمین ◆ چندملیتی بودن زنجیره تأمین ◆ عدم همکاری در سطح منابع محدود ◆ زمان‌بر بودن ایجاد روابط همکاری	Amentae & Gebresenbet, 2021; Aamer et al., 2021; Derakhti et al., 2023; Dibbern et al., 2024; Gupta & Kumar, 2023; Khan et al., 2023; Lahane et al., 2023; Nurgazina et al., 2021; Saha et al., 2025; Sullivan et al., 2024; Vern et al., 2023; Weerabahu et al., 2022
	شکاف دیجیتال	◆ دسترسی نابرابر به زیرساخت‌های فناوری ◆ تمرکز قدرت در دست شرکت‌های بزرگ فناوری ◆ شکاف داده‌ای و سوءاستفاده از اطلاعات ◆ عدم تعادل در توسعه فناوری میان مناطق شهری و روستایی ◆ کاهش نقش کشاورزان در تصمیم‌گیری‌ها ◆ عدم دسترسی به اطلاعات به‌روز ◆ فقدان توانایی مذاکره در میان کشاورزان خرده‌پا ◆ عدم شفافیت در قراردادها و شرایط استفاده ◆ عدم توانایی استفاده از فناوری‌های پیشرفته ◆ تنوع زبانی در کشورهای چندزبانه ◆ استفاده از زبان تخصصی و علمی	Carmela Annosi et al., 2020; Da Silveira et al., 2023a; Kukk et al., 2022; Limpamont et al., 2024; Nurgazina et al., 2021; Rose et al., 2021; Shepherd et al., 2020; Sullivan et al., 2024; Zkik et al., 2023

بعد	مؤلفه	مفاهیم	منبع
	فقدان مقررات و استاندارد	◆ نبود استانداردهای فنی یکپارچه ◆ کمبود مقررات مربوط به مالکیت داده‌ها ◆ نبود پروتکل‌های امنیتی استاندارد ◆ فقدان مقررات جهانی و منطقه‌ای ◆ کمبود قوانین برای مدیریت کلان‌داده‌ها ◆ قوانین مرتبط با حریم خصوصی و حفاظت از داده‌ها ◆ نبود استانداردهای تعامل‌پذیری	Kumar et al., 2022a; ,Aamer et al., 2021; Amentae & Gebresenbet, 2021; Chanchaichujit et al., 2024; Da Silveira et al., 2023a; Derakhti et al., 2023; Dibbern et al., 2024; Dos Santos Silva et al., 2024; Gupta & Kumar, 2023; Khan et al., 2023; Lahane et al., 2023; Lezoche et al., 2020; Limpamont et al., 2024; Menon & Jain, 2024; Mohammed et al., 2023; Narwane et al., 2022; Nisar et al., 2024; Nurgazina et al., 2021; Kumar et al., 2022b; Shepherd et al., 2020; Toader et al., 2024; Vern et al., 2023; Virmani & Singh, 2024; Wang et al., 2024; Yadav & Majumdar, 2024; Zhao et al., 2024
	فقدان سیاست‌های حمایتی	◆ نبود چارچوب‌های سیاستی شفاف ◆ کمبود حمایت مالی و مشوق‌های دولتی ◆ ضعف در سرمایه‌گذاری دولتی ◆ نبود حمایت از آموزش و ظرفیت‌سازی ◆ مدل‌های ناکارآمد یارانه‌ای ◆ ضعف در هماهنگی میان سازمان‌های دولتی و خصوصی	Kumar et al., 2022a; Aamer et al., 2021; Chanchaichujit et al., 2024; Costa et al., 2023; Derakhti et al., 2023; Dibbern et al., 2024; Gupta & Kumar, 2023; Lahane et al., 2023; Nayal et al., 2023; Nurgazina et al., 2021; Shepherd et al., 2020; Wang et al., 2024; Zhao et al., 2024
	فقدان نهادهای حمایتی	◆ فقدان سرمایه‌گذاری در تحقیق‌وتوسعه ◆ نبود همکاری میان صنعت و دانشگاه ◆ مشارکت محدود صنعت ◆ نبود مراکز حمایت از فناوری ◆ کمبود نهادهای آموزشی و توسعه مهارت ◆ نبود نهادهای واسطه	Kumar et al., 2022a; Aamer et al., 2021; Carmela Annosi et al., 2020; Costa et al., 2023; Da Silveira et al., 2023a; Dos Santos Silva et al., 2024; Lahane et al., 2023; Limpamont et al., 2024; Pedersen et al., 2024; Shepherd et al., 2020; Wang et al., 2024; Zhao et al., 2024
	حریم خصوصی، مدیریت و امنیت داده‌ها	◆ نگرانی‌های حریم خصوصی و مالکیت داده‌ها ◆ مخاطرات امنیت سایبری ◆ چالش‌های مدیریت داده‌های بزرگ ◆ نبود استانداردهای مدیریت داده ◆ مسائل اخلاقی در حفظ حریم خصوصی	Kumar et al., 2022a; Aamer et al., 2021; Amentae & Gebresenbet, 2021; Balyan et al., 2024; Chanchaichujit et al., 2024; Da Silveira et al., 2023a; Carmela Annosi et al., 2020; Derakhti et al., 2023; Dibbern et al., 2024; Dora et al., 2022; Gupta & Kumar, 2023; Khan et al., 2023; Kukk et al., 2022; Lahane et al., 2023; Lezoche et al., 2020; Menon & Jain, 2024; Mowla et al., 2023; Narwane et al., 2022; Nayal et al., 2023; Nisar et al., 2024; Nurgazina et al., 2021; Rose et al., 2021; Kumar et al., 2022b; Saha et al., 2025; Shepherd et al., 2020; Sonar et al., 2024; Sullivan et al., 2024; Toader et al., 2024; Vern et al., 2023; Virmani & Singh, 2024; Wang et al., 2024; Yadav & Majumdar, 2024; Zkik et al., 2023

بعد	مؤلفه	مفاهیم	منبع
اقتصادی	فقدان راهبرد دیجیتال	◆ ساختار ناکارآمد زنجیره تأمین ◆ فقدان راهبرد روشن برای دیجیتالی‌سازی ◆ تردید در سرمایه‌گذاری ◆ فقدان همکاری سازمانی ◆ ضعف سیاست‌ها و فرهنگ‌سازمانی ◆ نبود هماهنگ‌کننده فرآیندهای کسب‌وکار	Aamer et al., 2021; Da Silveira et al., 2023a; Dibbern et al., 2024; Khan et al., 2023; Lahane et al., 2023; Lezoche et al., 2020; Nayal et al., 2023; Nisar et al., 2024; Nurgazina et al., 2021; Kumar et al., 2022b; Virmani & Singh, 2024; Weerabahu et al., 2022; Zkik et al., 2023
	هزینه	◆ هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه ◆ هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری ◆ هزینه‌های آموزشی و زمانی ◆ عدم اطمینان از بازگشت سرمایه ◆ هزینه‌های انرژی و مصرف منابع ◆ محدودیت منابع مالی در میان کشاورزان خرده‌پا و کسب‌وکارهای کوچک و متوسط	Kumar et al., 2022a; Aamer et al., 2021; Amentae & Gebresenbet, 2021; Carmela Annosi et al., 2020; Chanchaichujit et al., 2024; Costa et al., 2023; Da Silveira et al., 2023a; Derakhti et al., 2023; Dibbern et al., 2024; Dos Santos Silva et al., 2024; Gupta & Kumar, 2023; Khan et al., 2023; Lahane et al., 2023; Lezoche et al., 2020; Limpamont et al., 2024; Menon & Jain, 2024; Mohammed et al., 2023; Narwane et al., 2022; Nayal et al., 2023; Nisar et al., 2024; Nurgazina et al., 2021; Kumar et al., 2022b; Saha et al., 2025; Shepherd et al., 2020; Sonar et al., 2024; Sullivan et al., 2024; Toader et al., 2024; Vern et al., 2023; Virmani & Singh, 2024; Wang et al., 2024; Weerabahu et al., 2022; Yadav & Majumdar, 2024; Zhao et al., 2024
	عدم اطمینان از مزایا	◆ عدم تمایز ملموس میان فناوری‌های جدید و روش‌های فعلی ◆ تصورات نابرابری در توزیع منافع ◆ عدم شفافیت در بازگشت سرمایه ◆ کمبود اطلاعات شفاف و مستند درباره مزایا ◆ پیچیدگی فناوری‌ها و عدم تطابق با نیازهای عملی ◆ تجربه‌های منفی یا ناکافی از پیاده‌سازی ◆ مزایای کوتاه‌مدت نامشخص ◆ عدم تطابق میان انتظارات و نتایج	Balyan et al., 2024; Chanchaichujit et al., 2024; Costa et al., 2023; Dos Santos Silva et al., 2024; Gupta & Kumar, 2023; Lahane et al., 2023; Limpamont et al., 2024; Narwane et al., 2022; Nayal et al., 2023; Shepherd et al., 2020; Sullivan et al., 2024; Virmani & Singh, 2024; Wang et al., 2024; Weerabahu et al., 2022; Zhao et al., 2024
	عدم آمادگی و بلوغ فنی	◆ بلوغ ناکافی فناوری‌های نوظهور ◆ نبود آزمایش‌های گسترده در شرایط واقعی ◆ نبود راهنمایی راهبردی	Kumar et al., 2022a; Nurgazina et al., 2021; Virmani & Singh, 2024; Weerabahu et al., 2022; Yadav & Majumdar, 2024; Zhao et al., 2024

