System Engineering and Productivity/ 2026/ Vol.6/ No.1/ 227-249

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2026.2079220.1441

Resilient Wheat Supply Chain Design Considering Circular Economy Principles

Kiyarash Noushi[1], **Fatemeh Sabouhi**[2,*]

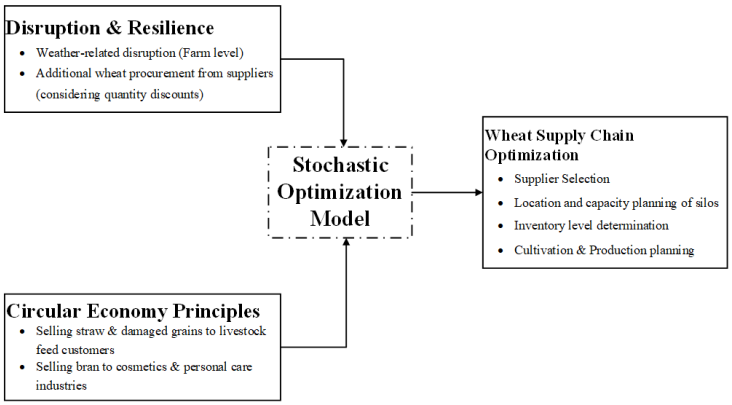
[1] M.Sc. Student, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

[2] Assistant Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Developing a two-stage stochastic programming model to design a resilient wheat supply chain.
- Mitigating disruption risks through supplemental wheat procurement using quantity discounts.
- Integrating circular economy principles by selling wheat by-products, including straw, bran, and damaged grains.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 21 July 2025
Revised: 23 August 2025
Accepted: 11 September 2025
Available online: 13 September 2025
*Correspondence:
fatemehsabouhi@ut.ac.ir
How to cite this article:
Noushi, K., & Sabouhi, F. (2026). Resilient wheat supply chain design considering circular economy principles. *System Engineering and Productivity*, 6 (1), 227-249.

Keywords:
Wheat Supply Chain
Resilience
Circular Economy
Disruption Risks
Stochastic Optimization

ABSTRACT

Wheat is a key element of national food security, providing a major share of the calories and protein required by the population and therefore playing an important role in public health and livelihoods. Ensuring its consistent production and reliable access is essential for economic stability, food equity, and social resilience. In this regard, this study develops a multi-period, multi-product stochastic optimization model to design a resilient wheat supply chain under disruption risks. The supply chain includes suppliers of agricultural inputs (seeds, pesticides, and fertilizers), farms, wheat suppliers, storage silos, processing factories, livestock feed customers, cosmetics and hygiene industries, and flour consumers. To address weather-related disruptions affecting farm output, the model incorporates additional wheat procurement from supplier - considering quantity discounts - as a resilience strategy. Circular economy principles are also considered through selling straw, bran, and damaged grains to cosmetics and hygiene, and livestock feed industries. The objective of the model is to maximize the total profit of the supply chain by determining product flows between different stages, flour production quantities, inventory levels of agricultural inputs, wheat, and flour, supplier selection, and the location and capacity of silos. The model is then applied to a numerical example, and the computational results are presented.

2538-2195/© 2026 The Authors. Published by University of Eyvanekey. This is an open-access article under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license.

1. Introduction

Wheat accounts for approximately 20% of global human caloric and protein intake, constituting a cornerstone of food security and the fundamental basis for staple products such as bread, pasta, and confectionery (Shiferaw et al., 2013). Its supply chain is a complex, multi-stage network encompassing input procurement, planting and harvesting operations, storage, processing, and distribution. Optimal performance of this chain depends on the development and implementation of precise planting and harvesting schedules, systematic grain quality grading and control, continuous monitoring of storage moisture and temperature, and effective inventory management (Agrawal & Jain, 2024; Zheng, 2022; Yousefi-Babadi et al., 2023). Furthermore, the selection of appropriate transportation modes, scheduling of loading/unloading, and distribution routing planning should be conducted in a way that ensures product quality preservation. Non-compliance with the required standards at any of these stages leads to quality deterioration, weight loss, reduced commercial value, increased waste and return costs, supply instability, and ultimately undermines food security (Bartholomeu et al., 2016).

The wheat supply chain is exposed to various disruptive risks, ranging from climate change and natural disasters (droughts, floods, and frost) and the outbreak of pests and plant diseases, to input shortages (seeds, fertilizers, pesticides), extreme price and exchange rate volatility, trade and political constraints (tariffs, export/import bans), and failures or capacity limitations of storage and transportation infrastructure (Hellegers, 2022; Reddy et al., 2016). These disruptions lead to production declines, prolonged lead times, and escalating logistics costs, thereby intensifying supply shortage risks (Zhang et al., 2023). To mitigate these disruptions, resilience strategies are employed, including geographical and contractual supplier diversification, strategic emergency reserves, and infrastructure upgrades (Daryanto et al., 2025; Rahbari et al., 2024).

On the other hand, the sale of by-products at various stages of the wheat supply chain can generate significant added value and enhance resource efficiency by opening new markets and diversifying the product portfolio (Tufail et al., 2022). In the milling stage, bran and husks - often perceived as waste - can be transformed into revenue streams through integrated management (Fu & Zhang, 2025). Bran is rich in fiber and protein and is used in the production of whole-grain breads, biscuits, animal feed, and dietary supplements (Xhabiri et al., 2014). Farm-level straw can be repurposed for pulp and biodegradable packaging (Giordano & Mariani, n.d.). Consequently, leveraging these side streams is an effective strategy for waste reduction and resilience enhancement (Danciu et al., 2023).

This study proposes a multi-period, multi-product stochastic optimization model to design a resilient wheat supply chain under disruptions. The model encompasses suppliers of agricultural inputs, farms, wheat suppliers, storage silos, processing factories, livestock feed customers, cosmetics and personal care industries, and flour consumers. To enhance resilience against weather-related disruptions, supplemental wheat procurement with quantity discounts is integrated. Furthermore, circular economy principles are also implemented by selling straw, bran, and damaged grains to the cosmetics and personal care and livestock feed industries.

2. Methodology

The supply chain under investigation comprises multiple echelons: agricultural input suppliers (seeds, fertilizers, and pesticides), wheat farms, wheat suppliers, silos, processing factories, and three distinct end-consumer segments: wheat flour customers, livestock feed customers, and the cosmetics and personal care industries. Initially, the necessary agricultural inputs for wheat cultivation are procured from suppliers. After harvest, the straw is separated and primary cleaning is performed, and the wheat grains are transferred to silos for storage. To enhance resilience against weather-related disruptions affecting cultivation capacity, the option of purchasing ready-to-use wheat with discounts and storing it in silos is also provided. A portion of the silo inventory is then dispatched to processing factories for flour production. During the pre-milling preparation stage, defective or broken grains are segregated from the primary material flow. These grains, along with the straw collected from the farms, are diverted to the livestock feed customers. Then, only the intact grains are milled; during this process, the resulting flour is delivered to wheat flour customers, while the separated bran is supplied for use in the cosmetics and personal care industry. The objective of the problem is to maximize the profit of the wheat supply chain by determining the following decisions:

- Quantities of cultivation inputs and wheat procured from suppliers;
- Quantities of wheat cultivated on farms;
- Quantities of flour produced at the processing facilities;
- Quantities of products transported between different components of the network;
- Inventory levels held in silos and at farms and processing facilities;
- Construction of silos with specified capacity levels;
- Selection of suppliers for cultivation inputs and wheat.

3. Results and Discussion

The results of the model indicate that the majority of the supply chain's revenue is generated from the sale of final products, namely various types of wheat flour. However, by-products such as bran, straw, and damaged grains contribute more than fifteen percent of total profits, highlighting the potential benefits of applying circular economy principles to enhance overall profitability. From a cost perspective, transportation of raw materials and finished products, together with production costs in processing plants, constitute the largest expense components, emphasizing the importance of precise production planning and efficient management of logistical processes.

The analysis of different disruption scenarios further reveals that as the severity of disruptions increases, both supply chain profitability and inventory levels decline. This outcome reflects the greater complexity of the network and the stronger impact of disruptions on its performance. The proposed two-stage stochastic programming model optimizes both strategic (first-stage) and tactical (second-stage) decisions by accounting for all disruption scenarios and their associated probabilities. Unlike models that consider only a single disruption scenario, this stochastic optimization approach enables more effective production and inventory planning, achieving a balance between profitability and risk. Consequently, even under severe disruptions, reductions in production and inventory performance are minimized, allowing the supply chain to respond to fluctuations in raw material availability with high flexibility.

As disruptions intensify, the cultivable wheat quantity decreases, and the model resorts to a procurement strategy from suppliers to compensate for shortages and maintain supply, since a complete supply failure is not assumed in the model due to wheat's critical role in food security. Although this approach ensures continuity of supply, at severe disruption levels, additional procurement and transportation costs lead to reduced profitability and pose a serious threat to financial sustainability. Therefore, while the wheat procurement strategy is effective under moderate disruption scenarios, coping with extreme disruptions requires comprehensive strategic planning and management to preserve financial stability and ensure the supply of essential goods.

4. Conclusions

Wheat, as a strategic commodity in ensuring food security, plays a critical role in socio-economic systems. Enhancing the resilience of its supply chain against environmental disruptions, such as weather-related changes, ensures continuity of supply and mitigates the risk of product shortages. Moreover, the adoption of circular economy principles, in addition to improving operational efficiency, can contribute to increasing the overall profitability of the supply chain. Accordingly, this study developed a multi-period, multi-product stochastic optimization model to design a resilient wheat supply chain under disruption risks. The proposed model employed supplemental wheat procurement - considering quantity discounts - as a key resilience strategy to mitigate the adverse effects of weather-related disruptions in the agricultural sector. Additionally, the sale of by-products such as straw, bran, and damaged grains for related industries, including livestock feed and cosmetics and personal care, was incorporated into the model. The key managerial insights derived from this research are summarized as follows:

- Weather-related disruptions significantly increase the vulnerability of the wheat supply chain, placing stress on both operational continuity and financial viability. Under these circumstances, diversification of wheat suppliers serves as an effective strategy to strengthen supply chain resilience, allowing for optimal disruption management and mitigating risks associated with dependence on limited sources.
- The findings indicate that focusing solely on a single deterministic disruption scenario can lead to unreliable decision-making and expose supply chain management to the risks of overly optimistic or overly conservative choices. In contrast, the stochastic model, by accounting for all disruption scenarios and their probabilities, enables the formulation of more balanced and resilient policies.
- Results demonstrate that by-products (bran, straw, and damaged grains) contribute substantially to total supply chain profitability. Adopting a circular economy approach not only unlocks new revenue streams but also minimizes resource waste and improves overall system efficiency.
- Given the significant share of production and transportation costs of raw materials and products, optimizing production processes in processing plants, along with precise and coordinated logistical planning, plays a key role in enhancing productivity, reducing costs, and improving overall supply chain efficiency.

