



Optimization of Integrated Decisions in Supply, Production, and Distribution in the Broiler Chicken Supply Chain Considering Different Breeds of Chickens and their Casualty

Zahrasadat Tabatabaei 

Bachelor of Science in Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, University of Kashan,
Iran

Mohammad Taghi Rezvan  *

Assistant Professor, Department of Industrial
Engineering, Faculty of Engineering, University
of Kashan, Kashan, Iran

Saeed Dehnavi 

Assistant Professor, Department of Industrial
Engineering, Faculty of Engineering, University
of Kashan, Kashan, Iran

Abstract

The broiler chicken industry plays a crucial role in food security and employment generation; however, it faces challenges such as increasing demand, mortality losses, and appropriate breed selection. This study aims to develop an integrated mathematical model for analyzing and optimizing the chicken meat supply chain by simultaneously addressing breed selection, production planning, logistics management, and loss reduction. The proposed model is formulated as a mixed-integer linear programming problem that maximizes the total profit of the supply chain by considering revenues from chicken meat and poultry manure, as well as all procurement, production, and distribution costs. The model includes constraints related to supply availability, production and distribution capacities, demand satisfaction, and the limitation of raising only one breed per farm. The model is solved using GAMS based on data obtained from reliable sources. The results demonstrate effective resource allocation, optimal breed selection, and improved logistics network design. Sensitivity analysis further confirms the robustness and reliability of the proposed model.

* Corresponding Author: rezvan@kashanu.ac.ir

How to Cite: Tabatabaei, Z., Rezvan, M. T., Dehnavi S. (2026). Optimization of Integrated Decisions in Supply, Production, and Distribution in the Broiler Chicken Supply Chain Considering Different Breeds of Chickens and their Casualty, *Industrial Management Studies*, 23(79), 125-164.

Introduction

The broiler industry plays a crucial role in ensuring food security and creating employment. However, this industry faces several structural challenges, including demand fluctuations, rising input costs, inefficient loss management, and suboptimal breed selection. Previous studies have primarily focused on optimizing individual segments such as production, logistics, or financial performance, while limited attention has been given to integrated models that simultaneously address strategic and tactical decisions across the entire supply chain. This research gap highlights the need for a comprehensive decision-making framework capable of capturing interactions among different levels of the broiler supply chain. Accordingly, the main objective of this study is to design and present an integrated mathematical model that simultaneously optimizes breed selection, production planning, logistics management, and loss reduction within a four-tier supply chain.

Research Background

In recent years, extensive research has been conducted on broiler supply chain optimization. Some studies have focused on allocation and scheduling problems using mixed-integer linear programming (MILP) models, while others have examined the impacts of business policies or uncertainty management practices. Additional research has explored the integration of production and financial decisions, as well as supply chain modeling during disruptive events such as the COVID-19 pandemic. Despite these efforts, a comprehensive review of the literature reveals that most existing studies address the problem in an isolated and one-dimensional manner, often neglecting optimal breed selection and mortality management. In some cases, simplifying assumptions—such as allowing the simultaneous breeding of multiple breeds—have been adopted, which do not reflect operational realities. This study seeks to bridge this gap by explicitly integrating breed selection and loss management into a unified optimization framework.

Method

This study proposes an integrated mathematical model for optimizing the chicken meat supply chain. The system under consideration consists of a four-level supply chain including suppliers (day-old chicks, feed, and vaccines), breeding farms, slaughterhouses, and distribution centers (markets). The proposed model is formulated as a mixed-integer linear programming (MILP) problem with the objective of maximizing total network profit by accounting for revenues from chicken meat and poultry manure sales, as well as all supply, production, and distribution costs. Biological characteristics of different chicken breeds—such as feed conversion ratio, rearing period, mortality rate, and final weight—are

incorporated as model parameters. The constraints include supply, production, and distribution capacity limitations, demand satisfaction requirements, and the restriction of raising only one breed per farm. The study is conducted in two main stages: model formulation and model implementation. In the first stage, the mathematical model is developed by defining key decision variables, including breed selection, supplier assignment, capacity allocation, and production and distribution planning. In the second stage, the model is implemented and solved using GAMS software with the CPLEX solver. The required data are obtained from a combination of industry reports, expert opinions, and market data. A realistic numerical example involving two chick suppliers, three feed suppliers, three vaccine suppliers, four farms, three slaughterhouses, and six distribution centers is designed to validate the model. After obtaining the optimal solution, a comprehensive sensitivity analysis is performed on key parameters such as meat selling price, input costs, mortality rates, and transportation costs to assess the stability and reliability of the model under varying market conditions.