بعد	مؤلفه	مفاهیم	منبع
	مقیاس‌پذیری، تعامل‌پذیری، یکپارچگی و سازگاری سیستم	◆ ناسازگاری با سامانه‌های قدیمی و روش‌های سنتی ◆ نبود تعامل‌پذیری میان سیستم‌ها ◆ نبود استانداردهای یکپارچه ◆ پیچیدگی در ادغام سامانه‌های دیجیتال و فیزیکی ◆ هزینه‌های بالای سازگاری و تعامل‌پذیری ◆ مشکلات مربوط به تبادل داده‌ها ◆ وابستگی به ارائه‌دهندگان خاص ◆ مقیاس‌پذیری محدود	Kumar et al., 2022a; Aamer et al., 2021; Chanchaichujit et al., 2024; Costa et al., 2023; Da Silveira et al., 2023a; Da Silveira et al., 2023b; Derakhti et al., 2023; Dibbern et al., 2024; Gupta & Kumar, 2023; Khan et al., 2023; Kukk et al., 2022; Lahane et al., 2023; Lezoche et al., 2020; Menon & Jain, 2024; Mohammed et al., 2023; Mowla et al., 2023; Narwane et al., 2022; Nayal et al., 2023; Nisar et al., 2024; Nurgazina et al., 2021; Kumar et al., 2022b; Shepherd et al., 2020; Sullivan et al., 2024; Toader et al., 2024; Vern et al., 2023; Virmani & Singh, 2024; Wang et al., 2024; Weerabahu et al., 2022; Yadav & Majumdar, 2024; Zhao et al., 2024; Zkik et al., 2023
	پیچیدگی استفاده و قابلیت اطمینان فناوری	◆ پیچیدگی فنی و عملیاتی ◆ قابلیت اطمینان پایین فناوری‌ها ◆ نبود شفافیت در عملکرد فناوری‌ها ◆ نیاز به تخصص فنی بالا ◆ خرابی‌های ناگهانی و خطرات امنیتی	Kumar et al., 2022a; Aamer et al., 2021; Amentae & Gebresenbet, 2021; Chanchaichujit et al., 2024; Da Silveira et al., 2023a; Da Silveira et al., 2023b; Derakhti et al., 2023; Dora et al., 2022; Khan et al., 2023; Lezoche et al., 2020; Menon & Jain, 2024; Narwane et al., 2022; Nayal et al., 2023; Nisar et al., 2024; Nurgazina et al., 2021; Shepherd et al., 2020; Virmani & Singh, 2024; Zkik et al., 2023
	کمبود زیرساخت	◆ عدم دسترسی به اینترنت پرسرعت و پایدار ◆ عدم وجود تجهیزات نوین و سخت‌افزارهای پیشرفته ◆ نبود سامانه‌های ذخیره‌سازی و پردازش داده ◆ کمبود نیروی متخصص برای نگهداری و مدیریت زیرساخت‌ها ◆ هزینه‌های بالای توسعه زیرساخت ◆ ناکارآمدی زیرساخت‌های انرژی	Kumar et al., 2022a; Aamer et al., 2021; Amentae & Gebresenbet, 2021; Balyan et al., 2024; Carmela Annosi et al., 2020; Costa et al., 2023; Da Silveira et al., 2023b; Derakhti et al., 2023; Dibbern et al., 2024; Dos Santos Silva et al., 2024; Gupta & Kumar, 2023; Khan et al., 2023; Kukk et al., 2022; Lahane et al., 2023; Lezoche et al., 2020; Limpamont et al., 2024; Menon & Jain, 2024; Narwane et al., 2022; Nisar et al., 2024; Nurgazina et al., 2021; Kumar et al., 2022b; Saha et al., 2025; Sullivan et al., 2024; Virmani & Singh, 2024; Wang et al., 2024; Weerabahu et al., 2022; Yadav & Majumdar, 2024; Zhao et al., 2024; Zkik et al., 2023

مأخذ: یافته‌های پژوهش

در مرحله بعد، به‌منظور اعتبارسنجی عوامل شناسایی‌شده در پژوهش، از روش دلفی فازی استفاده شد. در این فرآیند، ابتدا ابعاد و مؤلفه‌های چالش‌های مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم در اختیار خبرگان حوزه‌های دانشگاهی و بخش‌های دولتی و خصوصی فعال در زمینه فناوری‌های هوشمند کشاورزی قرار گرفت تا بر اساس طیف ارائه‌شده در جدول ۱، به هر مؤلفه امتیازدهی کنند. این افراد عبارت بودند از پنج خبره دانشگاهی (با سوابق پژوهشی در زنجیره تأمین کشاورزی و فناوری‌های هوشمند)، دوازده خبره از بخش دولتی (وزارت جهاد کشاورزی و شرکت مادرتخصصی بازرگانی دولتی ایران و دارای مسئولیت در حوزه سیاست‌گذاری، مدیریت زنجیره تأمین گندم و فناوری اطلاعات) و شش خبره از بخش خصوصی (متخصصان شرکت‌های فعال در حوزه فناوری‌های هوشمند کشاورزی، توسعه و پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال در زنجیره تأمین محصولات کشاورزی). نمونه‌گیری به روش گلوله‌برفی انجام شد تا از مشارکت افراد با دانش عمیق در این حوزه اطمینان حاصل شود. شرط ورود به مطالعه داشتن حداقل پنج سال تجربه تخصصی مرتبط بود. از میان مشارکت‌کنندگان، هفت نفر دارای مدرک دکتری و شانزده نفر دارای مدرک کارشناسی ارشد بودند. همچنین، از نظر سابقه کاری، سه نفر بین پنج تا ده سال، هفت نفر بین ده تا پانزده سال، پنج نفر بین پانزده تا بیست سال، هفت نفر بین بیست تا ۲۵ سال و یک نفر بیش از ۲۵ سال تجربه داشتند. به‌منظور تسهیل جمع‌آوری داده‌ها، پرسشنامه‌ها به‌صورت الکترونیکی توزیع شد که ضمن افزایش دقت و سرعت، امکان تعامل سریع‌تر با مشارکت‌کنندگان را فراهم کرد. روش دلفی فازی در دو مرحله متوالی اجرا شد که طی آن، علاوه بر تأیید مؤلفه‌های شناسایی‌شده، چالش «تحریم‌های سیاسی» نیز به‌عنوان یک مؤلفه جدید از دیدگاه خبرگان استخراج شد. نتایج نهایی این فرآیند در جدول ۴ ارائه شده، که نشان‌دهنده تأیید تمامی مؤلفه‌های شناسایی‌شده توسط خبرگان است.

جدول ۴- نتایج دلفی فازی معیارها

بعد	مؤلفه	کد مؤلفه	میانگین فازی مرحله یک	میانگین غیرفازی مرحله یک	میانگین فازی مرحله دو	میانگین غیرفازی مرحله دو	وضعیت
زیست محیطی	بازیافت تجهیزات الکترونیکی	A1	(۰/۴۷۸,۰/۷۲۸,۰/۹۱۳)	۰/۷۰۷	(۰/۴۸۹,۰/۷۳۹,۰/۹۳۵)	۰/۷۲۱	تأیید
	نیازهای انرژی	A2	(۰/۵۴۳,۰/۷۹۳,۰/۹۷۸)	۰/۷۷۲	(۰/۵۷۶,۰/۸۲۶,۱)	۰/۸۰۱	تأیید
اجتماعی	ویژگی ذی‌نفعان	B1	(۰/۵۲۲,۰/۷۷۲,۰/۹۴۶)	۰/۷۴۶	(۰/۵۲۲,۰/۷۷۲,۰/۹۶۷)	۰/۷۵۴	تأیید
	فقدان دانش و مهارت	B2	(۰/۶۰۹,۰/۸۵۹,۰/۹۸۹)	۰/۸۱۹	(۰/۶۰۹,۰/۸۵۹,۱)	۰/۸۲۲	تأیید
	مقاومت در برابر تغییر و عدم اعتماد	B3	(۰/۵۲۲,۰/۷۷۲,۰/۹۵۷)	۰/۷۵۰	(۰/۵۴۳,۰/۷۹۳,۰/۹۵۷)	۰/۷۶۴	تأیید
	عدم همکاری و هماهنگی ذی‌نفعان	B4	(۰/۵,۰/۷۵,۰/۹۳۵)	۰/۷۲۸	(۰/۵۱۱,۰/۷۶۱,۰/۹۳۵)	۰/۷۳۶	تأیید
	شکاف دیجیتال	B5	(۰/۵,۰/۷۵,۰/۹۱۳)	۰/۷۲۱	(۰/۵۲۲,۰/۷۷۲,۰/۹۴۶)	۰/۷۴۶	تأیید
	فقدان نهادهای حمایتی	B6	(۰/۵۱۱,۰/۷۶۱,۰/۹۰۲)	۰/۷۲۵	(۰/۵۳۳,۰/۷۸۳,۰/۹۲۴)	۰/۷۴۶	تأیید
	فقدان سیاست‌های حمایتی	B7	(۰/۵۷۶,۰/۸۲۶,۰/۹۴۶)	۰/۷۸۳	(۰/۵۷۶,۰/۸۲۶,۰/۹۵۷)	۰/۷۸۶	تأیید
	فقدان مقررات و استاندارد	B8	(۰/۵۱۱,۰/۷۶۱,۰/۹۳۵)	۰/۷۳۶	(۰/۵۲۲,۰/۷۷۲,۰/۹۴۶)	۰/۷۴۶	تأیید
	حریم خصوصی، مدیریت و امنیت داده‌ها	B9	(۰/۴۸۹,۰/۷۳۹,۰/۸۹۱)	۰/۷۰۷	(۰/۵۱۱,۰/۷۶۱,۰/۹۱۳)	۰/۷۲۸	تأیید
اقتصادی	فقدان راهبرد دیجیتال	C1	(۰/۴۷۸,۰/۷۲۸,۰/۹۴۶)	۰/۷۱۷	(۰/۵,۰/۷۵,۰/۹۵۷)	۰/۷۳۶	تأیید
	هزینه	C2	(۰/۶۰۹,۰/۸۵۹,۰/۹۷۸)	۰/۸۱۵	(۰/۶۰۹,۰/۸۵۹,۰/۹۷۸)	۰/۸۱۵	تأیید
	عدم اطمینان از مزایا	C3	(۰/۵۱۱,۰/۷۶۱,۰/۹۳۵)	۰/۷۳۶	(۰/۵۲۲,۰/۷۷۲,۰/۹۳۵)	۰/۷۴۳	تأیید
	عدم آمادگی و بلوغ فنی	C4	(۰/۵۲۲,۰/۷۷۲,۰/۹۳۵)	۰/۷۴۳	(۰/۵۲۲,۰/۷۷۲,۰/۹۳۵)	۰/۷۴۳	تأیید
	مقیاس‌پذیری، تعامل‌پذیری، یکپارچگی و سازگاری سیستم	C5	(۰/۵,۰/۷۵,۰/۹۲۴)	۰/۷۲۵	(۰/۴۸۹,۰/۷۳۹,۰/۹۲۴)	۰/۷۱۷	تأیید
	پیچیدگی استفاده و قابلیت اطمینان فناوری	C6	(۰/۵۱۱,۰/۷۶۱,۰/۹۳۵)	۰/۷۳۶	(۰/۵۱۱,۰/۷۶۱,۰/۹۴۶)	۰/۷۳۹	تأیید
	کمبود زیرساخت	C7	(۰/۶۲,۰/۸۷,۰/۹۵۷)	۰/۸۱۵	(۰/۶۳,۰/۸۸,۰/۹۷۸)	۰/۸۳۰	تأیید
	تحریم‌های سیاسی[1]	C8			(۰/۶۲,۰/۸۷,۰/۹۶۷)	۰/۸۱۹	تأیید