To complement the findings of this study and further enhance the resilience and sustainability of the wheat supply chain, the following recommendations are proposed:

- Attention to sustainability considerations through the management of chemical fertilizer use in order to enhance public

health and the efficient use of water resources.
- Applying a combined optimization and decision-making approach for supplier evaluation and ranking.
- Considering operational decisions, such as routing and scheduling, in the proposed model to manage logistics processes.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have had equal roles and contributions in writing this article.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

Agrawal, M., & Jain, J. K. (2024). Seed to Sustenance: A Comprehensive Review of Wheat's Agricultural Value Chain. *Commerce Research Review*, *1*(2), 84-93. https://doi.org/10.21844/crr.v102.1116

Bartholomeu, D. B., da Rocha, F. V., Péra, T. G., & Vicente, J. (2016). Postharvest losses in the wheat logistics chain: A Brazilian case study. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, *6*(5), 321-329. https://doi.org/10.17265/2161-6264/2016.05.005

Danciu, C. A., Tulbure, A., Stanciu, M. A., Antonie, I., Capatana, C., Zerbeș, M. V., ... & Rada, E. C. (2023). Overview of the sustainable valorization of using waste and by-products in grain processing. *Foods*, *12*(20), 3770. https://doi.org/10.3390/foods12203770

Daryanto, A. W., Prabowo, H., Hamsal, M., & Elidjen, E. (2025). Supply Chain Resilience Strategy in Dynamic Environmental Change: a Systematic Literature Review. *Journal of Lifestyle and SDGs Review*, *5*(3), e03846. https://doi.org/10.47172/2965-730x.sdgsreview.v5.n03.pe03846

Fu, P., & Zhang, Y. (2025). Enhancing resource efficiency and value addition in food and agricultural by-product processing: a green recycling approach. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *9*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1589807

Giordano, L., & Mariani, G. (2024). strawplast: pioneering eco-packaging solutions for a sustainable future. *The American Journal of Agriculture and Biomedical Engineering*, *6*(04), 06-10. https://doi.org/10.37547/tajabe/Volume06Issue04-02

Hellegers, P. (2022). Food security vulnerability due to trade dependencies on Russia and Ukraine. *Food Security*, *14*(6), 1503–1510. https://doi.org/10.1007/s12571-022-01306-8

Rahbari, M., Arshadi Khamseh, A., & Sadati-Keneti, Y. (2024). Resilience strategies in coping to disruptions of wheat supply chain caused by the Russia–Ukraine war crisis: case study from an emerging economy. *Kybernetes*, *53*(10), 2984–3018. https://doi.org/10.1108/K-12-2022-1728

Reddy, V. R., Singh, S. K., & Anbumozhi, V. (2016). *Food Supply Chain Disruption due to Natural Disasters: Entities, Risks, and Strategies for Resilience*.

Shiferaw, B., Smale, M., Braun, H. J., Duveiller, E., Reynolds, M., & Muricho, G. (2013). Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Security*, *5*(3), 291–317. https://doi.org/10.1007/s12571-013-0263-y

Tufail, T., Ain, H. B. U., Saeed, F., Nasir, M., Basharat, S., Mahwish, ... & Aadil, R. M. (2022). A retrospective on the innovative sustainable valorization of cereal bran in the context of circular bioeconomy innovations. *Sustainability*, *14*(21), 14597. https://doi.org/10.3390/su142114597

Xhabiri, G., Sinani, V., & Hoxha, I. (2014). The Impact of the Wheat Bran on the Quality of the Biscuits and Their Nutritional Value. *Anglisticum Journal (IJLLIS)*, *3*(3).

Yousefi-Babadi, A., Bozorgi-Amiri, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Govindan, K. (2023). Redesign of the sustainable wheat-flour-bread supply chain network under uncertainty: An improved robust optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *176*. https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103215

Zhang, Z., Abdullah, M. J., Xu, G., Matsubae, K., & Zeng, X. (2023). Countries' vulnerability to food supply disruptions caused by the Russia–Ukraine war from a trade dependency

perspective. *Scientific Reports*, *13*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-023-43883-4

Zheng, X. (2022). The Coordination of Multi-Stage Discounts in a Dual Channel Fresh Agricultural Produce Supply Chain: Minimizing the Loss of Quantity and Quality. *Sustainability (Switzerland)*, *14(4)*. https://doi.org/10.3390/su14042174

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۵/ دوره ۶/ شماره ۱/ صفحه ۲۲۷-۲۴۹

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2026.2079220.1441

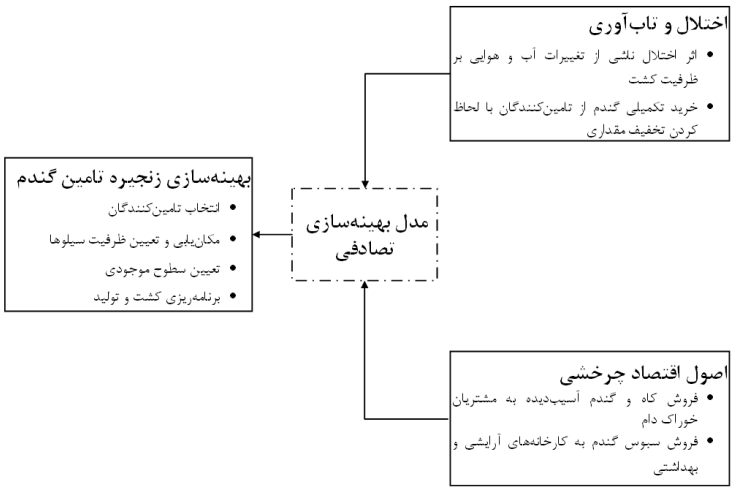
طراحی زنجیره تأمین تاب‌آور گندم با درنظرگرفتن اصول اقتصاد چرخشی

کیارش نوشی[۱]، فاطمه صبوحی[۲،*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲] استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- توسعه یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای طراحی یک زنجیره تأمین گندم انعطاف‌پذیر.
- کاهش خطرات اختلال از طریق خرید مکمل گندم با استفاده از تخفیف‌های مقداری.
- ادغام اصول اقتصاد چرخشی با فروش محصولات جانبی گندم، از جمله کاه، سبوس و غلات آسیب‌دیده.

چکیده

گندم ستون امنیت غذایی کشورهاست و با تأمین بخش مهمی از کالری و پروتئین موردنیاز جامعه، نقشی راهبردی در سلامت و معیشت دارد. تضمین تولید پایدار و دسترسی مقرون‌به‌صرفه به آن برای ثبات اقتصادی، عدالت غذایی و تاب‌آوری اجتماعی ضروری است؛ بنابراین در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چند دوره‌ای و چندمحصولی جهت طراحی زنجیره تأمین تاب‌آور گندم تحت ریسک‌های اختلالی ارائه می‌شود. اجزای زنجیره شامل تأمین‌کنندگان نهاده‌های کشت (بذر، آفت‌کش، کود)، مزارع، تأمین‌کنندگان گندم، سیلوهای ذخیره‌سازی، کارخانه‌های فراوری، مشتریان خوراک دام، صنایع آرایشی و بهداشتی و مشتریان آرد است. برای مقابله با اختلالات ناشی از تغییرات آب‌وهوایی در مزارع، خرید تکمیلی گندم از تأمین‌کنندگان با لحاظ تخفیف مقداری به‌عنوان راهبرد تاب‌آوری در نظر گرفته شده است. اصول اقتصاد چرخشی نیز از طریق فروش کاه، سبوس و دانه‌های آسیب‌دیده به صنایع آرایشی و بهداشتی و خوراک دام اعمال می‌شود. هدف مدل، حداکثرسازی سود کل زنجیره تأمین جهت تعیین تصمیماتی از قبیل میزان حمل‌ونقل محصولات بین سطوح مختلف زنجیره، مقدار تولید آرد در کارخانه‌ها، سطح موجودی نهاده‌های کشت، گندم و آرد، انتخاب تأمین‌کنندگان و مکان‌یابی و تعیین ظرفیت سیلوها است. نهایتاً مدل پیشنهادی بر روی یک مثال عددی پیاده‌سازی شده و نتایج عددی ارائه می‌شود.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

*نویسنده مسئول:

fatemehsabouhi@ut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

زنجیره تأمین گندم

تاب‌آوری

اقتصاد چرخشی

ریسک‌های اختلالی

بهینه‌سازی تصادفی

۲۰۲۶ ©/۲۵۳۸-۲۱۹۵ نویسندگان. منتشرشده توسط دانشگاه ایوان‌کی. این یک مقاله با دسترسی آزاد تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) است.

۱- مقدمه

گندم حدود ۲۰٪ از کالری و پروتئین مصرفی بشر را تأمین می‌کند و ستون امنیت غذایی و پایه بسیاری از فرآورده‌های روزمره مانند نان، ماکارونی و شیرینی است (Shiferaw et al., 2013). زنجیره تأمین آن شبکه‌ای چندمرحله‌ای و پیچیده است که از تأمین نهاده‌ها و عملیات کشت تا برداشت، ذخیره‌سازی، فراوری و توزیع را در بر می‌گیرد. کارکرد مطلوب این زنجیره به تدوین و اجرای برنامه دقیق کاشت/برداشت، درجه‌بندی و کنترل نظام‌مند کیفیت دانه، پایش مستمر رطوبت و دمای انبارها و مدیریت موجودی وابسته است (Agrawal & Jain, 2024). علاوه بر این، انتخاب شیوه حمل‌ونقل مناسب، زمان‌بندی بارگیری/تخلیه و برنامه‌ریزی مسیرهای توزیع باید به‌گونه‌ای انجام شود که حفظ کیفیت محصول تضمین گردد. عدم رعایت استانداردهای موردنیاز در هر یک از این مراحل به افت کیفیت (نظیر افزایش رطوبت، آلودگی قارچی و ناخالصی)، هدررفت وزنی، کاهش ارزش تجاری، افزایش ضایعات و هزینه‌های مرجوعی، ناپایداری عرضه و درنهایت تضعیف امنیت غذایی می‌انجامد. ازاین‌رو، کارایی زنجیره تأمین گندم مستلزم زیرساخت‌های مناسب ذخیره‌سازی و لجستیک، استانداردسازی فرآیندها و نیز هماهنگی مدیریتی مؤثر میان همه بازیگران است (Bartholomeu et al., 2016).

زنجیره تأمین گندم تحت‌تأثیر انواع ریسک‌های اختلالی است؛ از تغییرات اقلیمی و بلایای طبیعی (خشکسالی، سیل، یخبندان) و شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی گرفته تا کمبود نهاده‌ها (بذر، کود، سم)، نوسانات شدید قیمت و ارز، محدودیت‌های تجاری/ سیاسی (تعرفه‌ها، ممنوعیت‌های صادرات/ واردات) و خرابی یا محدودیت ظرفیت زیرساخت‌های انبار و حمل‌ونقل (Hellegers, 2022؛ Reddy et al., 2016). بروز این شرایط به کاهش تولید و افت کیفیت، افزایش زمان‌های تأمین و تحویل، افزایش هزینه‌های لجستیک و نگهداری و نوسان شدید قیمت می‌انجامد و نهایتاً ریسک کمبود عرضه را تشدید می‌کند (Zhang et al., 2023). برای مواجهه مؤثر با چنین اختلالاتی، مجموعه‌ای از استراتژی‌های تاب‌آوری به‌کار گرفته می‌شود: تنوع‌بخشی جغرافیایی و قراردادی تأمین‌کنندگان برای کاهش وابستگی، استفاده از واردات در دوره‌های کمبود، نگهداری موجودی اضطراری و ذخایر راهبردی برای هموارسازی جریان عرضه و ارتقای زیرساخت‌های حمل‌ونقل و انبارداری جهت حفظ کیفیت (Daryanto et al., 2025؛ Rahbari et al., 2024).