Discussion and Results

Solving the model using realistic data demonstrates its capability to generate operationally optimal solutions. The key findings are summarized as follows:

- Optimal breed selection: The final solution selects only the Ross and Kap breeds, while the Aryan breed is excluded. This outcome reflects the superior performance of these breeds in terms of biological parameters (e.g., mortality rate and feed conversion ratio) and their compatibility with the cost and capacity structure of the network.
- Resource allocation: Among the four hypothetical farms, only two are optimally activated. This result is attributed to their comparative advantages in terms of proximity to slaughterhouses, effective capacity utilization, and reduced logistics costs.
- Sensitivity analysis: The sensitivity analysis confirms the rational and stable behavior of the model. The selling price of chicken meat and the purchase price of chicks are identified as the most influential parameters affecting profit. Additionally, the results indicate that increases in mortality rates have a nonlinear and substantial negative impact on profitability, underscoring the importance of investing in effective loss reduction strategies.
- Optimal breed combination: In the final solution, only the Ross and Kap breeds were selected and the Aryan breed was eliminated. This selection indicated the superiority of these two breeds in terms of the combination of technical parameters (such as mortality rate and conversion factor) and coordination with the cost and capacity structure of the network.
- Resource allocation: Out of the four hypothetical farms, only two farms

were optimally activated, the reason for which can be found in the comparative advantage of these farms in terms of proximity to slaughterhouses, effective capacity and reduced logistics costs.

- Sensitivity analysis: The results of the sensitivity analysis confirmed the rational and stable behavior of the model. Specifically, the selling price of meat and the price of chicken were identified as the most influential parameters on increasing and decreasing profits, respectively. The model also showed that increasing casualty rates have a nonlinear and significant effect on decreasing profits, which highlights the need to invest in casualty reduction strategies.

Conclusion

This study developed an integrated modeling framework for optimizing the broiler supply chain by endogenously incorporating breed selection and mortality management into the decision-making process. The results demonstrate that simultaneously considering biological, economic, and logistical factors enhances supply chain integration and performance. The proposed model serves as an effective decision-support tool for poultry industry managers and policymakers, enabling optimal resource allocation and strategic planning to maximize profitability and efficiency in competitive environments. The primary limitation of the study lies in the difficulty of accessing accurate and confidential data from production units, which was addressed through the use of composite and approximate data. Therefore, the results should be interpreted with this limitation in mind. The model can also be applied as an analytical tool to estimate equilibrium chicken meat prices under scenarios involving changes or removal of government support policies, such as preferential exchange rates for livestock inputs. By evaluating alternative input pricing scenarios, the model helps identify prices that maintain producer profitability without imposing excessive economic pressure on consumers. At a macro level, the application of such models can assist policymakers in designing targeted support strategies to improve productivity, enhance profitability, and promote sustainability in the broiler supply chain under volatile market conditions. Future research may extend the model by incorporating uncertainty-based approaches, such as stochastic or fuzzy programming, to better address demand and price fluctuations. Additionally, developing a multi-objective version of the model that accounts for environmental (e.g., carbon footprint reduction) and social sustainability criteria represents a promising direction for further research.

Keywords: Broiler Chicken Supply Chain, Mixed-integer Programming, Breeding Selection, Mortality Management, Integrated Decisions.



بهینه‌سازی تصمیمات یکپارچه تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین مرغ گوشتی با در نظر گرفتن انواع نژادهای مرغ و تلفات

کارشناسی مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان،

کاشان، ایران

زهرا سادات طباطبائی 

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

محمد تقی رضوان  *

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

سعید دهنوی 

چکیده

صنعت پرورش مرغ گوشتی، نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی و اشتغال‌زایی ایفا می‌کند؛ اما این صنعت با چالش‌هایی همچون برآورده‌سازی مناسب تقاضا، مدیریت تلفات و انتخاب بهینه نژاد روبرو است. هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک مدل ریاضی یکپارچه برای تحلیل یک زنجیره تأمین گوشت مرغ است که به‌طور هم‌زمان تصمیمات انتخاب نژاد، برنامه‌ریزی تولید، مدیریت لجستیک و کاهش تلفات را بهینه‌سازی می‌کند. مدل ارائه‌شده از نوع برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط بوده و هدف آن بیشینه‌سازی سود کل شبکه با در نظر گرفتن درآمدهای حاصل از فروش گوشت و کود مرغی و نیز کلبه هزینه‌های تأمین، تولید و توزیع است. محدودیت‌های مختلفی همچون ظرفیت تأمین، تولید و توزیع در سطوح مختلف زنجیره تأمین، تقاضای گوشت و عدم پرورش هم‌زمان بیش از یک نژاد، در مدل در نظر گرفته شده است. مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز و داده‌های گردآوری‌شده از منابع معتبر حل شد. مهم‌ترین محدودیت پژوهش، دشواری دسترسی به داده‌های کاملاً دقیق به دلیل محرمانه بودن اطلاعات مالی واحدهای تولیدی بود. نتایج حاصل از حل مدل، کارایی آن را در تخصیص بهینه منابع، انتخاب ترکیب نژادی (نژادهای رأس و کاپ) و طراحی شبکه لجستیک بود. همچنین، تحلیل حساسیت انجام‌شده بر روی پارامترهای کلیدی، پایداری و قابلیت اطمینان مدل را تأیید کرد. این پژوهش با ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری یکپارچه، ابزاری کارآمد در اختیار مدیران و سیاست‌گذاران صنعت طیور قرار می‌دهد تا با اتخاذ تصمیم‌های بهینه، بهره‌وری و سودآوری خود را در یک محیط رقابتی به حداکثر برسانند.