مأخذ: یافته‌های پژوهش

۱- در مرحله اول دلفی فازی، از نظر خبره‌ها، استخراج شده است.

در بخش بعد، از روش فوکام فازی برای تعیین وزن مؤلفه‌ها اســـتفاده شـــد. در مرحله اول، رتبه‌بندی مؤلفه‌ها بر اساس میانگین غیرفازی روش دلفی فازی و همچنین، اجماع خبرگان انجام شد که برای نمونه، برای مؤلفه‌های اجتماعی، به‌صـــورت B۲>B۷>B۳>B۱>B۶>B۵>B۸>B۴>B۹ تعیین شد.

در مرحله دوم، پرسشنامه مقایسات زوجی برای تعیین اهمیت نسبی هر مؤلفه تدوین شد و در اختیار خبرگان قرار گرفت. در این مرحله، هر مؤلفه به‌صـــورت زوجی با مؤلفه‌ای که در رتبه‌بندی پس از آن قرار دارد، مقایسه شد. برای نمونه، خبرگان میزان اهمیت مؤلفه B۲ (فقدان دانش و مهارت) را نسبت به B۷ (فقدان سیاست‌های حمایتی) و به همین ترتیب، برای سایر مقایسات زوجی، ارزیابی کردند. این مقایسات بر اساس مقیاس ارائه‌شده در جدول ۲ انجام شد. پس از آن، ادغام داده‌ها صورت گرفت. نتایج نهایی در جدول ۵ آمده است. شایان ذکر است که در این مرحله، هشت خبره متخصص مشارکت داشتند که همگی دارای بیش از بیست سال سابقه کاری در حوزه مدیریت زنجیره تأمین و فناوری‌های هوشمند کشاورزی بودند.

جدول ۵- مقایسه زوجی فازی مؤلفه‌های اجتماعی

	B2	B7	B3	B1	B6	B5	B8	B4	B9
ϕ	(۱,۱,۱)	(۱/۱۰۹,۱/۵۴۲,۲/۰۶۴)	(۱/۳۵۶,۱/۸۳۴,۲/۳۴۵)	(۱/۷۰۴,۲/۲۱۳,۲/۷۱۹)	(۱/۸۱۷,۲/۳۲۸,۲/۸۲۴)	(۲/۰۶۴,۲/۵۷۷,۳/۰۸۵)	(۲/۵۵۱,۳/۰۶۴,۳/۵۷۳)	(۲/۷۱۹,۳/۲۲۴,۳/۷۲۷)	(۳/۵,۴,۴/۵)

مأخذ: یافته‌های پژوهش

در روش تعیین وزن معیارها، در نخســتین گام، اولویت مقایســه‌ای معیارها تعیین می‌شــود که محاسبات مربوط به آن در ادامه ارائه می‌شود.

$$\varphi_{\frac{B2}{B7}} = \frac{(1/109,1/542,2/064)}{(1,1,1)} = (1/109,1/542,2/064)$$

$$\varphi_{\frac{B7}{B3}} = \frac{(1/356,1/834,2/345)}{(1/109,1/542,2/064)} = (0/657,1/189,2/115)$$

$$\varphi_{\frac{B3}{B1}} = \frac{(1/704,2/213,2/719)}{(1/356,1/834,2/345)} = (0/727,1/207,2/005) \qquad \varphi_{\frac{B1}{B6}} = \frac{(1/817,2/328,2/836)}{(1/704,2/213,2/719)} = (0/668,1/052,1/664)$$

$$\varphi_{\frac{B6}{B5}} = \frac{(2/064,2/577,3/085)}{(1/817,2/328,2/836)} = (0/728,1/107,1/698) \qquad \varphi_{\frac{B5}{B8}} = \frac{(2/551,3/064,3/573)}{(2/064,2/577,3/085)} = (0/827,1/189,1/731)$$

$$\varphi_{\frac{B8}{B4}} = \frac{(2/719,3/224,3/727)}{(2/551,3/064,3/573)} = (0/761,1/052,1/461) \qquad \varphi_{\frac{B4}{B9}} = \frac{(3/5,4,4/5)}{(2/719,3/224,3/727)} = (0/939,1/241,1/655)$$

$$\varphi_{\frac{B2}{B3}} = \varphi_{\frac{B2}{B7}} \times \varphi_{\frac{B7}{B3}} = (1/109,1/542,2/064) \otimes (0/657,1/189,2/115) = (0/729,1/833,4/365)$$

$$\varphi_{\frac{B7}{B1}} = (0/478,1/435,4/241) \qquad \varphi_{\frac{B3}{B6}} = (0/486,1/27,3/336)$$

$$\varphi_{\frac{B1}{B5}} = (0/486,1/165,2/825) \qquad \varphi_{\frac{B6}{B8}} = (0/602,1/316,2/939)$$

$$\varphi_{\frac{B5}{B4}} = (0/629,1/251,2/529) \qquad \varphi_{\frac{B8}{B9}} = (0/715,1/306,2/418)$$

سپس، مدل نهایی تشکیل می‌شود که در پی، آمده است.

Min z;

|l1-0/668×u6|≤z; |l3-0/727×u1|≤z; |l7-0/657×u3|≤z; |l2-1/109×u7|≤z;
|m1-1/052×m6|≤z; |m3-1/207×m1|≤z; |m7-1/189×m3|≤z; |m2-1/542×m7|≤z;
|u1-1/664×l6|≤z; |u3-2/005×l1|≤z; |u7-2/115×l3|≤z; |u2-2/064×l7|≤z;

|l4-0/939×u9|≤z; |l8-0/761×u4|≤z; |l5-0/827×u8|≤z; |l6-0/728×u5|≤z;
|m4-1/241×m9|≤z; |m8-1/052×m4|≤z; |m5-1/189×m8|≤z; |m6-1/107×m5|≤z;
|u4-1/655×l9|≤z; |u8-1/461×l4|≤z; |u5-1/731×l8|≤z; |u6-1/698×l5|≤z;

|l1-0/486×u5|≤z; |l3-0/486×u6|≤z; |l7-0/478×u1|≤z; |l2-0/729×u3|≤z;
|m1-1/165×m5|≤z; |m3-1/27×m6|≤z; |m7-1/435×m1|≤z; |m2-1/833×m3|≤z;
|u1-2/825×l5|≤z; |u3-3/336×l6|≤z; |u7-4/241×l1|≤z; |u2-4/365×l3|≤z;

|l8-0/715×u9|≤z; |l5-0/629×u4|≤z; |l6-0/602×u8|≤z;

```
|m6-1/316×m8|≤z;   |m5-1/251×m4|≤z;   |m8-1/306×m9|≤z;
|u6-2/939×l8|≤z;   |u5-2/529×l4|≤z;   |u8-2/418×l9|≤z;

0/167*l1+0/668*m1+0/167*u1+0/167*l2+0/668*m2+0/167*u2+0/167*l3+0/668*m3
+0/167*u3
+0/167*l4+0/668*m4+0/167*u4+0/167*l5+0/668*m5+0/167*u5+0/167*l6+0/668*m
6+0/167*u6+
0/167*l7+0/668*m7+0/167*u7+0/167*l8+0/668*m8+0/167*u8+0/167*l9+0/668*m9
+0/167*u9=1

l1<=m1;   m1<=u1;   l1>=0;
l2<=m2;   m2<=u2;   l2>=0;
l3<=m3;   m3<=u3;   l3>=0;
l4<=m4;   m4<=u4;   l4>=0;
l5<=m5;   m5<=u5;   l5>=0;
l6<=m6;   m6<=u6;   l6>=0;
l7<=m7;   m7<=u7;   l7>=0;
l8<=m8;   m8<=u8;   l8>=0;
l9<=m9;   m9<=u9;   l9>=0;
```

سپس، مدل بالا با استفاده از نرم‌افزار Lingo نسخه ۱۸ حل شد و اوزان مؤلفه‌های اجتماعی محاسبه شده، که در جدول ۶ آمده است. بر این اساس، معیارهای «فقدان دانش و مهارت» با وزن ۰/۱۹۳۶ رتبه اول، «فقدان سیاست‌های حمایتی» با وزن ۰/۱۲۷۱ رتبه دوم و «مقاومت در برابر تغییر و عدم اعتماد» با وزن ۰/۱۰۴ رتبه سوم را به خود اختصاص داده‌اند.