از سوی دیگر، بهره‌گیری و فروش محصولات جانبی در فرایندهای مختلف زنجیره تأمین گندم می‌تواند با گشودن بازارهای جدید و تنوع‌بخشی به سبد محصولات، ارزش افزوده قابل‌توجهی ایجاد کرده و بهره‌وری منابع را افزایش دهد (Tufail et al., 2022). در مرحله آسیاب، سبوس و پوسته که غالباً ضایعات تلقی می‌شوند، با مدیریت مناسب به جریان‌های درآمدی بدل می‌گردند و هم‌زمان هدررفت منابع کاهش می‌یابد (Fu & Zhang, 2025). سبوس غنی از فیبر و پروتئین است و در تولید نان‌های سبوس‌دار، بیسکویت، خوراک دام و مکمل‌های غذایی کاربرد دارد (Xhabiri et al., 2014). در بخش مزرعه، کاه/کلش می‌تواند برای تولید خمیرکاغذ و بسته‌بندی‌های زیست‌تخریب‌پذیر به کار رود (Giordano & Mariani, 2024). درنتیجه، تمرکز بر بهره‌گیری و عرضه این جریان‌های جانبی، راهبردی کارآمد برای افزایش بهره‌وری، کاهش ضایعات، تقویت تاب‌آوری در برابر نوسانات عرضه و قیمت و خلق ارزش اقتصادی در کل زنجیره تأمین گندم است (Danciu et al., 2023).

در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چنددوره‌ای و چندمحصولی برای طراحی زنجیره تأمین تاب‌آور گندم در مواجهه با اختلالات ارائه شده است. ساختار مدل شامل تأمین‌کنندگان نهاده‌های کشت، مزارع، تأمین‌کنندگان گندم، سیلوهای ذخیره‌سازی، کارخانه‌های فراوری، مشتریان خوراک دام، صنایع آرایشی بهداشتی و مشتریان آرد است. به‌منظور افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات آب‌وهوایی، خرید تکمیلی گندم از تأمین‌کنندگان با درنظرگرفتن تخفیف مقداری در مدل لحاظ شده است. همچنین، رویکرد اقتصاد چرخشی از طریق استفاده مجدد از محصولات جانبی نظیر کاه، سبوس و دانه‌های معیوب در صنایع خوراک دام و محصولات آرایشی بهداشتی در نظر گرفته شده است.

در ادامه ساختار مقاله بدین صورت تنظیم شده است: در بخش دوم به مرور ادبیات، در بخش سوم به بیان مسئله و

مدل‌سازی ریاضی، در بخش چهارم به تشریح مثال عددی و نتایج حل مدل پیشنهادی و در بخش پنجم به جمع‌بندی و پیشنهادات آتی پرداخته می‌شود.

۲- مرور ادبیات

با توجه به مشابهت‌های راهبردی و نقش کاربردی برنج و گندم در سبد اقلام اساسی، در این بخش ابتدا به مرور مطالعات انجام‌شده در حوزه بهینه‌سازی زنجیره تأمین برنج پرداخته می‌شود و سپس ادبیات مرتبط با بهینه‌سازی زنجیره تأمین گندم موردبررسی قرار می‌گیرد. برای نمونه، اچمد و همکاران (Achmad et al., 2021) به‌منظور مقابله با عدم قطعیت‌های موجود در زنجیره تأمین برنج، یک مدل بهینه‌سازی استوار توسعه دادند. همچنین به دلیل عدم وجود داده‌های مناسب، یک مدل عامل‌بنیان برای شبیه‌سازی رفتار بازیگران بالادستی زنجیره تأمین و ظرفیت‌های تولید به کار گرفته شده است. با هدف بیشینه‌سازی سود و کاهش انتشار گاز کربن، لی و همکاران (Li et al., 2022) یک مدل ریاضی چندمحصولی و چند دوره‌ای جهت طراحی شبکه زنجیره تأمین برنج مبتنی بر ساختار شرکت‌های تعاونی و انبارداری پیشنهاد کردند. همچنین کاظمی و همکاران (Kazemi et al., 2023) یک مدل ریاضی دوهدفه جهت حداقل کردن هزینه‌ها و فرسایش و تخریب خاک ناشی از مصرف آب در کشت برنج ارائه دادند. میرزایی و همکاران (Mirzaei et al., 2022) یک شبکه دوکاناله برای زنجیره تأمین حلقه‌بسته پایدار برنج تحت شرایط عدم قطعیت پیشنهاد نمودند. در این مدل، کمینه‌سازی هزینه و میزان انتشار آلودگی و همچنین بیشینه‌سازی ایجاد فرصت‌های شغلی به‌عنوان سه بعد توسعه پایدار موردتوجه قرار گرفته است.

در حوزه زنجیره تأمین گندم نیز پورمحمدی و همکاران (Pourmohammadi et al., 2020) یک مدل ریاضی برای طراحی مجدد و برنامه‌ریزی زنجیره تأمین گندم ارائه دادند. مدل پیشنهادی‌شان، مکان و ظرفیت سیلوها را تعیین می‌کند و هم‌زمان به مسائل انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش، انبارش، حمل‌ونقل و توزیع می‌پردازد. یوسفی بابادی و همکاران (Yousefi-Babadi et al., 2023) به بازطراحی یک شبکه زنجیره تأمین گندم-آرد-نان با درنظرگرفتن توسعه پایدار تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند. با درنظرگرفتن مدیریت ناوگان حمل‌ونقل، نادری و همکاران (Naderi et al., 2020) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه و برای حل آن از الگوریتم تجزیه بندرز استفاده نمودند. غلامیان و تقی‌زاده (Gholamian & Taghanzadeh, 2017) نیز مدلی در راستای طراحی زنجیره تأمین یکپارچه محصولات گندم پیشنهاد کردند. آن‌ها تصمیمات بلندمدت و میان‌مدت شامل انتخاب تأمین‌کننده و مکان‌یابی سیلوها و تخصیص و توزیع گندم و فرآورده‌های آن را در نظر گرفتند. همچنین یک مدل ریاضی چنددوره‌ای جهت طراحی زنجیره تأمین سبز گندم توسط موگاله و همکاران (Mogale et al., 2020) ارائه شد. هدف مدل پیشنهادی‌شان، کمینه‌سازی هزینه‌های مرتبط با تأسیس سیلو، حمل‌ونقل، تلفات غلات خوراکی، نگهداری موجودی، انتشار گازهای کربنی و جریمه‌های مربوط به ریسک است.

اختلالات مختلف در زنجیره تأمین گندم، ازجمله شرایط نامساعد آب‌وهوایی، بیماری‌های همه‌گیر مانند پاندمی کووید-۱۹ و تحریم‌ها و تنش‌های سیاسی، ریسک‌های قابل‌توجهی برای پایداری، دسترسی به محصول و ثبات بازار ایجاد می‌کنند. برای مقابله با اختلالات در زنجیره تأمین گندم، رهبری و همکاران (Rahbari et al., 2024) با به‌کارگیری رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو استوار، به ارزیابی استراتژی‌های تاب‌آوری ازجمله استفاده از تأمین‌کنندگان جایگزین و موجودی اضطراری از پیش تعیین‌شده پرداختند. دیمیتریس گاوالاس (Gavalas, 2025) با ارائه یک مدل بهینه‌سازی به بررسی رویکردهای مبتنی بر استواری و تاب‌آوری برای مقابله با اختلالاتی مانند شرایط نامساعد آب‌وهوایی، پاندمی کووید-۱۹ و تنش‌های سیاسی در زنجیره تأمین گندم پرداختند. همچنین، حسینی مطلق و همکاران (Hosseini-Motlagh et al., 2020) یک مدل چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین گندم با هدف حداقل کردن هزینه، عدم تاب‌آوری و پیامدهای منفی مسئولیت اجتماعی ارائه نمودند.

با توجه به اهمیت فزاینده پایداری و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی در کشاورزی، در سال‌های اخیر، توجه به اقتصاد چرخشی و مدیریت پایدار منابع در زنجیره تأمین

محصولات کشاورزی به‌ویژه گندم، به‌دلیل کاهش ضایعات و بهینه‌سازی استفاده از منابع، اهمیت فزاینده‌ای یافته است (Firouzi et al., 2025). در همین راستا، استواری و همکاران (Ostovari et al., 2025) یک مدل ریاضی جهت طراحی زنجیره تأمین گندم ارائه کردند که امکان فروش ضایعات تولیدی به مشتریان خوراک دام را مدنظر قرار دادند. علاوه بر این، مدل پیشنهادی بر عوامل کلیدی مانند دوره‌های خواب گندم، کیفیت گندم، حمل‌ونقل بین‌منطقه‌ای و نرخ استخراج آرد تمرکز دارد. با درنظرگرفتن پایداری، تاب‌آوری و پاسخگویی، شریفی و همکاران (Sharifi et al., 2024) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی فازی چند هدفه و استوار برای طراحی زنجیره تأمین گندم توسعه دادند. آن‌ها فروش ضایعات ایجادشده در فرآیند نگهداری را لحاظ نمودند. جدول **۱** به دسته‌بندی مقالات مرتبط با پژوهش حاضر می‌پردازد.

جدول ۱. مقایسه پژوهش حاضر با مطالعات پیشین

Table 1. Comparison of the present study with previous studies

منبع	جز مختل‌شده		راهبرد تاب‌آوری	تخفیف	اقتصاد چرخشی	اجزای شبکه						
	کامل	جزیی				تأمین کنندگان	مزارع کشت	سیلوهای ذخیره‌سازی	کارخانه‌های فرآوری	مشتریان		
						نهاده‌های کشت	گندم			اصلی	جانبی	
											خوراک دام	کارخانه آرایشی بهداشتی
Gholamian & Taghanzadeh, 2017							✓		✓	✓		
Pourmohammadi et al., 2020							✓	✓	✓	✓		
Naderi et al., 2020								✓	✓			
Mogale et al., 2020								✓	✓	✓		
Hosseini-Motlagh et al., 2020			کاهش گره و جریان‌های بحرانی				✓	✓	✓	✓		
Yousefi-Babadi et al., 2023								✓	✓	✓		
Rahbari et al., 2024		تأمین کننده	تأمین کننده و انبار پشتیبان				✓	✓	✓	✓		

ادامه جدول ۱.

Table 1 continued.

منبع	راهبرد تاب‌آوری		تخفیف	اقتصاد چرخشی	اجزای شبکه							
	جزء مختل‌شده				تأمین‌کنندگان		مزارع کشت	سیلوهای ذخیره‌سازی	کارخانه‌های فرآوری	مشتریان		
	کامل	جزیی			نهاده‌های کشت	گندم				اصلی	جانبی	کارخانه آرایشی بهداشتی
Sharifi et al., 2024		کاهش گره و جریان‌های بحرانی		فروش ضایعات انبار			✓	✓		✓	✓	
Ostovari et al., 2025				فروش ضایعات تولیدی			✓	✓	✓	✓	✓	
پژوهش حاضر	مزارع کشت	تأمین‌کننده پشتیبان	✓	فروش کاه، سبوس و گندم‌های آسیب‌دیده	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

با توجه به مرور ادبیات و جدول **۱**، شکاف‌های پژوهشی به شرح زیر هستند: اولا زنجیره تأمین گندم نقش حیاتی در امنیت غذایی و ثبات اقتصادی دارد و بررسی راهبردهای تاب‌آوری آن برای کاهش تأثیر اختلالات و مدیریت ریسک‌های بالقوه ضروری است (Gavalas, 2025؛ Rahbari et al., 2024). بااین‌حال، مطالعات محدودی به بررسی راهکارهای بهینه‌سازی زنجیره تأمین گندم در مواجهه با اختلالات پرداخته‌اند. ثانیا با توجه به فشارهای زیست‌محیطی، محدودیت منابع و حرکت صنایع غذایی به‌سوی توسعه پایدار، ادغام اصول اقتصاد چرخشی در طراحی زنجیره تأمین امری ضروری تلقی می‌شود (Ostovari et al., 2025؛ Sharifi et al., 2024). در اغلب پژوهش‌ها، اصول اقتصاد چرخشی مانند مدیریت ضایعات تولیدی و استفاده از محصولات جانبی موردتوجه قرار نگرفته است. علاوه بر این، تصمیمات کلیدی در زنجیره تأمین محصولات کشاورزی به‌شدت تحت تأثیر چرخه‌های

کشت، محدودیت‌های زمانی تولید و سازوکارهای قیمت‌گذاری قرار دارند که نادیده‌گرفتن آن‌ها می‌تواند به کاهش قابلیت تعمیم و اجرای نتایج منجر شود (Zheng, 2022). بااین‌وجود، ویژگی‌های واقعی صنعت، ازجمله فرآیندهای کشت و تخفیف مقداری، در طراحی زنجیره تأمین گندم لحاظ نشده‌اند.