کلیدواژه‌ها زنجیره تأمین مرغ گوشتی، مدل برنامه‌ریزی مختلط با اعداد صحیح، انتخاب نژاد، مدیریت تلفات، یکپارچگی.

مقدمه

صنعت پرورش مرغ گوشتی نقشی حیاتی در تأمین امنیت غذایی و پروتئین موردنیاز جامعه ایفا می‌کند. این صنعت با چالش‌های متعددی از جمله نوسانات تقاضا، نوسانات قیمت نهاده‌ها (Hamilton et al., 2020)، مدیریت تلفات، انتخاب نژاد بهینه و هماهنگی ناکافی بین حلقه‌های مختلف زنجیره تأمین (Gafi & Javadian, 2018) مواجه است. پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر بهینه‌سازی جزیره‌ای بخش‌هایی مانند تولید یا توزیع متمرکز بوده (Unveren & Luckstead, 2020) و از در نظر گیری هم‌زمان کلیه متغیرهای مؤثر و وابسته به یکدیگر غفلت ورزیده‌اند. این شکاف پژوهشی، لزوم توسعه یک مدل تصمیم‌گیری یکپارچه را که قادر به بهینه‌سازی هم‌زمان تمامی مراحل از تأمین نهاده تا فروش نهایی باشد، بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد.

اهمیت و ضرورت این پژوهش در چند محور اصلی قابل تبیین است: نخست، فقدان یک مدل جامع که بتواند به‌صورت هماهنگ به مسائل کلیدی از جمله انتخاب نژاد و مدیریت لجستیک پردازد، موجب شده واحدهای تولیدی ناچار به تصمیم‌گیری بر اساس تجربه شخصی شوند که پیامد آن کاهش بهره‌وری و افزایش هزینه‌هاست. دوم، وابستگی شدید به نهاده‌های وارداتی، این صنعت را در معرض نوسانات بازار جهانی قرار داده است (Juwitaa et al., 2024). سوم، انتخاب نژاد مناسب که تأثیر مستقیمی بر عملکرد اقتصادی دارد (Tavárez & Solis de los Santos, 2020)، اغلب به‌صورت علمی و مبتنی بر داده‌های جامع انجام نمی‌گیرد. در نهایت، نادیده گرفتن ارزش اقتصادی محصولات جنبی مانند کود مرغی، سبب از دست رفتن یک منبع درآمدی پایدار (Muduli et al., 2019) و افزایش بار آلودگی زیست‌محیطی (Petersen et al., 2013) شده است.

هدف اصلی این پژوهش توسعه یک مدل ریاضی یکپارچه برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین مرغ گوشتی که به‌طور هم‌زمان تصمیم‌های راهبردی و تاکتیکی شامل انتخاب نژاد، مدیریت تلفات، برنامه‌ریزی تولید و توزیع را با در نظر گیری ویژگی‌های زیستی نژادها در بر گیرد و همچنین سود کل زنجیره تأمین مرغ گوشتی از طریق لحاظ کردن جامع تمامی درآمدها و هزینه‌ها بیشینه کند و بر این اساس می‌توان این دو سؤال را مطرح کرد. ۱) چگونه می‌توان یک مدل ریاضی یکپارچه برای زنجیره تأمین مرغ گوشتی طراحی کرد که به‌صورت هم‌زمان انتخاب نژاد با ویژگی‌هایی نظیر ضریب تبدیل خوراک، دوره پرورش و نرخ تلفات، مدیریت تلفات و برنامه‌ریزی تولید و توزیع را در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ کند؟ ۲)

تأثیر ادغام هم‌زمان تصمیم‌های زیستی، تولیدی و لجستیکی در قالب یک مدل بهینه‌سازی بر سودآوری و کارایی کل زنجیره تأمین مرغ گوشتی چگونه است؟