این نتایج نشان می‌دهد که از منظر خبرگان، نارسایی‌های دانشی و مهارتی در میان بهره‌برداران و فعالان زنجیره مهم‌ترین مانع در مسیر استقرار زنجیره تأمین هوشمند گندم محسوب می‌شود. در واقع، کمبود آموزش‌های تخصصی، آشنایی محدود با فناوری‌های نوین و ضعف در توانمندسازی نیروی انسانی منجر به کاهش ظرفیت تطبیق با تحولات فناورانه شده است.

رتبه دوم یا «فقدان سیاست‌های حمایتی» نشان‌دهنده این است که عدم وجود برنامه‌ریزی هدفمند و سیاست‌های مشوق‌محور در سطح کلان سد راه نهادینه‌سازی فناوری‌های پایدار و تقویت همکاری بین‌بخشی است. در همین راستا، ناکارآمدی در ارائه یارانه‌های هوشمند، خلأ در قوانین تشویقی و عدم انسجام در حمایت‌های دولتی از مصادیق بارز این چالش به‌شمار می‌آیند.

سومین چالش مهم یا همان «مقاومت در برابر تغییر و عدم اعتماد» بیانگر بعد فرهنگی–اجتماعی ماجراست، به‌گونه‌ای که عدم اعتماد به سامانه‌های فناورمحور و ترجیح به استفاده از

روش‌های سنتی موجب کندی روند نوآوری و تحول در زنجیره تأمین می‌شود. این مسئله، به‌ویژه در مناطق روستایی و در میان کشاورزان سنتی، نمود بیشتری دارد و لزوم اجرای برنامه‌های آموزشی مشارکتی و تقویت اعتماد اجتماعی را گوشزد می‌کند. در مجموع، تحلیل یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که چالش‌های اجتماعی در استقرار زنجیره تأمین هوشمند، نه صرفاً فنی یا زیرساختی، بلکه به‌شدت مرتبط با ابعاد انسانی، نهادی و فرهنگی هستند که بدون مداخلات چندبعدی، رفع آنها دشوار خواهد بود.

جدول ۶- وزن و رتبه مؤلفه‌های اجتماعی

کد	نام مؤلفه	وزن فازی	وزن قطعی	رتبه
B1	ویژگی ذی‌نفعان	(۰/۰۳۹۹,۰/۱۰۷۲,۰/۱۰۷۲)	۰/۰۹۶۰	۷
B2	فقدان دانش و مهارت	(۰/۱۱۶۶,۰/۲۰۹,۰/۲۰۹)	۰/۱۹۳۶	۱
B3	مقاومت در برابر تغییر و عدم اعتماد	(۰/۰۵۵۶,۰/۱۱۳۷,۰/۱۱۳۷)	۰/۱۰۴۰	۳
B4	عدم همکاری و هماهنگی ذی‌نفعان	(۰/۰۵۵۶,۰/۱۰۸۶,۰/۱۰۸۶)	۰/۰۹۹۸	۴
B5	شکاف دیجیتال	(۰/۰۴۹۹,۰/۱۰۷,۰/۱۰۷)	۰/۰۹۷۵	۶
B6	فقدان نهادهای حمایتی	(۰/۰۴۴۲,۰/۱۱۰۲,۰/۱۱۰۲)	۰/۰۹۹۲	۵
B7	فقدان سیاست‌های حمایتی	(۰/۰۸۴۹,۰/۱۳۵۵,۰/۱۳۵۵)	۰/۱۲۷۱	۲
B8	فقدان مقررات و استاندارد	(۰/۰۴۸۹,۰/۱۰۱۱,۰/۱۰۱۱)	۰/۰۹۲۴	۸
B9	حریم خصوصی، مدیریت و امنیت داده‌ها	(۰/۰۵۵۷,۰/۰۹۵۱,۰/۰۹۵۱)	۰/۰۸۸۵	۹

مأخذ: یافته‌های پژوهش

در ادامه، به طریق مشابه، برای مؤلفه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی نیز مقایسه‌های زوجی انجام شده و اوزان آنها با استفاده از روش فوکام فازی محاسبه شده، که نتایج آن در جدول ۷ آمده است. بر این اساس، در بین مؤلفه‌های زیست‌محیطی، «نیازهای انرژی» با وزن ۰/۶۴۹ به‌عنوان مهم‌ترین چالش شناسایی شد، در حالی که «بازیافت تجهیزات الکترونیکی» با وزن ۰/۳۴۹ در رتبه دوم قرار گرفت. تحلیل این نتایج نشان می‌دهد که مسئله مصرف انرژی در فرآیندهای فناورانه زنجیره تأمین همچنان به‌عنوان یک عامل بازدارنده اصلی در مسیر پایداری زیست‌محیطی مطرح است. نیاز به برق پایدار برای تجهیزات هوشمند، وابستگی بالا به سوخت‌های فسیلی و ناکارآمدی در مصرف انرژی چالش‌هایی هستند که ضمن افزایش رد پای کربن، هزینه‌های عملیاتی زنجیره را نیز به‌طور

قابل ملاحظه افزایش می‌دهند. در این میان، توجه به فناوری‌های کم‌مصرف، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر و توسعه زیرساخت‌های مدیریت انرژی از جمله اقدامات ضروری برای ارتقای پایداری در این بعد محسوب می‌شود. رتبه دوم یا «بازیافت تجهیزات الکترونیکی» چالشی کمتر مورد توجه در ادبیات پیشین است، اما یافته‌های پژوهش حاضر آن را به‌عنوان یکی از موانع جدی شناسایی کرده است. افزایش استفاده از حسگرها، دستگاه‌های هوشمند و سامانه‌های دیجیتال منجر به تولید زباله‌های الکترونیکی شده است که در صورت نبود سازوکار مناسب برای بازیافت، می‌تواند به آلودگی منابع خاک و آب بینجامد. این نتیجه بر ضرورت تدوین سیاست‌های مدیریت چرخه عمر تجهیزات و ایجاد زنجیره‌های معکوس در نظام‌های کشاورزی هوشمند تأکید دارد.

در بعد اقتصادی نیز چالش «کمبود زیرساخت» با وزن ۰/۲۲۱۸ در صدر قرار گرفت. این چالش منعکس‌کننده کاستی‌های جدی در بستر فنی- فناورانه کشور برای پذیرش و توسعه فناوری‌های هوشمند در کشاورزی است. فقدان شبکه ارتباطی پایدار، ضعف در تجهیزات ذخیره‌سازی داده و عدم وجود پایگاه‌های اطلاعاتی یکپارچه از جمله مصادیق کلیدی این کمبودهاست که مانع از تحلیل دقیق داده‌های زنجیره و اتخاذ تصمیمات بهنگام و اثربخش می‌شود.

همچنین، «تحریم‌های سیاسی» با وزن ۰/۱۷۰۲ به‌عنوان دومین چالش اقتصادی مطرح شد. این نتیجه بازتاب‌دهنده تأثیر ملموس محدودیت‌های بین‌المللی بر واردات تجهیزات فناورانه، دسترسی به خدمات دانش‌بنیان و نقل‌وانتقال منابع مالی برای پروژه‌های نوآورانه در زنجیره تأمین گندم است. در نهایت، «عدم آمادگی و بلوغ فنی» با وزن ۰/۱۱۳۱ در رتبه سوم قرار گرفت، که نشان‌دهنده فقدان زیرساخت‌های نرم‌افزاری، استانداردهای بومی و مهارت‌های تخصصی مورد نیاز برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمند است.

به‌طور کلی، تحلیل ابعاد سه‌گانه زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی نشان می‌دهد که پیاده‌سازی زنجیره تأمین هوشمند در بخش کشاورزی مستلزم رویکردی میان‌رشته‌ای و سیاست‌گذاری هماهنگ در چند سطح است. نمودار ۱ وزن و اولویت نهایی مؤلفه‌ها در هر کدام از ابعاد را به‌صورت تجمیعی نمایش می‌دهد و می‌تولند مبنایی برای تدوین نقشه راه تحول دیجیتال در زنجیره تأمین گندم ایران فراهم آورد.