برای پاسخ‌گویی به این شکاف‌ها، این مطالعه بر روی طراحی زنجیره تأمین گندم با هدف افزایش تاب‌آوری در برابر اختلالات و ارتقای سودآوری از طریق پیاده‌سازی اصول اقتصاد چرخشی تمرکز دارد، به‌گونه‌ای که هم نوسانات محیطی مدیریت و هم بهره‌وری منابع بهینه شود. در این راستا، یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چنددوره‌ای و چندمحصولی توسعه یافته است که قادر به بررسی سناریوهای مختلف اختلال و امکان اتخاذ تصمیمات استراتژیک و تاکتیکی به‌طور هم‌زمان است. ساختار زنجیره شامل تأمین‌کنندگان نهاده‌های کشت و گندم، مزارع، سیلوهای ذخیره‌سازی، کارخانه‌های فرآوری و مشتریان نهایی و جانبی می‌باشد؛ ترکیب دقیق این اجزا امکان مدل‌سازی جریان مواد و اطلاعات در کل زنجیره و تحلیل اثرات تصمیمات در هر مرحله بر کل سیستم را فراهم می‌کند. همچنین، برای مقابله با تغییرات آب‌وهوایی و بازتاب دقیق‌تر فرآیندهای تجاری، راهکار خرید تکمیلی گندم با درنظرگرفتن تخفیف مقداری به‌عنوان یک استراتژی تاب‌آوری در مدل تعریف شده است. این استراتژی، انعطاف لازم برای پاسخ به نوسانات عرضه و تقاضا را فراهم کرده و بهره‌وری اقتصادی را از طریق کاهش هزینه‌ها و استفاده بهینه از سیاست‌های قیمت‌گذاری واقعی افزایش می‌دهد.

۳- بیان مسئله

مطابق شکل ۱، زنجیره تأمین تحت بررسی از تأمین‌کنندگان نهاده‌های کشت (بذر، کود و آفت‌کش)، مزارع گندم، تأمین‌کنندگان گندم، سیلوهای ذخیره‌سازی، کارخانه‌های فرآوری آرد و سه گروه مشتری نهایی تشکیل می‌شود: مشتریان آرد گندم (مانند نانوایی‌ها و صنایع غذایی)، مشتریان خوراک دام و صنایع آرایشی و بهداشتی. در گام نخست، برای کشت گندم در مزارع، مواد اولیه موردنیاز از تأمین‌کنندگان نهاده‌های کشت خریداری می‌شود. پس از برداشت، کاه جدا و پاک‌سازی اولیه انجام می‌گیرد و دانه‌های گندم برای نگهداری به سیلوها منتقل می‌شوند. برای افزایش تاب‌آوری در برابر اختلالات آب‌وهوایی مؤثر بر ظرفیت کشت، امکان خرید گندم آماده با تخفیف و ذخیره‌سازی آن در سیلوها نیز پیش‌بینی شده است. بخشی از موجودی سیلوها برای تولید آرد به کارخانه‌های فرآوری ارسال می‌شود. در مرحله آماده‌سازی برای آسیاب، دانه‌های خرد/آسیب‌دیده از جریان اصلی تفکیک و به‌همراه کاه تولیدشده مزارع به مشتریان خوراک دام عرضه می‌گردد. سپس تنها دانه‌های سالم آسیاب می‌شوند؛ در این فرآیند، آرد حاصل به مشتریان آرد گندم ارسال‌شده و سبوس جداشده نیز برای استفاده در صنایع آرایشی و بهداشتی عرضه می‌گردد.

شکل ۱. زنجیره تأمین گندم تحت بررسی.

Figure 1. Wheat supply chain under review.

سایر مفروضات مدل پیشنهادی شامل:

۱) مکان‌های بالقوه برای احداث سیلوها با ظرفیت‌های مختلف از قبل مشخص هستند.
۲) هر کارخانه فرآوری دارای ظرفیت تولید محدود است. همچنین مزارع، سیلوها و کارخانه‌های فرآوری به ترتیب به‌منظور نگهداری مواد اولیه کشت، گندم و آرد از ظرفیت ذخیره‌سازی مشخصی برخوردارند.
۳) موجودی اولیه انبار مزارع، کارخانه‌های فرآوری و سیلوها برابر با صفر در نظر گرفته شده است.
۴) چند نوع آرد گندم به‌عنوان محصولات نهایی و چند نوع ماده اولیه کشت در مدل لحاظ شده است.
۵) برای تولید هر نوع آرد گندم، از گندم با ویژگی‌های متفاوت استفاده می‌شود.
۶) برنامه‌ریزی مسئله در یک افق زمانی چنددوره‌ای انجام می‌شود.
۷) وسایل نقلیه با ظرفیت‌های متفاوت برای حمل دانه و آرد گندم در نظر گرفته شده‌اند.

هدف مسئله حداکثر کردن سود زنجیره تأمین گندم جهت تعیین تصمیات زیر است:

۱) میزان خرید نهاده‌های کشت و گندم از تأمین‌کنندگان
۲) میزان گندم کشت‌شده در مزارع
۳) میزان آرد تولیدشده در کارخانه پردازش
۴) میزان حمل‌ونقل محصولات بین اجزای مختلف شبکه
۵) میزان نگهداری موجودی در سیلوها و انبار مزارع و کارخانه‌های فرآوری
۶) احداث سیلو با سطوح ظرفیت مشخص
۷) انتخاب تأمین‌کنندگان نهاده‌های کشت و گندم

۳-۱- مدل بهینه‌سازی مسئله

در این بخش، ابتدا مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی‌شده و سپس مدل ریاضی پیشنهادی ارائه می‌گردد.

۳-۱-۱- مجموعه‌ها

A	مجموعه تأمین‌کنندگان نهاده‌های کشت، $a \in A$
N	مجموعه مزارع، $n \in N$
C	مجموعه تأمین‌کنندگان گندم، $c \in C$
I	مجموعه سیلوهای ذخیره‌سازی، $i \in I$
P	مجموعه کارخانه‌های فرآوری، $p \in P$
B	مجموعه کارخانه‌های آرایشی و بهداشتی، $b \in B$
E	مجموعه مشتریان خوراک دام، $e \in E$
J	مجموعه مشتریان آرد، $j \in J$
K	مجموعه آردهای گندم، $k \in K$
M	مجموعه مواد اولیه کشت، $m \in M$
F	مجموعه گندم‌ها، $f \in F$
V	مجموعه وسایل نقلیه، $v \in V$
R	مجموعه سطوح قیمت گندم، $r \in R$
L	مجموعه سطوح ظرفیت سیلوهای ذخیره‌سازی، $l \in L$
T	مجموعه دوره‌های زمانی، $t \in T$
S	مجموعه سناریوها، $s \in S$

۳-۱-۲- پارامترها

d_{jkt}	میزان تقاضای مشتری j برای آرد گندم k در دوره زمانی t
db_{bt}	حداکثر میزان تقاضای سبوس گندم توسط کارخانه آرایشی و بهداشتی b در دوره زمانی t
ds_{et}	حداکثر میزان تقاضای کاه و گندم آسیب‌دیده توسط مشتری خوراک دام e در دوره زمانی t
sp_{kt}	قیمت فروش هر واحد آرد گندم نوع k در دوره زمانی t
sb_t	قیمت فروش هر واحد سبوس گندم در دوره زمانی t
se_t	قیمت فروش هر واحد گندم آسیب‌دیده در دوره زمانی t
ss_t	قیمت فروش هر واحد کاه گندم در دوره زمانی t
la_{amt}	ظرفیت تأمین‌کننده نهاده کشت a برای ماده اولیه m در دوره زمانی t
lf_{aft}	ظرفیت تأمین‌کننده نهاده کشت a برای بذر گندم نوع f در دوره زمانی t
lb_{nt}	ظرفیت کشت مزرعه n در دوره زمانی t
lm_{mnt}	ظرفیت انبار ماده اولیه m در مزرعه n در دوره زمانی t

lc_{ct} ظرفیت تأمین‌کننده گندم c در دوره زمانی t

li_{il} ظرفیت سیلوی i با سطح ظرفیت l

lh_{pt} ظرفیت انبار کارخانه p در دوره زمانی t

lk_{pkt} ظرفیت تولید کارخانه p برای آرد گندم نوع k در دوره زمانی t

lv_v ظرفیت وسیله نقلیه v

cm_{mant} هزینه خرید هر واحد ماده اولیه m از تأمین‌کننده a برای مزرعه n در دوره زمانی t

cf_{fant} هزینه خرید هر واحد بذر گندم نوع f از تأمین‌کننده a برای مزرعه n در دوره زمانی t

cx_{fnt} هزینه کشت هر واحد گندم نوع f در مزرعه n در دوره زمانی t

cn_{nivt} هزینه برداشت و حمل هر واحد گندم از مزرعه n به سیلو i با وسیله نقلیه v در دوره زمانی t

cc_{fcrit} هزینه خرید هر واحد گندم نوع f از تأمین‌کننده گندم c برای سیلو i با سطح قیمتی r در دوره زمانی t

ci_{ipvt} هزینه حمل‌ونقل هر واحد گندم از سیلو i به کارخانه p با وسیله نقلیه v در دوره زمانی t

cp_{pjkvt} هزینه حمل‌ونقل هر واحد آرد گندم نوع k از کارخانه p به مشتری j با وسیله نقلیه v در دوره زمانی t

cb_{pbvt} هزینه حمل‌ونقل هر واحد سبوس گندم از کارخانه p به کارخانه آرایشی و بهداشتی b با وسیله نقلیه v در دوره زمانی t

ck_{pkt} هزینه تولید هر واحد آرد گندم نوع k در کارخانه p در دوره زمانی t

oc_c هزینه عقد قرارداد با تأمین‌کننده گندم c

oa_a هزینه عقد قرارداد با تأمین‌کننده نهاده‌های کشت a

oi_{il} هزینه احداث سیلو در مکان پیشنهادی i با سطح ظرفیت l

hc_{it} هزینه نگهداری هر واحد گندم در سیلوی i در دوره زمانی t

hp_{kpt} هزینه نگهداری هر واحد آرد گندم نوع k در کارخانه p در دوره زمانی t

hm_{nmt} هزینه نگهداری هر واحد ماده اولیه m در مزرعه n در دوره زمانی t

am_{am} برابر یک اگر تأمین‌کننده a توان تأمین ماده m را داشته باشد، صفر در غیر این صورت.

af_{af} برابر یک اگر تأمین‌کننده a توان تأمین بذر گندم نوع f را داشته باشد، صفر در غیر این صورت.

rk_{fk} نرخ تبدیل گندم نوع f به آرد گندم نوع k

rx_f نرخ تبدیل بذر به گندم نوع f

rm_m نرخ مصرف ماده اولیه کشت m به ازای کشت هر واحد گندم

rs_n نرخ ایجاد کاه گندم در مزرعه n به ازای کشت هر واحد گندم

rb_{fp} نرخ تولید سبوس گندم حین فرآیند فراوری هر واحد گندم نوع f در کارخانه p

rd_{fp} نرخ آسیب وارده به گندم حین فرآیند فراوری هر واحد گندم نوع f در کارخانه p

po_{rfc} سطح قیمت r برای خرید گندم f از تأمین‌کننده گندم c

α_{ns} درصد ظرفیت ازدست‌رفته کشت مزرعه n تحت سناریو s

π_s احتمال وقوع سناریو s

۳-۱-۳- متغیرهای تصمیم

QM_{anmt} مقدار مواد اولیه m خریداری‌شده از تأمین‌کننده a برای مزرعه n در دوره زمانی t

QF_{anft} مقدار بذر گندم نوع f خریداری‌شده از تأمین‌کننده a برای مزرعه n در دوره زمانی t

Q_{fnt} مقدار گندم نوع f کاشته شده در مزرعه n در دوره زمانی t

QN_{fnivts} مقدار گندم نوع f برداشت‌شده در مزرعه n که با وسیله نقلیه v در دوره زمانی t تحت سناریو s به سیلو i ارسال می‌شود

QC_{cfitrs} مقدار گندم نوع f خریداری‌شده از تأمین‌کننده گندم c جهت نگهداری در سیلو i در دوره زمانی t با سطح قیمت r تحت سناریو s

X_{fipvts} مقدار گندم نوع f که از سیلو i به کارخانه p در دوره زمانی t با وسیله نقلیه v تحت سناریو s ارسال می‌شود.