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی در زمینه بهینه‌سازی زنجیره تأمین مرغ گوشتی انجام شده است که از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی برای بهبود تصمیم‌گیری‌های عملیاتی و تاکتیکی استفاده کرده‌اند. Brevik et al. (2020) یک مدل برنامه‌ریزی مختلط با اعداد صحیح^۱ (MIP) برای حل مسئله تعیین اندازه گله، تخصیص و زمان‌بندی مرغ‌ها^۲ (CFSASP) برای یکپارچگی تصمیمات مربوط به جوجه‌ریزی، تخصیص گله‌ها به مزارع و زمان‌بندی جمع‌آوری مرغ‌ها برای کشتار ارائه کردند. این مدل محدودیت‌های سنی مرغ‌ها، ظرفیت مزارع و قوانین حمل‌ونقل را در نظر گرفته است. نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند هزینه‌ها را تا ۲۴ درصد کاهش دهد. برای حل مدل در زمان معقول، از دو روش افق چرخان استفاده شد که نتایج آن‌ها از نظر کیفیت و کارایی تأیید شد. (Unveren & Luckstead (2020 اثرات تغییرات سیاست‌های تجاری بر زنجیره تأمین مرغ گوشتی ایالات متحده با استفاده از یک مدل تعادل جزئی مبتنی بر زنجیره تأمین بررسی کردند که شامل هشت بخش اصلی از تولید ذرت و کنجاله سویا تا فرآوری محصولات با ارزش افزوده و تجارت بین‌المللی است. ویژگی بارز این مدل، در نظرگیری پیوندهای عمودی و افقی بین بخش‌های مختلف زنجیره، مدل‌سازی قیمت‌های انتقالی درون شرکتی و محاسبه قیمت‌های تعادلی به صورت درون‌زا است. نتایج نشان داد که کاهش قیمت ذرت و کنجاله سویا ناشی از تعرفه‌های چین، منجر به کاهش هزینه‌های خوراک، افزایش تولید در تمامی بخش‌ها و کاهش قیمت برای مصرف‌کنندگان داخلی و خارجی شد. (Satır & Yıldırım (2020 مدلی با افق برنامه‌ریزی سالانه برای یکپارچه‌سازی تصمیمات تولید و مالی در یک شرکت با اندازه متوسط طیور ارائه کردند. ویژگی بارز این مدل، در نظرگیری تمامی بخش‌های زنجیره شامل کارخانه خوراک، مرغداری مادر، واحد جوجه‌کشی، مرغداری گوشتی، کشتارگاه و مراکز توزیع و همچنین روابط متقابل بین آن‌ها است که جنبه‌های مالی از جمله جریان نقدی، هزینه‌های خرید، تولید و نیروی کار را پوشش می‌دهد. نتایج نشان داد که تعداد جوجه خریداری شده در بازه‌های زمانی خاص، متغیر کلیدی و مقاوم در برابر سناریوهای مختلف