جدول ۷- وزن و رتبه نهایی مؤلفه‌ها

بعد	مؤلفه	کد مؤلفه	وزن مؤلفه	رتبه مؤلفه
زیست‌محیطی	بازیافت تجهیزات الکترونیکی	A1	۰,۳۴۹	۲
	نیازهای انرژی	A2	۰,۶۴۹	۱
اجتماعی	ویژگی ذی‌نفعان	B1	۰,۰۹۶	۷
	فقدان دانش و مهارت	B2	۰,۱۹۳۶	۱
	مقاومت در برابر تغییر و عدم اعتماد	B3	۰,۱۰۴	۳
	عدم همکاری و هماهنگی ذی‌نفعان	B4	۰,۰۹۹۸	۴
	شکاف دیجیتال	B5	۰,۰۹۷۵	۶
	فقدان نهادهای حمایتی	B6	۰,۰۹۹۲	۵
	فقدان سیاست‌های حمایتی	B7	۰,۱۲۷۱	۲
	فقدان مقررات و استاندارد	B8	۰,۰۹۲۴	۸
	حریم خصوصی، مدیریت و امنیت داده‌ها	B9	۰,۰۸۸۵	۹
اقتصادی	فقدان راهبرد دیجیتال	C1	۰,۰۹۱۱	۸
	هزینه	C2	۰,۱۰۳۳	۵
	عدم اطمینان از مزایا	C3	۰,۱۰۸۸	۴
	عدم آمادگی و بلوغ فنی	C4	۰,۱۱۳۱	۳
	مقیاس‌پذیری، تعامل‌پذیری، یکپارچگی و سازگاری سیستم	C5	۰,۰۹۸۱	۶
	پیچیدگی استفاده و قابلیت اطمینان فناوری	C6	۰,۰۹۱۶	۷
	کمبود زیرساخت	C7	۰,۲۲۱۸	۱
	تحریم‌های سیاسی	C8	۰,۱۷۰۲	۲

مأخذ: یافته‌های پژوهش

مأخذ: یافته‌های پژوهش

نمودار ۱- وزن و اولویت نهایی مؤلفه‌ها در هر دسته از ابعاد

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر، با هدف شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌های مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم با رویکرد توسعه پایدار، چارچوبی تحلیلی ارائه می‌دهد که به بررسی سه بعد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی به‌صورت یکپارچه می‌پردازد. با به‌کارگیری روش‌های فراترکیب، دلفی فازی و فوکام فازی، تلاش شده است تا تصویری جامع از موانع پیش روی هوشمندسازی زنجیره تأمین گندم ارائه شود. یافته‌های پژوهش نشان داد که بسیاری از چالش‌ها دارای ماهیتی جهانی هستند، اما «تحریم‌های سیاسی»، به‌عنوان یک عامل مختص بستر ایران، تأثیرات قابل توجه بر محدودیت‌های فناورانه، جذب سرمایه و همکاری‌های بین‌المللی در این حوزه داشته و نیازمند سیاست‌گذاری ویژه است. یافته‌ها نشان داد که در بعد زیست‌محیطی، «نیازهای انرژی» مهم‌ترین چالش در مسیر هوشمندسازی زنجیره تأمین گندم است. این نتیجه با نتایج پژوهش کومار و همکاران (Kumar et al., 2022a) همخوانی دارد که مصرف بالای انرژی در فناوری‌های نوظهور را به‌عنوان مانعی اساسی برای پایداری معرفی کرده است. چالش «بازیافت تجهیزات الکترونیکی» نیز به‌عنوان مانعی جدی

شناسایی شد، اگرچه پژوهش‌هایی همچون ساها و همکاران (Saha et al., 2025) به‌طور کلی بر مدیریت پسماند الکترونیکی تمرکز داشته‌اند که به‌صورت خاص، تأثیر تجهیزات هوشمند در افزایش پسماندهای زیست‌محیطی را برجسته کرده است.

در بعد اجتماعی، «فقدان دانش و مهارت» به‌عنوان مهم‌ترین چالش شناسایی شد که با نتایج پژوهش‌های پیشین نظیر دا سیلوییرا و همکاران (Da Silveira et al., 2023a) مطابقت دارد. علاوه بر آن، «فقدان سیاست‌های حمایتی» و «مقاومت در برابر تغییر» نیز به‌عنوان چالش‌های مهم شناسایی شدند که در مطالعاتی مانند لیمپامونت و همکاران (Limpamont et al., 2024) نیز مورد توجه بوده‌اند. همچنین، «شکاف دیجیتال» از دیگر چالش‌های مهم این بعد ارزیابی شد. به‌طور کلی، این چالش‌ها بر ضرورت تدوین سیاست‌های جامع حمایتی و برنامه‌های آموزشی هدفمند برای افزایش پذیرش فناوری‌های هوشمند تأکید دارد.

در بعد اقتصادی، یافته‌ها نشان داد که «کمبود زیرساخت» به‌عنوان مهم‌ترین چالش در مدیریت زنجیره تأمین هوشمند گندم مطرح است. این نتیجه با نتایج مطالعات دیبرن و همکاران (Dibbern et al., 2024) و ویرمانی و سینگ (Virmani & Singh, 2024) مطابقت دارد که بر اهمیت حیاتی زیرساخت‌ها در پذیرش فناوری‌های نوظهور تأکید کرده‌اند. علاوه بر این، «تحریم‌های سیاسی»، به‌عنوان چالشی مختص ایران، شناسایی شد که در مطالعات بین‌المللی مشاهده نشده است. این چالش تأثیرات مستقیم بر محدودیت دسترسی به فناوری‌های پیشرفته و همکاری‌های بین‌المللی دارد و بر لزوم تدوین راهبردهای خاص بومی و منطقه‌ای در ایران تأکید می‌کند.

مدیریت اثربخش چالش‌های زنجیره تأمین هوشمند گندم مستلزم تدوین و اجرای سیاست‌های هماهنگ در سطوح کلان و اجرایی است. این سیاست‌ها باید به‌گونه‌ای تنظیم شوند که ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی این زنجیره را به‌طور جامع پوشش دهند و زمینه‌ساز توسعه پایدار در فرآیندهای تولید، توزیع و مصرف گندم باشند. در بعد زیست‌محیطی، اتخاذ رویکردی نظام‌مند برای کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی عملکرد تجهیزات دیجیتال در فرآیندهای مختلف زنجیره تأمین گندم از جمله ذخیره‌سازی، فراوری و حمل‌ونقل ضرورت دارد. تدوین استانداردهای مشخص برای مصرف انرژی در فناوری‌های مرتبط با زنجیره تأمین، همراه با سیاست‌های مشوق برای بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر، می‌تواند نقشی مهم در کاهش آثار زیست‌محیطی ایفا کند. طراحی تجهیزات دیجیتال مورد استفاده در زنجیره تأمین به‌گونه‌ای که قابلیت بازیافت، بازطراحی و بازسازی داشته باشند، از دیگر اقداماتی است که پایداری را در این حوزه ارتقا می‌بخشد. در سطح اجرایی نیز ایجاد

مراکز تخصصی برای بازیافت تجهیزات الکترونیکی و توسعه فناوری‌های چرخه عمر تجهیزات، به‌ویژه در نقاط کلیدی زنجیره تأمین، توصیه می‌شود.

در بعد اجتماعی، توسعه برنامه‌های آموزشی و مهارتی به‌منظور توانمندسازی بازیگران مختلف زنجیره تأمین گندم، از جمله کشاورزان، واسطه‌ها، انبارداران و توزیع‌کنندگان ضروری است. این برنامه‌ها باید بر اساس نیازهای واقعی و سطح سواد دیجیتال مخاطبان طراحی و با استفاده از روش‌های نوین آموزشی از جمله واقعیت افزوده و سکوهای آموزش مجازی، اجرا شوند. همچنین، نمایش نمونه‌های موفق از به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند در زنجیره تأمین گندم و الگوسازی از بازیگران پیشرو می‌تواند به کاهش مقاومت در برابر تغییر و افزایش اعتماد به فناوری کمک کند. در کنار این اقدامات، سیاست‌گذاران باید با تدوین سیاست‌های حمایتی هدفمند شامل مشوق‌های مالی، یارانه‌های آموزشی و تسهیلات فناورانه، بسترهای لازم برای افزایش پذیرش فناوری در میان ذی‌نفعان زنجیره گندم را فراهم سازند. هماهنگی میان نهادهای دولتی، مراکز دانشگاهی، بخش خصوصی و نهادهای محلی از دیگر اقداماتی است که می‌تواند فرآیند توسعه هوشمندانه زنجیره تأمین را تسهیل کند.

با وجود تدوین سیاست‌های کلان، همچنان شکافی قابل توجه میان سطوح سیاست‌گذاری و اجرا در حوزه کشاورزی هوشمند وجود دارد. به گزارش مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، مصوبه شماره سه از بیستمین جلسه شورای اجرایی فناوری اطلاعات که وزارت جهاد کشاورزی را مکلف به تدوین سند نقشه راه اجرایی هوشمندسازی این حوزه ظرف مدت دو ماه می‌کرد، با وجود تأکید بر ضرورت این موضوع در سطح سیاست‌گذاری، تاکنون اجرایی نشده است (Shahmoradi & Varamziyari, 2025). این تأخیر نه‌تنها بیانگر خلأ در تحقق الزامات قانونی است، بلکه به بروز ناهماهنگی‌های نهادی، نبود سیاست‌های حمایتی شفاف و عقب‌ماندگی در توسعه زیرساخت‌های دیجیتال منجر شده است. از این‌رو، تسریع در تدوین و اجرای این سند باید به‌عنوان یکی از اولویت‌های سیاست‌گذاری تلقی شود. این سند می‌تواند به‌مثابه چارچوبی جامع برای تدوین مقررات، توسعه استانداردها و طراحی مشوق‌های حمایتی عمل کند و نقشی تعیین‌کننده در هماهنگی میان نهادهای دولتی، خصوصی و پژوهشی ایفا کند.