W_{pjkvts} مقدار آرد گندم نوع k که از کارخانه p به

مشتری j با وسیله نقلیه v در دوره زمانی t تحت سناریو s ارسال می‌شود.

U_{pkts} مقدار تولید آرد گندم نوع k در کارخانه p در دوره زمانی t تحت سناریو s

Y_{nets} مقدار کاه گندم ارسالی از مزرعه n به مشتری خوراک دام e در دوره زمانی t تحت سناریو s

G_{pets} مقدار گندم آسیب‌دیده ارسالی از کارخانه p به مشتری خوراک دام e در دوره زمانی t تحت سناریو s

Z_{pbtvs} مقدار سبوس گندم ارسالی از کارخانه p به کارخانه آرایشی و بهداشتی b با وسیله نقلیه v در دوره زمانی t تحت سناریو s

HN_{mnts} مقدار نگهداری ماده اولیه m در مزرعه n در دوره زمانی t تحت سناریو s

H_{ifts} مقدار نگهداری گندم f در سیلوی i در دوره زمانی t تحت سناریو s

HK_{kpts} مقدار نگهداری آرد گندم نوع k در کارخانه p در دوره زمانی t تحت سناریو s

O_{frcits} برابر یک است اگر سطح قیمت r جهت خرید گندم نوع f از تأمین‌کننده گندم c برای سیلو i در دوره زمانی t تحت سناریو s انتخاب شود، صفر در غیر این صورت.

EC_c برابر یک است اگر با تأمین‌کننده گندم c قرارداد بسته شود، صفر در غیر این صورت.

EA_a برابر یک است اگر با تأمین‌کننده a قرارداد بسته شود، صفر در غیر این صورت.

OP_{il} برابر یک است اگر در مکان پیشنهادی i سیلو با سطح ظرفیت l احداث شود، صفر در غیر این صورت.

۴-۱-۳- تابع هدف

هدف مسئله حداکثر کردن سود کل زنجیره تأمین است که از تفاضل درآمد ناشی از فروش آرد گندم و محصولات جانبی شامل کاه، سبوس و دانه آسیب‌دیده گندم به دست می‌آید. اجزای تابع هدف شامل درآمدهای کل زنجیره تأمین (TI_s)، هزینه خرید گندم (WC_s)، هزینه‌های کشت گندم در مزارع (CC)، هزینه‌های حمل‌ونقل (SC_s)، هزینه تولید (PC_s)، هزینه‌های نگهداری (HC_s) و هزینه‌های ثابت (FC) که در معادلات (۱) تا (۷) به ترتیب نشان داده شده است.

$$TI_s = \sum_p \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t W_{pjkvts} sp_{kt} + \sum_p \sum_b \sum_v \sum_t Z_{pbvts} sb_t + \sum_p \sum_e \sum_t G_{pets}\, se_t + \sum_n \sum_e \sum_t Y_{nets}\, ss_t \quad (۱)$$

$$WC_s = \sum_c \sum_i \sum_r \sum_t QC_{fcitrs} cc_{fcrit} \quad (۲)$$

$$CC = \sum_a \sum_n \sum_m \sum_t QM_{anmt}\, cm_{mnt} + \sum_a \sum_n \sum_f \sum_t QF_{anft}\, cf_{fant} + \sum_n \sum_f \sum_t Q_{nft} cx_{fnt} \quad (۳)$$

$$SC_s = \sum_p \sum_j \sum_k \sum_v \sum_t W_{pjkvts} cp_{pjkvt} + \sum_p \sum_b \sum_v \sum_t Z_{pbvts} cb_{pbvt} + \sum_i \sum_p \sum_v \sum_f \sum_t X_{ifpvts} ci_{ipvt} + \sum_n \sum_i \sum_v \sum_f \sum_t QN_{fnitvs} cn_{nivt} \quad (۴)$$

$$PC_s = \sum_p \sum_k \sum_t U_{pkts} ck_{pkt} \quad (۵)$$

$$HC_s = \sum_m \sum_n \sum_t HN_{mnts} hm_{mnt} + \sum_i \sum_f \sum_t H_{ifts} hc_{it} + \sum_k \sum_p \sum_t HK_{pkts} hp_{kpt} \quad (۶)$$

$$FC = \sum_c EC_c oc_c + \sum_a EA_a oa_a + \sum_i \sum_l OP_{il} oi_{il} \quad (۷)$$

معادله (۱) درآمد کل زنجیره تأمین را که شامل فروش آرد گندم به‌عنوان محصول نهایی و کاه، سبوس و دانه آسیب‌دیده گندم به‌عنوان محصولات جانبی است را نشان می‌دهد. معادله (۲) هزینه خرید گندم از تأمین‌کنندگان را بیان می‌کند. معادله (۳) هزینه‌های کشت گندم شامل هزینه خرید بذر، مواد اولیه و کاشت گندم را نشان

می‌دهد. هزینه (۴) مربوط به هزینه‌های حمل‌ونقل در سراسر زنجیره تأمین است؛ این هزینه‌ها شامل هزینه حمل‌ونقل گندم از مزارع به سیلوها و متعاقباً از سیلوها به کارخانه‌های فراوری، همچنین ارسال آرد به مشتریان نهایی و سبوس به کارخانه‌های آرایشی و بهداشتی است. معادله (۵) هزینه تولید و فراوری آرد گندم را نشان می‌دهد. معادله (۶) هزینه‌های نگهداری شامل مواد اولیه کشت در انبار مزارع، دانه گندم در سیلوها و آرد گندم در انبار کارخانه فراوری را محاسبه می‌کند. معادله (۷) نیز مربوط به هزینه‌های ثابت است که شامل هزینه‌های عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان و هزینه احداث سیلو می‌باشد.

با توجه به تعاریف بالا، معادله (۸) بیشینه‌سازی سود کل زنجیره تأمین را نشان می‌دهد.

۳-۱-۵- محدودیت‌ها

محدودیت‌های (۹) تا (۱۳) به ترتیب حداکثر ظرفیت تأمین‌کنندگان نهاده‌های کشت، کشت در مزارع، تأمین‌کنندگان دانه گندم و تولید کارخانه‌های فراوری را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۴) تا (۱۷) نیز به ترتیب ظرفیت وسایل نقلیه برای حمل دانه گندم از مزارع به سیلوها و از سیلوها به کارخانه‌های فراوری، سبوس گندم از کارخانه‌های فراوری به کارخانجات آرایشی و بهداشتی و آرد گندم از کارخانه‌های فراوری به مشتریان نهایی را کنترل می‌کنند. محدودیت‌های (۱۸) تا (۲۰) حداکثر ظرفیت انبار مواد اولیه کشت در مزارع، آرد گندم در کارخانه‌های فراوری و دانه گندم در سیلوها را نشان می‌دهد.

$$\max Z = \pi_s \sum_s [TI_s - (WC_s + SC_s + PC_s + HC_s)] - (CC + FC) \qquad (۸)$$

$$\sum_n QM_{anmt} \le la_{amt} EA_a am_{am} \qquad \forall a, m, t \qquad (۹)$$

$$\sum_n QF_{anft} \le lf_{aft} EA_a af_{af} \qquad \forall a, f, t \qquad (۱۰)$$

$$\sum_f Q_{fnt} \le lb_{nt} \qquad \forall n, t \qquad (۱۱)$$

$$\sum_i \sum_f \sum_r QC_{cfitrs} \le lc_{ct} EC_c \qquad \forall c, t, s \qquad (۱۲)$$

$$U_{pkts} \le lk_{pkt} \qquad \forall p, k, t, s \qquad (۱۳)$$

$$\sum_i \sum_n \sum_f QN_{fnivts} \le lv_v \qquad \forall v, t, s \qquad (۱۴)$$

$$\sum_i \sum_f \sum_p X_{ifpvts} \le lv_v \qquad \forall v, t, s \qquad (۱۵)$$

$$\sum_b \sum_p Z_{pbvts} \le lv_v \qquad \forall v, t, s \qquad (۱۶)$$

$$\sum_j \sum_p \sum_k W_{pjkvts} \le lv_v \qquad \forall v, t, s \qquad (۱۷)$$

$$HN_{mn(t-1)s} + \sum_a QM_{anmt} \le lm_{mnt} \qquad \forall m, n, t, s \qquad (۱۸)$$

$$\sum_k HK_{kp(t-1)s} + U_{pkts} \le lh_{pt} \qquad \forall p, t, s \qquad (۱۹)$$

$$\sum_f H_{if(t-1)s} + \sum_n \sum_f \sum_v QN_{fnivts} + \sum_c \sum_f \sum_r QC_{cfitrs} \le \sum_l li_{il} OP_{il} \qquad \forall i, t, s \qquad (۲۰)$$

$$HN_{mnts} = HN_{mn(t-1)s} + \sum_a QM_{anmt} - \sum_f Q_{fnt}\, rm_m \qquad \forall m, n, t, s \qquad (۲۱)$$

$$HK_{kpts} = HK_{kp(t-1)s} + U_{pkts} - \sum_{j}\sum_{v} W_{pjkvts} \qquad \forall k,p,t,s \qquad (۲۲)$$

$$H_{ifts} = H_{i(t-1)s} + \sum_{n}\sum_{v} QN_{fnivts} + \sum_{c}\sum_{r} QC_{cfitrs} - \sum_{p}\sum_{v} X_{ifpvts} \qquad \forall i,f,t,s \qquad (۲۳)$$

$$\sum_{a} QF_{anft} = Q_{fnt} \qquad \forall f,n,t \qquad (۲۴)$$

$$\sum_{p}\sum_{v} W_{pjkvts} = d_{jkt} \qquad \forall j,k,t,s \qquad (۲۵)$$

$$\sum_{p}\sum_{v} Z_{pbvts} \le db_{bt} \qquad \forall b,t,s \qquad (۲۶)$$

$$\sum_{n} Y_{nets} + \sum_{p} G_{pets} \le ds_{et} \qquad \forall e,t,s \qquad (۲۷)$$