¹ Mixed integer programming

² Chicken flock sizing, allocation and scheduling problem

تقاضا است. همچنین، افزایش ظرفیت مرغداری مادر می‌تواند سودآوری را بهبود بخشد. Tahraoui et al. (2020) یک مدل MIP برای هماهنگی زمان‌بندی تولید در مزارع پرورش مرغ ارائه کردند. این مدل، تصمیمات مربوط به راه‌اندازی دوره‌های پرورش، تخصیص ظرفیت مزارع و حمل‌ونقل محصول به کشتارگاه را یکپارچه می‌کند؛ درحالی‌که محدودیت‌های دوره رشد مرغ‌ها، ظرفیت مزارع و تقاضای متغیر کشتارگاه در نظر می‌گیرد. نتایج نشان داد که مدل می‌تواند هزینه‌های کل زنجیره تأمین را کاهش و ثبات قیمت‌گذاری محصول را بهبود بخشد. برای حل مدل از نرم‌افزار CPLEX استفاده شده و سناریوهای مختلفی را برای بررسی حساسیت مدل ارائه شده است. (Yazdekhesti et al. (2021) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای ارائه کردند. این مدل، اثرات همه‌گیری را بر تولید، توزیع و تقاضا با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف شدت بیماری بررسی می‌کند. ویژگی‌های کلیدی این مدل شامل سیاست‌های ذخیره‌سازی محصولات در دوره پیش از همه‌گیری، استفاده از شبکه‌های چندحالتی حمل‌ونقل (زمینی، ریلی و دریایی) و امکان ارتباط مستقیم بین تولیدکنندگان و مشتریان است. برای حل مدل از یک روش ترکیبی مبتنی بر الگوریتم شاخه و کران و برنامه‌ریزی پویا استفاده شده که عملکرد بهتری نسبت به روش‌های متداول داشته است. نتایج نشان داد که هر دو مدل (با و بدون مسیر مستقیم) می‌تواند هزینه‌های زنجیره تأمین را کاهش دهد. (Kler et al. (2022) از یک مدل ترکیبی مبتنی بر اینترنت اشیا و تحلیل داده‌ها برای ردیابی و نظارت بر عرضه و تقاضا استفاده کردند. مدل بر کاهش ردپای کربن از طریق بهینه‌سازی شبکه حمل‌ونقل و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی موجودی متمرکز بوده است. نتایج نشان داد که استفاده از این مدل کارایی سیستم را افزایش و هم‌زمان میزان ضایعات و آلاینده‌های محیطی را کاهش می‌دهد. (Solano-Blanco et al. (2023) از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۱ (MILP) برای یکپارچه‌سازی تصمیمات تولید در مزرعه، کشتارگاه و عمده‌فروشی با در نظر گرفتن محدودیت‌های بهداشتی، ظرفیت‌های تولید و انبار و تقاضای مشتریان استفاده کردند. از یک روش افق چرخان برای مقابله با اثرات کوتاه‌نگری مدل‌های زمان‌محور استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از مدل سود شرکت را بین ۷ تا ۵۷ درصد افزایش داده و هزینه‌های نگهداری موجودی را تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. (Naprom et al. (2018) از ترکیب شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای تعیین میانگین وزن بهینه مرغ و مقدار تأمین آن با در نظر گرفتن توزیع وزن مرغ‌ها، تنوع محصولات و عدم قطعیت تقاضا استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از مدل می‌تواند سودآوری را با انتخاب میانگین وزن ۱,۹ کیلوگرم و

1 Mixed-integer linear programming

مقدار تأمین یک میلیون قطعه مرغ بیشینه کند. (Solano-Blanco et al. (2023) یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای بهینه‌سازی تصمیمات مربوط به اندازه‌گیری دسته‌ها و مدیریت موجودی مرغ‌ها با عدم قطعیت در رشد مرغ‌ها را از طریق سناریوهای مختلف ارائه کردند. مدل در ارائه سیاست‌های اصلاح سفارش بر اساس سناریوهای رشد مرغ‌ها قابلیت خوبی دارد. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد. همچنین از یک مدل MILP برای تخصیص بهینه مرغ‌ها به مزارع استفاده کردند که بهبود کارایی سیستم را به همراه داشت. (Dorcheh & Rahbari (2023) به بررسی یک مدل دو فاز برای زنجیره تأمین گوشت مرغ با استفاده از داده‌های واقعی از سازمان میادین میوه و تره‌بار تهران پرداختند. مدل MILP برای بهینه‌سازی ظرفیت کشتارگاه‌ها، مسیرهای حمل‌ونقل و کاهش تعداد وسایل نقلیه استفاده شد که در آن هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای، ناوگان ناهمگن وسایل نقلیه و محدودیت‌های زمانی برای حفظ کیفیت محصولات فاسدشدنی در نظر گرفته شد. مدل، مسیرها و زمان‌بندی حمل را به گونه‌ای بهینه می‌کند که گوشت قبل از فاسدشدن به مصرف‌کننده برسد. نتایج حل مدل با نرم‌افزار گمز نشان داد که هزینه‌های حمل‌ونقل در فاز اول به‌طور میانگین ۹۰٫۸ درصد و در فاز دوم برای سه روز متوالی به ترتیب ۲۹٫۵۶، ۲۷٫۹۱ و ۳۲٫۵۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، هزینه‌های ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز بین ۱۷٫۲۹ تا ۲۳٫۰۸ درصد کاهش داده شد. (Paredes-Rodríguez et al. (2024) یک مدل برنامه‌ریزی خطی سه سطحی شامل جوجه‌کشی، مزارع پرورش مرغ و کشتارگاه‌ها برای طراحی زنجیره تأمین مرغ گوشتی در شهر بوگا، کلمبیا ارائه کردند. هدف اصلی مدل، کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل با تعیین تعداد سفرها و جریان بهینه محصول بین ذی‌نفعان در یک دوره ۱۲ ماهه بود. نتایج نشان داد که چگونه تخصیص بهینه جریان‌ها و استفاده حداکثری از ظرفیت‌های موجود می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های لجستیکی شود. (Juwitaa et al. (2024) از یک مدل MILP و برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای برای مدیریت عدم قطعیت در رشد مرغ‌ها استفاده کردند. این مدل تصمیمات مربوط به اندازه‌گیری و تخصیص گله‌ها را با در نظر گرفتن سن مرغ‌ها، مصرف خوراک و تقاضای بازار بهینه‌سازی می‌کند. نتایج نشان داد که مدل می‌تواند هزینه‌های تولید و نگهداری موجودی را کاهش دهد. همچنین از روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف رشد استفاده شد که انعطاف‌پذیری مدل را در مواجهه با شرایط غیرقطعی افزایش دهد. (Okechukwu et al. (2024) یک مدل MILP برای بهینه‌سازی تولید و موجودی در یک مزرعه با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند ظرفیت تولید، دسترسی