از منظر اقتصادی، یکی از موانع اساسی در مسیر استقرار فناوری‌های هوشمند در زنجیره تأمین گندم هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه و نبود مدل‌های اقتصادی پایدار است. برای پاسخ بدین چالش، بهره‌گیری از رویکردهای نوین تأمین مالی نظیر الگوهای مبتنی بر رایانش ابری با عنوان

«همه چیز به‌عنوان خدمت[1]»، پیشـــنهاد می‌شـــود. این رویکرد امکان بهره‌برداری از خدمات متنوع همچون نرم‌افزار، زیرساخت و سکو به‌عنوان خدمت[2]را بدون نیاز به تملک مستقیم دارایی‌های فناورانه فراهم می‌سازد. چنین مدل‌هایی، با کاهش فشار مالی سرمایه‌گذاری، افزایش انعطاف‌پذیری و ارتقای مقیاس‌پذیری، می‌توانند مسـیر پذیرش فناوری‌های هوشـمند را برای ذی‌نفعان زنجیره تأمین هموار کنند. در کنار این موضـوع، تحریم‌های اقتصـادی و محدودیت‌های فناورانه نیز ظرفیت دسـترسـی به تجهیزات پیشرفته و ارتباطات بین‌المللی را محدود کرده‌اند. توسعه شبکه‌های نوآوری داخلی، تکیه بر تولید داخل و تقویت همکاری‌های فناورانه در سطح منطقه‌ای، به‌ویژه با کشورهای همسایه، می‌تواند وابستگی خارجی را کاهش و تاب‌آوری زنجیره تأمین گندم را افزایش دهد. همچنین، اجرای نمونه‌های آزمایشـی یا همان پایلوت‌های صـنعتی، توسـعه زیرسـاخت‌های ارتباطی و داده‌محور و انجام مطالعات هزینه- فایده نقشـی مهم در افزایش اعتماد اقتصـادی به کارآیی و بازدهی فناوری‌های هوشـمند ایفا می‌کنند.

در مجموع، تحقق اهداف مربوط به هوشمندسازی مدیریت زنجیره تأمین گندم مستلزم وجود سـاختار نهادی مقتدر و هماهنگ اسـت. ایجاد یک نهاد ملی هماهنگ‌کننده با محوریت وزارت جهاد کشـاورزی می‌تواند نقشـی محوری در نظارت بر اجرای سـیاسـت‌های توسـعه دیجیتال، تأمین مالی پروژه‌های فناورانه، تدوین اسـتانداردها و تسـهیل همکاری‌های بین‌بخشـی ایفا کند. در این راسـتا، پیشـنهاد می‌شـود که «سـتاد ملی کشـاورزی هوشـمند» با حضـور وزارت ارتباطات، معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری، نهادهای نظارتی، دانشگاه‌ها و بخش خصـوصـی تشـکیل شـود تا علاوه بر تدوین سـیاسـت‌های پایدار، زمینه‌سـاز تسـریع تحول دیجیتال در زنجیره تأمین گندم و ارتقای کارآیی، شـفافیت و پایداری آن باشـد. اسـتمرار چنین رویکردی، به‌ویژه اگر با نظام نظارتی دقیق و مبتنی بر شاخص‌های کلیدی عملکردی همراه شود، می‌تواند به شکل‌گیری الگوی ملی در استقرار زنجیره‌های تأمین هوشمند و پایدار در سایر محصولات کشاورزی نیز بینجامد.

پژوهش حاضر، با وجود یافته‌های ارزشمند، با محدودیت‌هایی همراه بوده است. نخست آنکه فرآیند شـناسـایی و رتبه‌بندی چالش‌ها بر اسـاس نظرات خبرگان بوده و ممکن اسـت از سـوگیری‌های ذهنی آنها تأثیر پذیرفته باشـد. همچنین، تمرکز پژوهش بر یک مقطع زمانی مشـخص بررسـی تغییر چالش‌ها در طول زمان را محدود سـاخته و علاوه بر این، تعاملات میان چالش‌ها به‌صـورت جامع

1. Everything as a Service - XaaS
2. SaaS, IaaS, PaaS

ارزیابی نشده است. از دیدگاه نظری، یافته‌های پژوهش حاضر به غنای ادبیات مدیریت زنجیره تأمین هوشمند در چارچوب توسعه پایدار می‌افزاید و زمینه‌ای مناسب را برای مطالعه عمیق‌تر ارتباط بین ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی فراهم می‌آورد. برای رفع محدودیت‌ها و گسترش دامنه کاربرد نتایج، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آتی از روش‌های فرآیند تحلیل شبکه‌ای[1]، مدل‌سازی ساختاری تفسیری[2] و رویکردهای داده‌محور و یادگیری ماشینی بهره گیرند. انجام مطالعات تطبیقی در کشورهای مختلف نیز می‌تواند زمینه مقایسه‌ای دقیق‌تری را برای سیاست‌گذاری فراهم کند.

منابع

1. Aamer, A. M., Al-Awlaqi, M. A., Affia, I., Arumsari, S., & Mandahawi, N. (2021). The internet of things in the food supply chain: adoption challenges. *Benchmarking*, 28(8), 2521-2541. DOI: 10.1108/BIJ-07-2020-0371.
2. Abbaspour Gilandeh, Y., & Mohtasebi, S. S. (2024). Review of new adaptive ecosystem technologies in smart agriculture. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 9(1), 65-76. DOI: 10.22047/srjasnr.2024.192136. [In Persian]
3. Abedi Jafari, A., & Amiri, M. (2019). Meta-synthesis as a method for synthesizing qualitative researches. *Methodology of Social Sciences and Humanities*, 25(99), 1-15. DOI: 10.30471/mssh.2019.1629. [In Persian]
4. Ajodani, E., Yavari, G., Mahmoodi, A., Khaledi, M., & Nikoukar, A. (2021). An effective model for evaluating wheat supportive government policies: error minimization approach. *Agricultural Economics and Development*, *28*(4), 269-305. DOI: 10.30490/aead.2021.341377.1189. [In Persian]
5. Alipour, A. , Mousavi, S. H., Khalilian, S., & Mortazavi, A. (2018). Wheat self-sufficiency and population growth in Iran’s 2025 perspective (investigating the role of the guaranteed purchase policy). *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 49(4), 635-649. DOI: 10.22059/ijaedr.2018.254163.668578. [In Persian]

1. Analytic Network Process (ANP)
2. Interpretive Structural Modelling (ISM)

6. Allipour Birgani, R., Kiani Rad, A., Takian, A., & Pouraram, H. (2021). Bread wastage in Iran during 2001-2021: a systematic review. *Payesh*, 20(6), 687-702. DOI: 10.52547/payesh.20.6.687. [In Persian]
7. Amentae, T. K., & Gebresenbet, G. (2021). Digitalization and future agro-food supply chain management: a literature-based implications. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21), 12181. DOI: 10.3390/su132112181.
8. Asem-Hiablie, S., Uyeh, D. D., Iyiola, O., Park, T., & Mallipeddi, R. (2023). Enhancing resilience in agricultural production systems with AI-based technologies. *Environment, Development and Sustainability*, 26(9), 21955-21983. DOI: 10.1007/s10668-023-03588-0.
9. Balyan, S., Jangir, H., Tripathi, S. N., Tripathi, A., Jhang, T., & Pandey, P. (2024). Seeding a sustainable future: navigating the digital horizon of smart agriculture. *Sustainability (Switzerland)*, 16(2), 475. DOI: 10.3390/su16020475.
10. Bayatzadeh, S., & Amiri, M. (2024). Identifying and evaluating supplier selection criteria in Iran's steel industry according to Industry 4.0 technologies. *Innovation Management and Operational Strategies*, 5(3), 306-330. DOI: 10.22105/imos.2024.472776.1379. [In Persian]
11. Carmela Annosi, M., Brunetta, F., Capo, F., & Heideveld, L. (2020). Digitalization in the agri-food industry: the relationship between technology and sustainable development. *Management Decision*, 58(8), 1737-1757. DOI: 10.1108/MD-09-2019-1328.
12. Chanchaichujit, J., Balasubramanian, S., & Shukla, V. (2024). Barriers to Industry 4.0 technology adoption in agricultural supply chains: a Fuzzy Delphi-ISM approach. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 41(7), 1942-1978. DOI: 10.1108/IJQRM-07-2023-0222.
13. Chiaraluce, G., Bentivoglio, D., Finco, A., Fiore, M., Contò, F., & Galati, A. (2024). Exploring the role of blockchain technology in modern high-value food supply chains: global trends and future research directions. *Springer; Italian Society of Agricultural Economics (SIDEA),* 12(1), 1-22. DOI: 10.1186/s40100-024-00301-1.