$$Q_{fnt} = \sum_{i}\sum_{v} QN_{fnivts}\, rx_f (1-\alpha_{ns}) \qquad \forall f,n,t,s \qquad (۲۸)$$

$$\sum_{i}\sum_{v}\sum_{f} QN_{fnivts} rs_n = \sum_{e} Y_{nets} \qquad \forall n,t,s \qquad (۲۹)$$

$$\sum_{i}\sum_{f}\sum_{v} X_{fipvts} rk_{kf} = \sum_{k} U_{pkts} \qquad \forall p,t,s \qquad (۳۰)$$

$$\sum_{i}\sum_{f}\sum_{v} X_{fipvts}\, rb_{fp} = \sum_{b}\sum_{v} Z_{pbvts} \qquad \forall p,t,s \qquad (۳۱)$$

$$\sum_{i}\sum_{f}\sum_{v} X_{fipvts}\, rd_{fp} = \sum_{e} G_{pets} \qquad \forall p,t,s \qquad (۳۲)$$

$$po_{(r-1)fc} O_{frcits} \le QC_{cfitrs} \le po_{rfc} O_{frcits} \qquad \forall r,c,f,i,t,s \qquad (۳۳)$$

$$\sum_{r} O_{frcits} \le 1 \qquad \forall c,i,t,s \qquad (۳۴)$$

$$\sum_{l} OP_{il} \le 1 \qquad \forall i \qquad (۳۵)$$

$$F_{anmts}, Q_{nits}, QC_{citrs}, U_{pkts}, X_{ipvts}, W_{pjkvts}, HN_{mnts}, HK_{kpts}, H_{its}, Z_{pbts}, G_{pets}, Y_{nets} \ge 1 \qquad \forall a,n,m,t,s,i,c,p,k,v,j,e,b \qquad (۳۶)$$

$$O_{frcits}, OP_{il}, EA_a, EC_c \in \{0,1\} \qquad \forall f,r,c,i,t,s,l,a \qquad (۳۷)$$

محدودیت‌های (۲۱) تا (۲۳) به ترتیب تعادل موجودی در مزارع، کارخانه‌های فراوری و سیلوها را تضمین می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، موجودی هر دوره برابر است با موجودی دوره قبل به اضافه ورودی‌ها و منهای خروجی‌ها، تا جریان مواد در طول زنجیره به‌طور دقیق و پایدار حفظ‌شده و کمبود یا انباشت غیرضروری رخ ندهد.

محدودیت (۲۴) نیز تعادل جریان بذر گندم را نشان می‌دهد، به‌طوری که میزان بذر واردشده به هر مزرعه با میزان مصرف یا خروجی آن در همان دوره برابر باشد. با توجه به محصولات اصلی و جانبی زنجیره شامل آرد گندم، دانه‌های آسیب‌دیده، کاه و سبوس، محدودیت‌های (۲۵) تا (۲۷) جریان محصولات را طوری کنترل می‌کنند که تقاضای مشتریان آرد گندم، کارخانجات آرایشی بهداشتی و مشتریان خوراک دام ارضا شود.

محدودیت (۲۸) نرخ تبدیل گندم کاشته‌شده به گندم برداشت‌شده را با درنظرگرفتن اختلالات آب‌وهوایی مشخص می‌کند. در این محدودیت، میزان گندم برداشت‌شده در هر سناریو متناسب با شدت اختلال

تعیین می‌شود؛ به‌طوری‌که با افزایش شدت اختلالات، بخشی از ظرفیت کشت مزارع کاهش‌یافته و درنتیجه مقدار محصول قابل‌برداشت کمتر خواهد بود. محدودیت‌های (۲۹) تا (۳۲) نیز به ترتیب مربوط به نرخ تبدیل بذر کاشته شده به دانه گندم، دانه گندم به آرد گندم، نرخ تولید کاه گندم به ازای کشت یک واحد دانه گندم، نرخ تبدیل دانه گندم به سبوس گندم و نرخ آسیب وارده به دانه گندم حین فرآیند فراوری است. محدودیت (۳۳) سطح قیمت مناسب برای خرید دانه گندم از هر تأمین‌کننده را تعیین می‌کند و بر اساس آن، میزان کل خرید از هر تأمین‌کننده تعیین می‌شود. این محدودیت اطمینان می‌دهد که قیمت خرید اعمال‌شده باسیاست‌های کلان قیمت‌گذاری سیستم هماهنگ باشد، تخفیف‌های کلی به‌درستی لحاظ شوند و تصمیمات خرید نه‌تنها ازنظر اقتصادی بهینه باشند، بلکه جریان خرید در طول زنجیره با ظرفیت‌ها و محدودیت‌های تأمین‌کنندگان مطابقت داشته باشد. همچنین در ادامه محدودیت (۳۴) تضمین می‌کند که حداکثر یک سطح قیمت برای خرید گندم انتخاب شود. به‌عبارت‌دیگر، از بین گزینه‌های مختلف سطوح قیمت در تخفیف کلی، تنها یک مقدار می‌تواند انتخاب شود و سایر سطوح غیرفعال باقی می‌مانند، به‌طوری‌که میزان خرید با توجه به سطح قیمت انتخاب‌شده، تعیین می‌شود. محدودیت (۳۵) نشان می‌دهد که هر سیلو می‌تواند حداکثر با یک سطح ظرفیت احداث شود. نهایتاً محدودیت‌های (۳۶) و (۳۷) دامنه متغیرهای تصمیم مدل پیشنهادی را نشان می‌دهند.

۴- نتایج حل

۴-۱- تشریح مثال عددی

در این مطالعه ۳ نقطه اصلی تقاضا برای سه نوع آرد گندم به شرح جدول **۲** تعریف شده است. همچنین حداکثر ظرفیت نگهداری سیلوهای ذخیره‌سازی در چهار سطح تعریف‌شده، در جدول **۳** قابل‌مشاهده می‌باشد.

سایر اطلاعات مهم مربوط به مثال عددی مذکور به شرح زیر ارائه می‌شود:

- سه تأمین‌کننده مواد اولیه کشت
- دو مزرعه کشت گندم
- چهار تأمین‌کننده گندم
- یک کارخانه فراوری
- چهار مشتری خوراک دام
- دو کارخانه آرایشی بهداشتی
- سه سطح قیمت خرید دانه گندم از تأمین‌کنندگان مربوطه
- دو نوع وسیله نقلیه
- پنج دوره زمانی

جدول ۲. میزان تقاضا مشتریان آرد گندم

Table 2. Demand of wheat flour customers

نقاط تقاضا	میزان تقاضای سالیانه انواع آرد (تن)		
	آرد نان	آرد شیرینی	آرد سمولینا
۱	۱/۴	۱/۲	۱/۳۵
۲	۱/۹۵	۱/۷	۱/۳
۳	۱/۴	۱	۱/۲

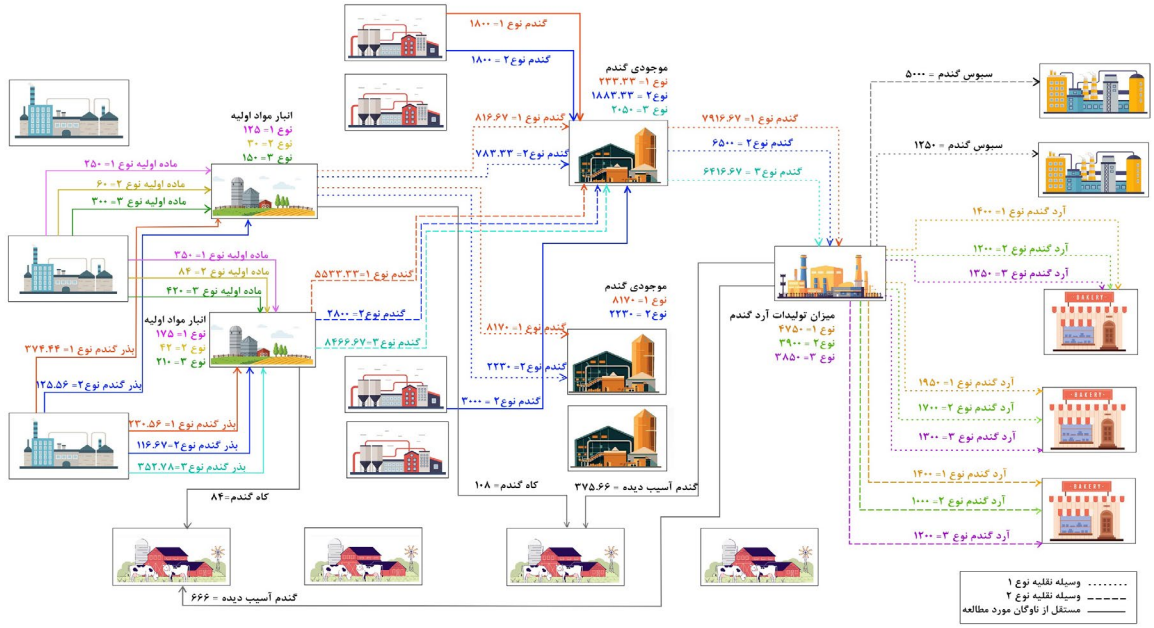
جدول ۳. میزان ظرفیت نگهداری سیلوهای ذخیره‌سازی

Table 3. Storage capacity of storage silos

مکان‌های پیشنهادی جهت احداث	سطوح ظرفیت ذخیره‌سازی گندم (تن)			
	۱	۲	۳	۴
۱	۸	۱۲	۲۰	۲۵
۲	۵	۱۵	۲۵	۳۵
۳	۷	۸	۹	۱۰

نهایتاً، مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS 24.1.2 و حل‌کننده CPLEX بر روی سیستمی با پردازنده Core i7- 8665U اجرا شده است.

شکل **۲** نتایج حل مدل پیشنهادی تحت شرایط اختلال متوسط را نشان می‌دهد. در این مسئله، تأمین‌کنندگان نهاده‌های کشت ۲ و ۳ و همچنین تأمین‌کنندگان گندم ۱، ۳ و ۴ به‌منظور مقابله با اختلالات انتخاب شده‌اند. در مکان‌های پیشنهادی ۱ و ۲ سیلوهایی با سطح ظرفیت ۴ و همچنین در مکان پیشنهادی ۳ نیز سیلویی با سطح ظرفیت ۱ احداث گردیده است. برای نمونه، در یک دوره و سناریوی مشخص، مواد اولیه کشت از تأمین‌کننده ۲ و بذر گندم از تأمین‌کننده ۳ برای مزارع تهیه گردیده است. گندم‌های نوع ۱ و ۲ در مزرعه ۱ و هر سه نوع گندم در مزرعه ۲ کشت شده‌اند. در راستای مدیریت هزینه‌های کشت نیز مواد اولیه در انبارهای مزارع نگهداری گردیده است.



شکل ۲. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی.

Figure 2. Results from solving the proposed model.

همچنین به‌منظور جبران کاهش ظرفیت کشت مزارع ناشی از اختلالات آب‌وهوایی، خرید گندم از تأمین‌کنندگان ۱ و ۳ انجام گرفته است. تمام گندم‌های کشت و خریداری‌شده به سیلوهای ۱ و ۲ انتقال یافته‌اند. در ادامه، برای پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان آرد، هر سه نوع محصول در کارخانه فراوری تولید گردیده است. برای اجرای اصول اقتصاد چرخشی نیز کاه گندم تولیدشده در مزارع و گندم‌های آسیب‌دیده در فرایند تولید آرد به مشتریان خوراک دام و سبوس حاصل از فراوری دانه‌های گندم به کارخانه‌های آرایشی و بهداشتی فروخته شده است.