به خوراک، ساعت‌های کاری و هزینه‌های حمل‌ونقل ارائه کردند. نتایج نشان داد که مدل می‌تواند سود را بیشینه و هم‌زمان ضایعات را کمینه کند. همچنین تأثیر نوسانات تقاضا و تغییرات ظرفیت تولید بررسی شد که نتایج، بر کارایی مدل در شرایط مختلف تأکید داشت. (Tahraoui et al. (2024) مدل برنامه‌ریزی خطی برای حل مسئله عدم تعادل بین عرضه و تقاضا در شبکه تولید مرغ گوشتی شهر تلمسان الجزایر با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت مزارع، دوره‌های تولید و افق‌های زمانی چندگانه ارائه کردند. نتایج نشان داد که مدل سود مزارع را افزایش داده و قیمت فروش را در بازه‌ای پایدار نگه می‌دارد. همچنین در این مطالعه، دو پیکربندی اقتصادی و مشارکتی مقایسه شد که در پیکربندی مشارکتی، کیفیت خدمات با توزیع عادلانه تولید بین مزارع بهبود یافت. (Mostaghim et al. (2024) از یک مدل MILP دوهدفه، چندمحصولی و چنددوره‌ای یک مطالعه موردی در صنعت مرغ گوشتی ایران بهره گرفتند. ویژگی بارز مدل، تلفیق معیارهای پایداری (اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی) با راهکارهای تاب‌آوری همچون تأمین چندمنبعی و استفاده از مراکز توزیع پشتیبان است. مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شد. نتایج نشان داد که اعمال این راهبردها نه تنها سود کل زنجیره تأمین را افزایش می‌دهد، بلکه انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از حمل‌ونقل را نیز کاهش می‌دهد. همچنین تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی، تعامل و تبادل میان اهداف اقتصادی و محیط‌زیستی را به‌وضوح نشان داد. (Arabsheybani et al. (2024) یک مدل ریاضی چندهدفه جامع برای یکپارچه‌سازی زنجیره تأمین مرغ و محصولات فاسدشدنی ارائه کردند. این مدل سه سطحی شامل مراکز پرورش، کشتارگاه‌ها و شعب فروش بوده و اهداف آن شامل بیشینه‌سازی سود، کمینه‌سازی هزینه‌های ذخیره‌سازی در زنجیره سرد و کمینه‌سازی ریسک سلامت محصولات است. این مدل به مفهوم پایداری و لحاظ کردن شرایط ویژه محصولات فاسدشدنی ازجمله محدودیت عمر مفید و حساسیت به دما توجه کرده است. نتایج نشان داد که این مدل نه تنها می‌تواند سود کل را به میزان قابل توجهی افزایش دهد، بلکه معیارهای محیط زیستی و سلامت محصول را نیز بهبود می‌بخشد. (Chaudhari et al. (2025) یک مدل مدیریت موجودی برای محصولات زنده و در حال رشد ارائه کردند. مدل یک زنجیره تأمین چهار لایه شامل مراحل پرورش، فرآوری، توزیع‌کننده و مشتری بوده که در آن محصولات زنده در طول چرخه رشد ممکن است تلف شوند و بخشی از محصولات فرآوری شده نیز کیفیت پایینی داشته باشند. نتایج نشان داد که با بهینه‌سازی تعداد محموله‌های باکیفیت و چرخه سفارش‌دهی مجدد، می‌توان هزینه کل زنجیره تأمین را کمینه کرده و نرخ بقای محصولات زنده و