14. Corallo, A., De Giovanni, M., Latino, M. E., & Menegoli, M. (2024). Leveraging on technology and sustainability to innovate the supply chain: a proposal of agri-food value chain model. *Supply Chain Management: An International Journal*, 29(3), 661-683. DOI: 10.1108/SCM-12-2022-0484.
15. Costa, F., Frecassetti, S., Rossini, M., & Portioli-Staudacher, A. (2023). Industry 4.0 digital technologies enhancing sustainability: applications and barriers from the agricultural industry in an emerging economy. *Journal of Cleaner Production*, 408, 137208. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137208.
16. Da Silveira, F., Da Silva, S. L. C., Machado, F. M., Barbedo, J. G. A., & Amaral, F. G. (2023a). Farmers' perception of the barriers that hinder the implementation of agriculture 4.0. *Agricultural Systems*, 208, 103656. DOI: 10.1016/j.agsy.2023.103656.
17. Da Silveira, F., Barbedo, J. G. A., da Silva, S. L. C., & Amaral, F. G. (2023b). Proposal for a framework to manage the barriers that hinder the development of agriculture 4.0 in the agricultural production chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 214, 108281. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108281.
18. Da Silveira, F., Lermen, F. H., & Amaral, F. G. (2021). An overview of agriculture 4.0 development: systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages. Elsevier B.V., *Computers and Electronics in Agriculture*, 189, 106405. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106405.
19. Deng, L., Zhang, H., Wang, C., Ma, W., Zhu, A., Zhang, F., & Jiao, X. (2021). Improving the sustainability of the wheat supply chain through multi-stakeholder engagement. *Journal of Cleaner Production*, 321(2), 128837. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128837.
20. Derakhti, A., Santibanez Gonzalez, E. D. R., & Mardani, A. (2023). Industry 4.0 and beyond: a review of the literature on the challenges and barriers facing the agri-food supply chain. *Sustainability*, 15(6), 5078. DOI: 10.3390/su15065078.

21. Dibbern, T., Romani, L. A. S., & Massruhá, S. M. F. S. (2024). Main drivers and barriers to the adoption of digital agriculture technologies. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100459. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100459.
22. Dora, M., Kumar, A., Mangla, S. K., Pant, A., & Kamal, M. M. (2022). Critical success factors influencing artificial intelligence adoption in food supply chains. *International Journal of Production Research*, 60(14), 4621-4640. DOI: 10.1080/00207543.2021.1959665.
23. Dos Santos Silva, J., Matos de Oliveira, A., Veríssimo de Oliveira, J., & Bouzon, M. (2024). Barriers to digital transformation in fruit and vegetable supply chains: a multicriteria analysis using ISM and MICMAC. *OPSEARCH*, 0123456789. DOI: 10.1007/s12597-024-00809-6.
24. Dündar, A. O., Peker, K., Tekin, M., Şahman, M. A., & Büber, M. (2016). A suggestion for a new e-governance system in the wheat supply chain management. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers* (Special Issue-1), 346-346. DOI: 10.18100/ijamec.277444.
25. Escribà-Gelonch, M., Liang, S., van Schalkwyk, P., Fisk, I., Long, N. V. D., & Hessel, V. (2024). Digital twins in agriculture: orchestration and applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(19), 10737-10752. DOI: 10.1021/acs.jafc.4c01934.
26. FAO (2021). The state of the world's land and water resources for food and agriculture – systems at breaking point (SOLAW 2021). DOI: 10.4060/cb7654en.
27. FAO (2024). World food and agriculture – statistical yearbook 2024. DOI: 10.4060/cd2971en.
28. Farooq, M. S., Ansari, Z. K., Alvi, A., Rustam, F., De La Torre Díez, I., Mazón, J. L. V., Rodríguez, C. L., & Ashraf, I. (2024). Blockchain based transparent and reliable framework for wheat crop supply chain. *PLoS ONE*, 19(1 January), 1-21. DOI: 10.1371/journal.pone.0295036.
29. Gholamian, M. R., & Taghanzadeh, A. H. (2017). Integrated network design of wheat supply chain: a real case of Iran. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, 139-147. DOI: 10.1016/j.compag.2017.05.038.

30. Guixia, X., Samian, N., Mohd Faizal, M. F., Mohd As'Ad, M. A. Z., Mohamad Fadzil, M. F., Abdullah, A., Seah, W. K. G., Ishak, M., & Hermadi, I. (2024). A Framework for blockchain and internet of things integration in improving food security in the food supply chain. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 34(1), 24–37. DOI: 10.37934/araset.34.1.2437.
31. Gupta, M., & Kumar, R. (2023). Modeling Cloud Computing adoption barriers for Indian SMEs' supply chain using TISM and MICMAC analysis. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 14(1), 29-55. DOI: 10.1504/ijbpscm.2023.10048490.
32. Hedayati, E., Zeinalnezhad, M., & Samiallah, S. (2024). Identify and rank barriers to the use of blockchain technology in the sustainable supply chain of the food industry. *Supply Chain Management*, 26(82), 17-42. DOR: 20.1001.1.20089198.1403.26.82.2.9. [In Persian]
33. Heydari, N., & Taran, F. (2025). Investigating the status of virtual water of irrigated wheat and providing technical and policy solutions for its improvement in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 25, 15-34. DOI: 10.22092/idser.2025.367448.1596. [In Persian]
34. Jararweh, Y., Fatima, S., Jarrah, M., & AlZu'bi, S. (2023). Smart and sustainable agriculture: fundamentals, enabling technologies, and future directions. *Computers and Electrical Engineering*, 110, 108799. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2023.108799.
35. Khan, S., Kaushik, M. K., Kumar, R., & Khan, W. (2023). Investigating the barriers of blockchain technology integrated food supply chain: a BWM approach. *Benchmarking*, 30(3), 713-735. DOI: 10.1108/BIJ-08-2021-0489.
36. Khebbache, R., Merizig, A., Rezeg, K., & Lloret, J. (2023). The recent technological trends of smart irrigation systems in smart farming: a review. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 14(1), 10317-10335. Available at https://journal.uob.edu.bh/handle/123456789/5127.
37. Kukk, M., Põder, A., & Viira, A.-H. (2022). The role of public policies in the digitalisation of the agri-food sector: a systematic review. *NJAS: Impact in*

Agricultural and Life Sciences, 94(1), 217-248. DOI: 10.1080/27685241.2022.2147870.

38. Kumar, A., Mangla, S. K., & Kumar, P. (2022a). Barriers for adoption of Industry 4.0 in sustainable food supply chain: a circular economy perspective. *International Journal of Productivity and Performance Management*, Emerald Group Publishing Limited, 73(2), 385-411. DOI: 10.1108/IJPPM-12-2020-0695.
39. Kumar, S., Raut, R. D., Agrawal, N., Cheikhrouhou, N., Sharma, M., & Daim, T. (2022b). Integrated blockchain and internet of things in the food supply chain: adoption barriers. *Technovation*, 118, 102589. DOI: 10.1016/j.technovation.2022.102589.
40. Lahane, S., Paliwal, V., & Kant, R. (2023). Evaluation and ranking of solutions to overcome the barriers of Industry 4.0 enabled sustainable food supply chain adoption. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 8, 100116. DOI: 10.1016/j.clscn.2023.100116.
41. Langridge, P., Alaux, M., Almeida, N. F., Ammar, K., Baum, M., Bekkaoui, F., Bentley, A. R., Beres, B. L., Berger, B., Braun, H. J., Brown-Guedira, G., Burt, C. J., Caccamo, M. J., Cattivelli, L., Charmet, G., Civáň, P., Cloutier, S., Cohan, J. P., Devaux, P. J., … Zhang, X. (2022). Meeting the challenges facing wheat production: the strategic research agenda of the global wheat initiative. *Agronomy*, 12(11), 1–17. DOI: 10.3390/agronomy12112767.
42. Lezoche, M., Hernandez, J., Alemany, M., Panetto, H., & Kacprzyk, J. (2020). Agri-food 4.0: a survey of the supply chains and technologies for the future agriculture. *Computers in Industry*, 117(103187), 1-15. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103187.
43. Limpamont, A., Kittipanya–ngam, P., Chindasombatcharoen, N., & Cavite, H. J. M. (2024). Towards agri-food industry sustainability: addressing agricultural technology adoption challenges through innovation. *Business Strategy and the Environment*, 33(7), 7352-7367. DOI: 10.1002/bse.3871.
44. Manning, L., Brewer, S., Craigon, P. J., Frey, J., Gutierrez, A., Jacobs, N., Kanza, S., Munday, S., Sacks, J., & Pearson, S. (2022). Artificial intelligence

and ethics within the food sector: developing a common language for technology adoption across the supply chain. *Trends in Food Science and Technology*, 125, 33-42. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.04.025.

45. Menon, S., & Jain, K. (2024). Blockchain technology for transparency in agri-food supply chain: use cases, limitations, and future directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 106-120. DOI: 10.1109/TEM.2021.3110903.
46. Mohammed, A., Potdar, V., Quaddus, M., & Hui, W. (2023). Blockchain adoption in food supply chains: a systematic literature review on enablers, benefits, and barriers. *IEEE Access*, 11, 14236-14255. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3236666.
47. Moshayedi, A. J., Sohail Khan, A., Yang, Y., Hu, J., & Kolahdooz, A. (2024). Robots in agriculture: revolutionizing farming practices. *EAI Endorsed Transactions on AI and Robotics*, 3, 1-23. DOI: 10.4108/airo.5855.
48. Motevalli-Taher, F., Paydar, M. M., & Emami, S. (2020). Wheat sustainable supply chain network design with forecasted demand by simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178(June), 105763. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105763.
49. Mowla, M. N., Mowla, N., Shah, A. F. M. S., Rabie, K. M., & Shongwe, T. (2023). Internet of things and wireless sensor networks for smart agriculture applications: a survey. *IEEE Access*, 11, 145813-145852. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3346299.
50. Narwane, V. S., Gunasekaran, A., & Gardas, B. B. (2022). Unlocking adoption challenges of IoT in Indian agricultural and food supply chain. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100035. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100035.
51. Nayal, K., Raut, R. D., Narkhede, B. E., Priyadarshinee, P., Panchal, G. B., & Gedam, V. V. (2023). Antecedents for blockchain technology-enabled sustainable agriculture supply chain. *Annals of Operations Research*, 327(1), 293-337. DOI: 10.1007/s10479-021-04423-3.
52. Nisar, U., Zhang, Z., Wood, B. P., Ahmad, S., Ellahi, E., Ul Haq, S. I., Alnafissa, M., & Fathi Abd-Allah, E. (2024). Unlocking the potential of

blockchain technology in enhancing the fisheries supply chain: an exploration of critical adoption barriers in China. *Scientific Reports*, 14(1), 1-19. DOI: 10.1038/s41598-024-59167-4.