۴-۲- سهم هزینه‌ها و درآمدهای زنجیره تأمین

شکل **۳** سهم هزینه‌ها و درآمدها در زنجیره تأمین گندم را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، بخش عمده درآمد زنجیره از فروش محصولات نهایی (انواع آرد گندم) تأمین می‌گردد؛ بااین‌حال محصولات جانبی مانند سبوس، کاه و دانه‌های آسیب‌دیده بیشتر از پانزده درصد از کل سود را تشکیل می‌دهند که اهمیت به‌کارگیری اصول اقتصاد چرخشی در افزایش سودآوری را برجسته می‌سازد. از منظر هزینه‌ها، حمل‌ونقل مواد اولیه/محصولات و هزینه‌های تولید در کارخانه‌های فراوری بیشترین سهم را دارند؛ این موضوع ضرورت برنامه‌ریزی دقیق تولید و مدیریت اثربخش فرآیندهای لجستیکی را تبیین می‌کند. اگرچه هزینه خرید گندم تنها حدود پانزده درصد از کل هزینه‌های سیستم را تشکیل می‌دهد، اما با توجه به مقایسه با سایر فعالیت‌های پرهزینه مانند تولید و حمل‌ونقل، این سهم قابل‌توجه است. بنابراین، اقداماتی که برای مقابله با اختلالات آب‌وهوایی و جبران کاهش ظرفیت کشت اتخاذ می‌شوند، هرچند توان پاسخ‌دهی پایدار به تقاضای گندم را تقویت می‌کنند اما معمولاً با هزینه‌های قابل‌توجهی همراه‌اند.

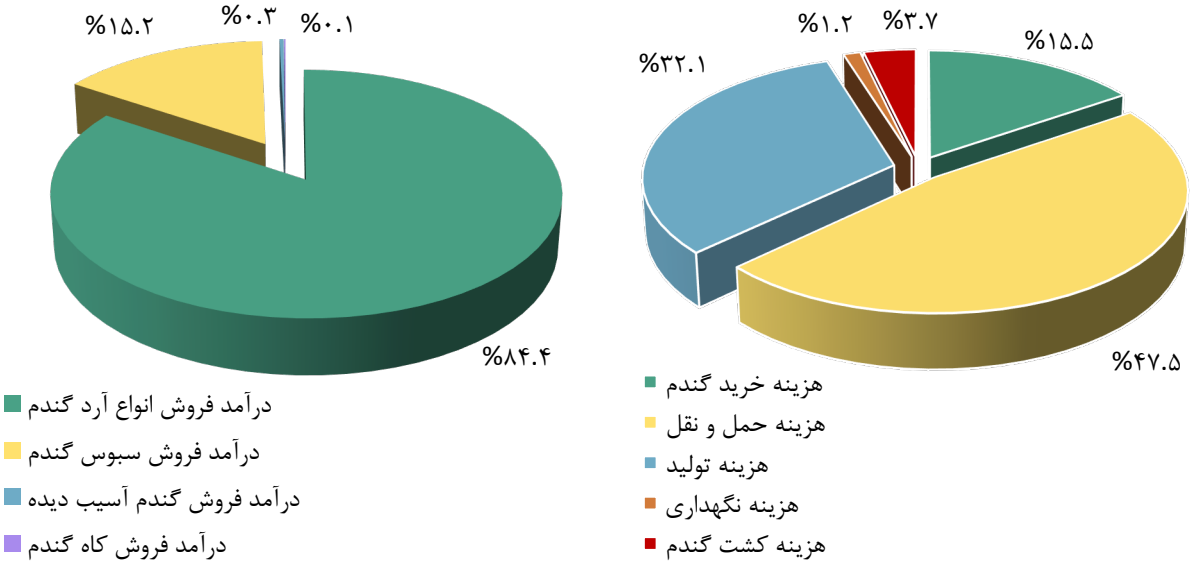
۴-۳- تأثیر سناریوهای مختلف اختلال بر عملکرد زنجیره تأمین

شکل **۴** مقایسه‌ای از تأثیر شدت اختلال بر میزان سود و موجودی انبارها ارائه می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش شدت اختلال، هم سود زنجیره تأمین و هم میزان موجودی انبار کاهش می‌یابد؛ این امر نشان‌دهنده پیچیدگی بیشتر زنجیره و اثرات قوی‌تر اختلالات بر عملکرد آن است. به‌عبارت‌دیگر، در سناریوی اختلال ضعیف، بیشترین سود و نگهداری موجودی حاصل‌شده و در سناریوی اختلال شدید، کمترین میزان آن مشاهده می‌شود. مدل پیشنهادی، مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی

دومرحله‌ای، با درنظرگرفتن تمام سناریوهای اختلال و احتمال وقوع آن‌ها، تصمیمات استراتژیک (مرحله اول) و تاکتیکی (مرحله دوم) را بهینه می‌کند. برخلاف مدل‌هایی که تنها یک سناریوی اختلال را در نظر می‌گیرند، مدل بهینه‌سازی تصادفی توانسته برنامه‌ریزی تولید و انبارداری مؤثرتری ارائه دهد و تعادلی میان سودآوری و ریسک برقرار کند. این ویژگی باعث می‌شود حتی در مواجهه با اختلالات شدید، کاهش عملکرد تولید و انبارداری به حداقل برسد و شبکه زنجیره تأمین با انعطاف‌پذیری بالا، به تغییرات در تأمین مواد اولیه واکنش نشان دهد.

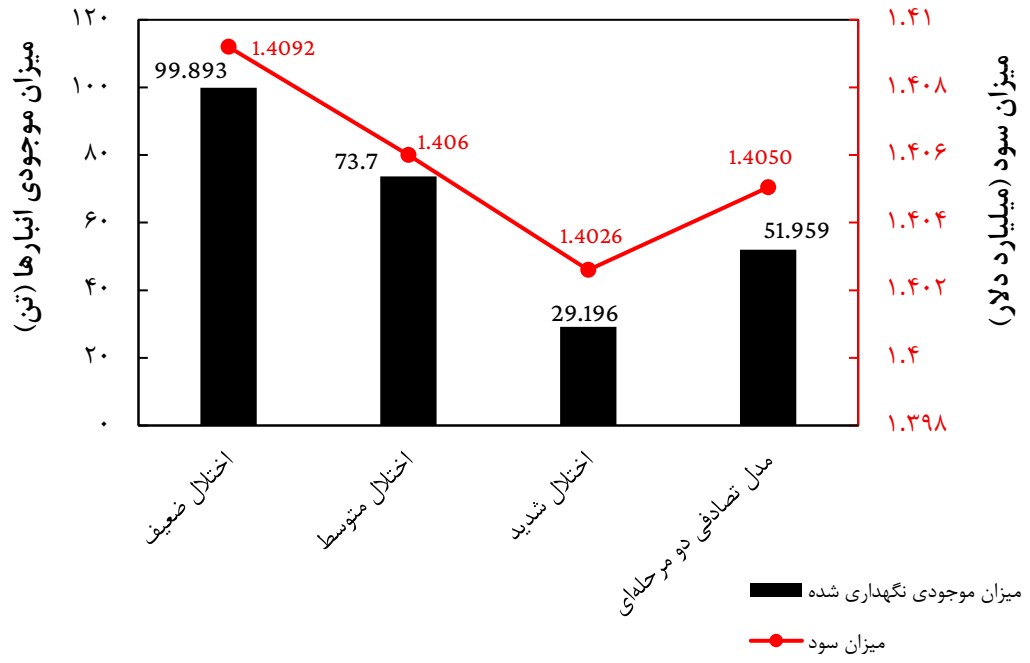
۴-۴- تأثیر اختلال بر تولید و سودآوری زنجیره تأمین گندم

شکل **۵** تأثیر اختلالات آب‌وهوایی بر زنجیره تأمین گندم و سودآوری آن را نشان می‌دهد.



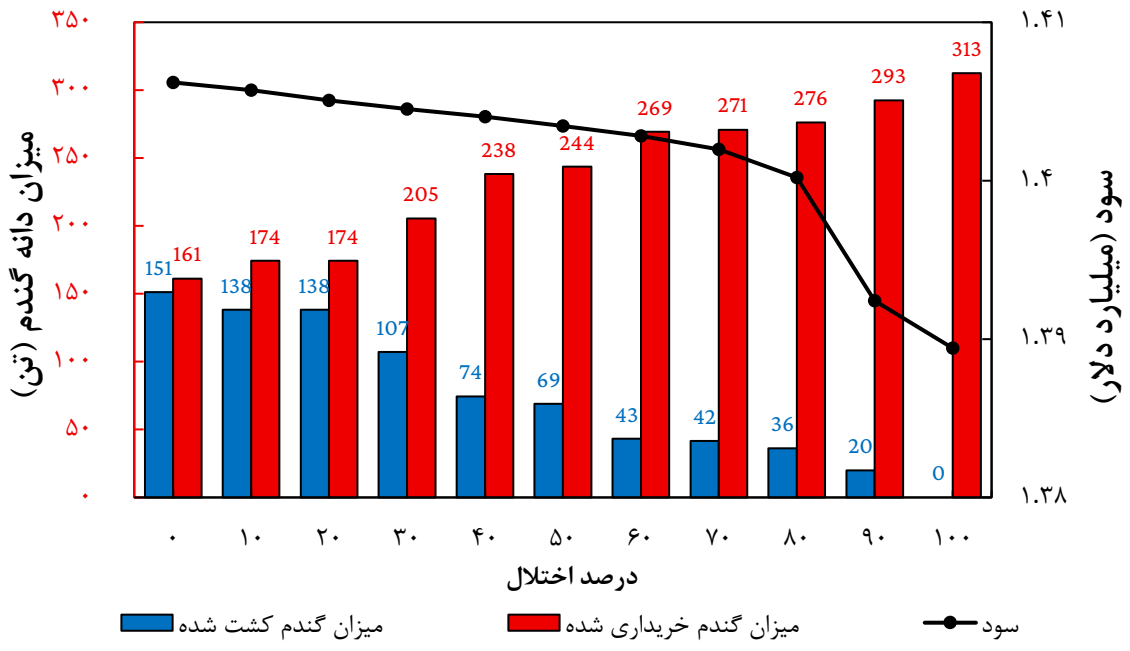
شکل ۳. سهم هزینه‌های عملیاتی و درآمد زنجیره تأمین.

Figure 3. Share of operating costs and supply chain revenue.



شکل ۴. تأثیر سناریوهای مختلف اختلال بر روی عملکرد زنجیره تأمین.

Figure 4. Impact of different disruption scenarios on supply chain performance.



شکل ۵. استراتژی‌های تأمین دانه گندم و سودآوری زنجیره تأمین تحت اختلال.

Figure 5. Wheat grain sourcing strategies and supply chain profitability under disruption.

با شدت‌یافتن اختلالات، میزان گندم قابل‌کشت کاهش می‌یابد و مدل برای جبران کمبود و حفظ تأمین، به استراتژی خرید از تأمین‌کنندگان متوسل می‌شود؛ زیرا در مدل، به‌خاطر نقش حیاتی گندم در امنیت غذایی، فرض فقدان عرضه کامل در نظر گرفته نشده است. اگرچه این رویکرد، استمرار عرضه را تضمین می‌کند، اما در سطوح شدید اختلال هزینه‌های اضافی خرید و حمل‌ونقل منجر به کاهش سود و تهدید جدی پایداری مالی می‌شود. بنابراین درحالی‌که استراتژی خرید گندم برای سطوح متعارف اختلال کارا است، مواجهه با اختلالات بحرانی مستلزم اتخاذ برنامه‌ریزی کلان و مدیریت جامع به‌منظور حفظ پایداری مالی و تضمین تأمین کالاهای اساسی است.