استراتژی حمل و نقل بین پردازشگر و خریدار بر هزینه کل تأثیر قابل توجهی دارد. Setiawan et al. (2025) به مسئله زمان‌بندی بهینه برداشت در یک مزرعه پرورش مرغ گوشتی در قالب یک مدل MILP برای تعیین تعداد مرغ‌های قابل برداشت در روزهای مختلف پرداختند. هدف مدل بهینه‌سازی سود کل مزرعه با تعیین متغیر تعداد مرغ و لحاظ کردن پارامترهای عملیاتی همچون نوسانات قیمت بازار، هزینه خوراک، ظرفیت برداشت و تراکم مجاز در سالن پرورش بود. نتایج نشان داد که مدل سود مزرعه را در هر چرخه تولید افزایش داده و قیمت بازار و هزینه خوراک بیشترین تأثیر و تغییرات تقاضا و ظرفیت برداشت، کمترین تأثیر را بر سودآوری داشتند. رویکردهای عدم قطعیت‌محور همانند برنامه‌ریزی تصادفی و برنامه‌ریزی فازی برای تقاضا و نرخ تلفات براساس مطالعات رویکردهای حسینی دهشیری و همکاران (۱۴۰۱) و Dehshiri et al. (2022) می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت تعمیم نتایج کمک کند.

مطالعات مرور شده در قالب جدول ۱، خلاصه‌شده نمایش داده شده‌اند. در حوزه زنجیره تأمین ماکیان، اغلب پژوهش‌های پیشین به صورت جزیره‌ای و تک‌بعدی به بهینه‌سازی بخش‌های مجزایی مانند تولید، توزیع و یا حمل و نقل پرداخته‌اند و کمتر به مدل‌سازی یکپارچه تمامی سطوح زنجیره تأمین از تأمین‌کنندگان نهاده و جوجه تا مزارع پرورش، کشتارگاه‌ها و مراکز توزیع نهایی توجه شده است. علاوه بر این، مسئله حیاتی انتخاب بهینه نژاد به عنوان یک عامل مؤثر نادیده گرفته شده یا با فرض‌های ساده‌کننده‌ای مانند امکان پرورش هم‌زمان چند نژاد در یک واحد از واقعیت فاصله داشته است؛ بنابراین می‌توان گفت نوآوری‌های این پژوهش عبارت‌اند از:

- ادغام انتخاب نژاد مرغ گوشتی به عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری کلیدی در مدل بهینه‌سازی زنجیره تأمین که در مطالعات پیشین مورد توجه قرار نگرفته است.
- لحاظ کردن هم‌زمان ویژگی‌های زیستی نژادها (ضریب تبدیل خوراک، دوره پرورش و نرخ تلفات) در کنار تصمیم‌های لجستیکی و تولیدی
- مدل‌سازی یکپارچه مدیریت تلفات به عنوان بخشی از فرآیند بهینه‌سازی سود، نه صرفاً یک پارامتر ثابت

- ترکیب تصمیم‌های راهبردی و تاکتیکی زنجیره تأمین در یک مدل ریاضی واحد
- ارائه مدلی سودمحور که تمامی جریان‌های درآمدی و هزینه‌ای زنجیره تأمین مرغ گوشتی را به صورت جامع در نظر می‌گیرد.

جدول ۱: مروری بر مطالعات پیشین پژوهش

نوع مطالعه		هدف بهینه‌سازی				فضای مدل‌سازی			نوع متغیرها			بازار		کشتار گاه		مزارع						تأمین‌کننده		تابع هدف				نام پژوهشگر (سال انتشار)		
																						سایر		جوجه		تعداد			نوع	
مثال عددی	مطالعه موردی	مکان‌یابی	مسیریابی	تخصیص	فازی	احتمالی	قطعی	عدد صحیح	باینری	پیوسته	هزینه حمل و نقل به بازار	تفاضل	هزینه حمل و نقل به کشتارگاه	ظرفیت	تلفات	انتخاب نژاد مرغ	ایستادگی	حداکثر سن پرورش	زمان استراحت	ظرفیت مزارع	هزینه حمل و نقل به مزرعه	ظرفیت	هزینه حمل و نقل به مزرعه	ظرفیت	چندهدفه	یکی هدفه	کمینه‌سازی	بیشینه‌سازی	Brevik et al. (2020)	
	✓		✓	✓			✓	✓	✓	✓				✓				✓	✓	✓						✓	✓		Brevik et al. (2020)	
✓				✓			✓			✓		✓			✓											✓		✓	Unveren & Luckstead (2020)	
	✓			✓			✓	✓	✓					✓	✓			✓	✓	✓						✓		✓	Satır & Yıldırım (2020)	
✓				✓			✓	✓	✓				✓	✓					✓	✓						✓	✓		Tahraoui (2020)	
✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓					✓					✓						✓	✓		Yazdekhasti et al. (2021)	
	✓		✓	✓				✓	✓	✓					✓		✓			✓					✓		✓	✓	Kler et al. (2022)	
✓				✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓						✓		✓	Solano-Blanco et al. (2023)	
	✓			✓		✓			✓	✓				✓												✓		✓	Naprom et al. (2023)	
	✓			✓		✓		✓	✓	✓				✓				✓	✓	✓						✓	✓		Solano-Blanco et al. (2023)	
	✓		✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓										✓		✓	✓		Dorcheh & Rahbari (2023)	
	✓		✓	✓			✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		✓	✓		✓	✓		Paredes-Rodríguez et al. (2024)	
	✓			✓		✓		✓		✓				✓	✓			✓	✓	✓						✓	✓		Juwitaa et al. (2024)	
	✓			✓			✓	✓		✓				✓	✓					✓						✓		✓	Okechukwu et al. (2024)	