53. Nouri, M., Homaee, M., Pereira, L. S., & Bybordi, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: a review focusing on water governance. *Agricultural Water Management*, 288, 108480. DOI: 10.1016/j.agwat.2023.108480.
54. Nurgazina, J., Pakdeetrakulwong, U., Moser, T., & Reiner, G. (2021). Distributed ledger technology applications in food supply chains:a review of challenges and future research directions. *Sustainability (Switzerland)*, 13(8), 4206. DOI: 10.3390/su13084206.
55. Ocampo, L. (2022). Full Consistency Method (FUCOM) and weighted sum under fuzzy information for evaluating the sustainability of farm tourism sites. *Soft Computing*, 26(22), 12481-12508. DOI: 10.1007/s00500-022-07184-8.
56. OECD/FAO (2024). OECD-FAO agricultural outlook 2024-2033. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)/Food and Agriculture Organization (FAO). DOI: 10.1787/4c5d2cfb-en.
57. Pamučar, D., Stević, Ž., & Sremac, S. (2018). A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full Consistency Method (FUCOM). *Symmetry*, 10(9), 1-22. DOI: 10.3390/sym10090393.
58. Pedersen, S. M., Erekalo, K. T., Christensen, T., Denver, S., Gemtou, M., Fountas, S., Isakhanyan, G., Rosemarin, A., Ekane, N., Puggaard, L. L., Nertinger, M., Brinks, H., Puško, D., & Adrián, J. B. (2024). Drivers and barriers to climate-smart agricultural practices and technologies adoption: insights from stakeholders of five European food supply chains. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100478. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100478.
59. Pelé, P., Schulze, J., Piramuthu, S., & Zhou, W. (2023). IoT and blockchain based framework for logistics in food supply chains. *Information Systems Frontiers*, 25(5), 1743–1756. https://doi.org/10.1007/s10796-022-10343-9
60. Purcell, W., Neubauer, T., & Mallinger, K. (2023). Digital twins in agriculture: challenges and opportunities for environmental sustainability. *Current*

Opinion in Environmental Sustainability, 61, 101252. DOI: 10.1016/j.cosust.2022.101252.

61. Rajabzadeh, M., Elahi, Sh., Hassanzadeh, A., & Mehraiin, M. (2021). Mapping factors affecting IoT deployment in storage sector of wheat supply chain. *Industrial Management Studies*, 19(60), 121-144. DOI: 10.22054/jims.2021.54482.2528. [In Persian]
62. Rathore, S., Gupta, N., & Rathore, A. S. (2022). Blockchain-based smart wheat supply chain model in Indian context. *Advanced Series in Management*, 27, 77-96. DOI: 10.1108/S1877-636120220000027006.
63. Rose, D. C., Wheeler, R., Winter, M., Lobley, M., & Chivers, C. A. (2021). Agriculture 4.0: making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy*, 100, 104933. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104933.
64. Saha, A., Raut, R., & Kumar, M. (2025). Digital technology adoption challenges in the agri-food supply chain from the perspective of attaining sustainable development goals. *International Journal of Logistics Management*, 36(2), 556-588. DOI: 10.1108/IJLM-09-2023-0412.
65. Salehnia, M. (2023). Economic impacts of climate change on selected strategic crops in Iran. *Agricultural Economics and Development*, 30(3), 175-205. DOI: 10.30490/AEAD.2023.356916.1403. [In Persian]
66. Sandelowski, M., & Barroso, J. (2007). Handbook for synthesizing qualitative research. Springer Publishing Company.
67. Schmidt, D., Casagranda, L. F., Butturi, M. A., & Sellitto, M. A. (2024). Digital technologies, sustainability, and efficiency in grain post-harvest activities: a bibliometric analysis. *Sustainability (Switzerland),* 16(3), 1244. DOI: 10.3390/su16031244.
68. Sehgal, S., Singh, B., & Sharma, V. (2022). Smart and sustainable food technologies. Springer Nature Singapore. DOI: 10.1007/978-981-19-1746-2.
69. Sezer, M. D., Kazancoglu, Y., Mangla, S. K., & Lafçı, Ç. (2024). Smart, sustainable, and resilient food supply chains in disruptive events context. *Business Strategy and the Environment*, 33(7), 6156-6171. DOI: 10.1002/bse.3801.

70. Shahmoradi, M., & Varamziyari, H. (2025). National strategic document and action plan for digital agriculture: necessities and components (Report No. 20431). *Monthly Expert Reports of the Islamic Parliament Research Center*, 32(11), Article 20431. DOI: 10.22034/report.mrc.2025.1403.32.11.20431. [In Persian]
71. Shepherd, M., Turner, J. A., Small, B., & Wheeler, D. (2020). Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the 'digital agriculture' revolution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5083-5092. DOI: 10.1002/jsfa.9346.
72. Sonar, H., Sharma, I., Ghag, N., & Raje, B. (2024). Harvesting sustainability: assessing Industry 4.0 in agri-food supply chains. *The International Journal of Logistics Management*, 36(2), 647-668. DOI: 10.1108/IJLM-10-2023-0443.
73. Sullivan, C. S., Gemtou, M., Anastasiou, E., & Fountas, S. (2024). Building trust: a systematic review of the drivers and barriers of agricultural data sharing. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100477. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100477.
74. Toader, D. C., Rădulescu, C. M., & Toader, C. (2024). Investigating the adoption of blockchain technology in agri-food supply chains: analysis of an extended UTAUT model. *Agriculture (Switzerland)*, 14(4), 614. DOI: 10.3390/agriculture14040614.
75. Tripathi, S., & Gupta, M. (2020). Transforming towards a smarter supply chain. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 36(3), 319-342. DOI: 10.1504/ijlsm.2020.10019293.
76. UN (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: our common future. United Nations (UN). Available at https://digitallibrary.un.org/record/139811.
77. UN (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations (UN). Available at https://docs.un.org/en/A/RES/70/1.

78. Vaezi, R., Aslipour, H., Zarandi, S., & Shams, L. (2024). Identifying the challenges of providing the basic goods of wheat in the public service ecosystem. *Studies in Public Service Administration*, 2(3), 183-224. DOI: 10.22054/spsa.2023.74961.1025. [In Persian]
79. Vern, P., Panghal, A., Mor, R. S., Kamble, S. S., Islam, M. S., & Khan, S. A. R. (2023). Influential barriers to blockchain technology implementation in agri-food supply chain. *Operations Management Research,* 16(3), 1206-1219. DOI: 10.1007/s12063-023-00388-7.
80. Virmani, N., & Singh, R. K. (2024). Analysis of barriers for adopting blockchain in agri-food supply chain management: a decision support framework. *International Journal of Quality and Reliability Management,* 41(8), 2122-2145. DOI: 10.1108/IJQRM-03-2023-0078.
81. Wang, W., Cao, Y., Chen, Y., Liu, C., Han, X., Zhou, B., & Wang, W. (2024). Assessing the adoption barriers for the AI in food supply chain finance applying a hybrid interval-valued Fermatean fuzzy CRITIC-ARAS model. *Scientific Reports*, 14(1), 1-19. DOI: 10.1038/s41598-024-79177-6.
82. Weerabahu, W. M. S. K., Samaranayake, P., Nakandala, D., & Hurriyet, H. (2022). Digital supply chain research trends: a systematic review and a maturity model for adoption. *Benchmarking*, 30(9), 3040-3066. DOI: 10.1108/BIJ-12-2021-0782.
83. Yadav, V. S., & Majumdar, A. (2024). What impedes digital twin from revolutionizing agro-food supply chain? Analysis of barriers and strategy development for mitigation. *Operations Management Research,* 17(2), 711-727. DOI: 10.1007/s12063-024-00444-w.
84. Yadav, V. S., Singh, A. R., Gunasekaran, A., Raut, R. D., & Narkhede, B. E. (2022). A systematic literature review of the agro-food supply chain: challenges, network design, and performance measurement perspectives. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 685-704. DOI: 10.1016/j.spc.2021.11.019.
85. Zhao, G., Ye, C., Dennehy, D., Liu, S., Harfouche, A., & Olan, F. (2024). Analysis of barriers to adopting Industry 4.0 to achieve agri-food supply chain

sustainability: a group-based fuzzy analytic hierarchy process. *Business Strategy and the Environment*, 33(8), 8559-8586. DOI: 10.1002/bse.3928.

86. Zkik, K., Belhadi, A., Rehman Khan, S. A., Kamble, S. S., Oudani, M., & Touriki, F. E. (2023). Exploration of barriers and enablers of blockchain adoption for sustainable performance: implications for e-enabled agriculture supply chains. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 26(11), 1498-1535. DOI: 10.1080/13675567.2022.2088707.