۵- نتیجه‌گیری

گندم به‌عنوان کالایی استراتژیک در تأمین امنیت غذایی جامعه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تقویت تاب‌آوری زنجیره تأمین آن در برابر اختلالات محیطی نظیر تغییرات آب‌وهوایی، تداوم عرضه و کاهش ریسک کمبود محصول را تضمین می‌کند. از سوی دیگر، به‌کارگیری اصول اقتصاد چرخشی، علاوه بر ارتقای کارایی عملیاتی، می‌تواند سودآوری کل زنجیره را افزایش دهد. در این راستا، در این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی تصادفی چنددوره‌ای و چندمحصولی برای طراحی زنجیره تأمین تاب‌آور گندم تحت ریسک‌های اختلالی ارائه شد. مدل پیشنهادی برای مقابله با پیامدهای ناشی از اختلالات آب‌وهوایی در بخش کشاورزی، از استراتژی خرید تکمیلی گندم با لحاظ تخفیف مقداری به‌عنوان یکی از سیاست‌های تاب‌آوری استفاده نمود. همچنین، به‌منظور تحقق اصول اقتصاد چرخشی، فروش محصولات جانبی مانند کاه، سبوس و دانه‌های آسیب‌دیده به صنایع وابسته نظیر خوراک دام و صنایع آرایشی و بهداشتی نیز در ساختار مدل لحاظ شده است. درنهایت، بینش‌های مدیریتی به‌صورت زیر خلاصه می‌گردد:

۱) اختلالات و نوسانات آب‌وهوایی، آسیب‌پذیری زنجیره تأمین گندم را افزایش داده و می‌توانند تداوم عملکرد عملیاتی و سودآوری مالی آن را تحت‌فشار قرار دهند. در چنین شرایطی، تنوع‌بخشی در تأمین‌کنندگان گندم به‌عنوان راهبردی مؤثر برای تقویت تاب‌آوری زنجیره تأمین مطرح می‌شود و امکان مدیریت بهینه اختلالات و کاهش ریسک ناشی از اتکا به منابع محدود را فراهم می‌کند

۲) یافته‌ها نشان می‌دهد که تمرکز صرف بر یک سناریوی مشخص از اختلال می‌تواند منجر به

اتخاذ تصمیم‌هایی غیرقابل‌اتکا شود و مدیریت زنجیره تأمین را در معرض ریسک تصمیم‌های بیش‌ازحد خوش‌بینانه یا محافظه‌کارانه قرار دهد. در مقابل، مدل تصادفی با لحاظ کردن همه سناریوهای اختلال و احتمال وقوع آن‌ها، امکان تدوین سیاست‌های متعادل‌تر و مقاوم‌تر را فراهم می‌کند.

۳) نتایج نشان می‌دهد که محصولات جانبی، ازجمله سبوس، کاه و دانه‌های آسیب‌دیده، نقش قابل‌توجهی در سودآوری زنجیره تأمین دارند. ازاین‌رو، به‌کارگیری رویکرد اقتصاد چرخشی و برنامه‌ریزی هدفمند برای بهره‌برداری از جریان‌های فرعی تولید، نه‌تنها سودآوری را افزایش می‌دهد، بلکه اتلاف منابع را کاهش داده و کارایی کل زنجیره را بهبود می‌بخشد.

۴) با توجه به سهم قابل‌توجه هزینه‌های تولید و حمل‌ونقل مواد اولیه و محصولات، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید در کارخانه‌های فراوری همراه با برنامه‌ریزی لجستیکی دقیق و هماهنگ، نقشی کلیدی در افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و ارتقای کارایی کل زنجیره تأمین ایفا می‌کند.

برای تکمیل نتایج این پژوهش در راستای تقویت تاب‌آوری و پایداری زنجیره تأمین گندم، پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

۱) توجه به ملاحظات پایداری از طریق مدیریت مصرف کودهای شیمیایی به‌منظور ارتقای سلامت جامعه و استفاده اثربخش از منابع آب

۲) به‌کارگیری رویکرد ترکیبی مبتنی بر بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری جهت ارزیابی و رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان

۳) درنظرگرفتن تصمیمات عملیاتی نظیر مسیریابی و زمان‌بندی در مدل پیشنهادی به‌منظور مدیریت فرآیندهای لجستیکی

مشارکت‌های نویسندگان

تمامی نویسندگان سهم و قدر یکسانی در نگارش این مقاله داشته‌اند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری و همچنین داوران محترم که کیفیت این مقاله را افزایش دادند، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

Achmad, A. L. H., Chaerani, D., & Perdana, T. (2021). Designing a food supply chain strategy during COVID-19 pandemic using an integrated Agent-Based Modelling and Robust Optimization. *Heliyon*, *7*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08448

Agrawal, M., & Jain, J. K. (2024). Seed to Sustenance: A Comprehensive Review of Wheat's Agricultural Value Chain. *Commerce Research Review*, *1*(2), 84-93. https://doi.org/10.21844/crr.v102.1116

Bartholomeu, D. B., da Rocha, F. V., Péra, T. G., & Vicente, J. (2016). Postharvest losses in the wheat logistics chain: A Brazilian case study. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, *6*(5), 321-329. https://doi.org/10.17265/2161-6264/2016.05.005

Danciu, C. A., Tulbure, A., Stanciu, M. A., Antonie, I., Capatana, C., Zerbeș, M. V., ... & Rada, E. C. (2023). Overview of the sustainable valorization of using waste and by-products in grain processing. *Foods*, *12*(20), 3770. https://doi.org/10.3390/foods12203770

Daryanto, A. W., Prabowo, H., Hamsal, M., & Elidjen, E. (2025). Supply Chain Resilience Strategy in Dynamic Environmental Change: a Systematic Literature Review. *Journal of Lifestyle and SDGs Review*, *5*(3), e03846. https://doi.org/10.47172/2965-730x.sdgsreview.v5.n03.pe03846

Firouzi, M., Aghajani, H., Mohammadzadeh, P., & Fatehifar, E. (2025). Design and Optimization of a Productivity System in a Brine Purification Unit of a Chlor-Alkali Complex Using the Circular Economy Approach and Material Flow Cost Accounting Method. *System Engineering and Productivity*.

Annals of Operations Research, *295*(1), 257–284. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03664-y

Naderi, B., Govindan, K., & Soleimani, H. (2020). A Benders decomposition approach for a real case supply chain network design with capacity acquisition and transporter planning: wheat distribution network. *Annals of Operations Research*, *291*(1–2), 685–705. https://doi.org/10.1007/s10479-019-03137-x

Ostovari, A., Bozorgi Amiri, A., Yousefi-Babadi, A., & Benyoucef, L. (2025). Multi-configuration modular capacity wheat supply chain network design under uncertainty: robust optimisation-based approach. *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, *12*(1). https://doi.org/10.1080/23302674.2025.2472965

Pourmohammadi, F., Teimoury, E., & Gholamian, M. R. (2020). A scenario-based stochastic programming approach for designing and planning wheat supply chain (A case study). *Decision Science Letters*, *9*(4), 537–546. https://doi.org/10.5267/j.dsl.2020.8.004

Rahbari, M., Arshadi Khamseh, A., & Sadati-Keneti, Y. (2024). Resilience strategies in coping to disruptions of wheat supply chain caused by the Russia–Ukraine war crisis: case study from an emerging economy. *Kybernetes*, *53*(10), 2984–3018. https://doi.org/10.1108/K-12-2022-1728

Reddy, V. R., Singh, S. K., & Anbumozhi, V. (2016). *Food Supply Chain Disruption due to Natural Disasters: Entities, Risks, and Strategies for Resilience*.

Sharifi, E., Amin, S. H., & Fang, L. (2024). Designing a sustainable, resilient, and responsive wheat supply chain under mixed uncertainty: A multi-objective approach. *Journal of Cleaner Production*, *434*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140076

Shiferaw, B., Smale, M., Braun, H. J., Duveiller, E., Reynolds, M., & Muricho, G. (2013). Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security. *Food Security*, *5*(3), 291–317. https://doi.org/10.1007/s12571-013-0263-y

Tufail, T., Ain, H. B. U., Saeed, F., Nasir, M., Basharat, S., Mahwish, ... & Aadil, R. M. (2022). A retrospective on the innovative sustainable valorization of cereal bran in the context of circular bioeconomy innovations. *Sustainability*, *14*(21), 14597. https://doi.org/10.3390/su142114597

Xhabiri, G., Sinani, V., & Hoxha, I. (2014). The Impact of the Wheat Bran on the Quality of the https://doi.org/10.22034/sep.2025.2070392.1389

Fu, P., & Zhang, Y. (2025). Enhancing resource efficiency and value addition in food and agricultural by-product processing: a green recycling approach. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *9*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1589807

Gavalas, D. (2025). Supply chain resilience in the face of uncertainty: a study of wheat trade and supply chain optimization. *Acta Logistica*, *12*(1), 103–115. https://doi.org/10.22306/al.v12i1.593

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. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.038

Giordano, L., & Mariani, G. (2024). strawplast: pioneering eco-packaging solutions for a sustainable future. *The American Journal of Agriculture and Biomedical Engineering*, *6*(04), 06-10. https://doi.org/10.37547/tajabe/Volume06Issue04-02

Hellegers, P. (2022). Food security vulnerability due to trade dependencies on Russia and Ukraine. *Food Security*, *14*(6), 1503–1510. https://doi.org/10.1007/s12571-022-01306-8

Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Saadi, F. A. (2020). A novel hybrid approach for synchronized development of sustainability and resiliency in the wheat network. *Computers and Electronics in Agriculture*, *168*. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105095

Kazemi, M. J., Paydar, M. M., & Safaei, A. S. (2023). Designing a bi-objective rice supply chain considering environmental impacts under uncertainty. *Scientia Iranica*, *30*(1), 336–355. https://doi.org/10.24200/sci.2021.55935.4481

Li, J., Fang, Y., & Yang, J. (2022). Minimizing carbon emissions of the rice supply chain considering the size of deep tillage lands. *Sustainable Production and Consumption*, *29*, 744–760. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.022

Mirzaei, M. G., Goodarzian, F., Maddah, S., Abraham, A., & Gabralla, L. A. (2022). Investigating a Dual-Channel Network in a Sustainable Closed-Loop Supply Chain Considering Energy Sources and Consumption Tax. *Sensors*, *22*(9). https://doi.org/10.3390/s22093547

Mogale, D. G., Kumar, S. K., & Tiwari, M. K. (2020). Green food supply chain design considering risk and post-harvest losses: a case study.

Biscuits and Their Nutritional Value. *Anglisticum Journal (IJLLIS)*, *3*(3).

Yousefi-Babadi, A., Bozorgi-Amiri, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Govindan, K. (2023). Redesign of the sustainable wheat-flour-bread supply chain network under uncertainty: An improved robust optimization. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *176*. https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103215

Zhang, Z., Abdullah, M. J., Xu, G., Matsubae, K., & Zeng, X. (2023). Countries' vulnerability to food supply disruptions caused by the Russia–Ukraine war from a trade dependency perspective. *Scientific Reports*, *13*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-023-43883-4

Zheng, X. (2022). The Coordination of Multi-Stage Discounts in a Dual Channel Fresh Agricultural Produce Supply Chain: Minimizing the Loss of Quantity and Quality. *Sustainability (Switzerland)*, *14(4)*. https://doi.org/10.3390/su14042174