نوع مطالعه		هدف بهبوده‌سازی		فضای مدل‌سازی		نوع متغیرها		بازار		کشتار گاه		مزارع		تأمین‌کننده			تابع هدف		نام پژوهشگر (سال انتشار)											
														سایر		جوجه	تعداد			نوع										
مثال عددی	مطالعه موردی	مکان‌یابی	مسیریابی	تخصیص	فزاری	احتمالی	قطعی	عدد صحیح	باینری	پیوسته	هزینه حمل و نقل به بازار	تقاضا	هزینه حمل و نقل به کشتارگاه	ظرفیت	تلفات	انتخاب نژاد مرغ	اینترنت اشیاء	حداکثر سن پرورش	زمان استراحت	ظرفیت مزارع	هزینه حمل و نقل به مزرعه	ظرفیت	هزینه حمل و نقل به مزرعه	ظرفیت	چندهدفه	یک هدفه	کمینه‌سازی	بیشینه‌سازی		
	✓			✓			✓	✓	✓	✓				✓	✓				✓	✓						✓		✓	Tahraoui et al. (2024)	
	✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓				✓	✓					✓			✓		✓		✓	✓	Mostaghimi et al. (2024)	
	✓			✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓			✓	✓		✓				✓		✓	✓	rabsheybani et al. (2024)	
	✓			✓		✓		✓		✓	✓	✓			✓											✓	✓	✓	Chaudhari et al. (2025)	
	✓			✓		✓		✓	✓					✓							✓					✓	✓	✓	Setiawan et al. (2025)	
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	پژوهش حاضر

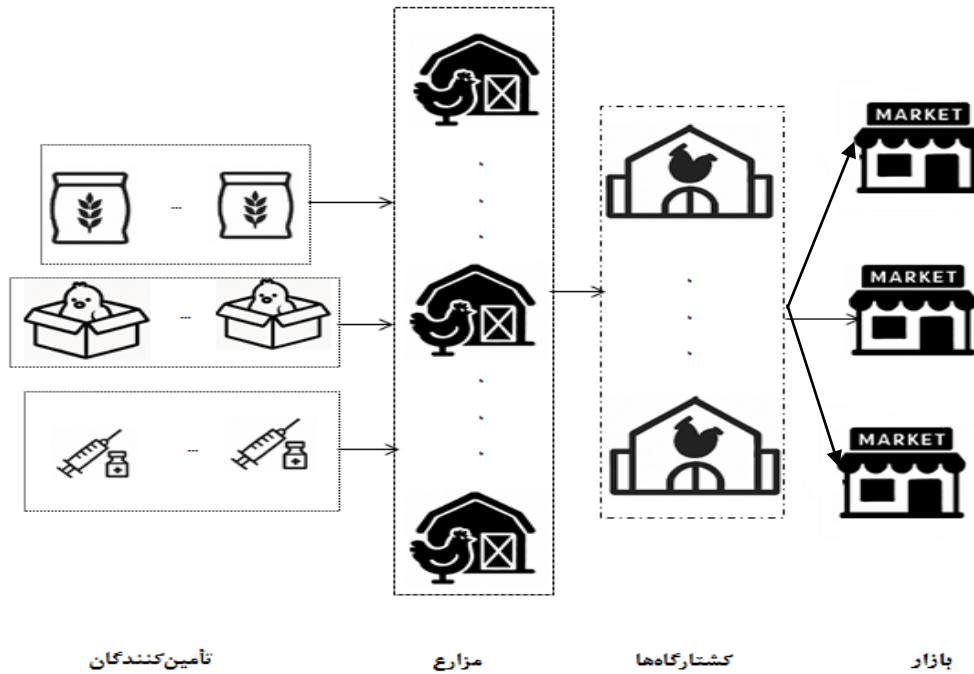
روش پژوهش

مسئله این پژوهش، زنجیره تأمین گوشت مرغ گوشتی از نژادهای مختلف جوجه چهار سطحی شامل تأمین کنندگان جوجه و تأمین کنندگان مواد غذایی، مزارع پرورش، کشتارگاه‌ها و مراکز توزیع (بازار) است. هدف طراحی شبکه بهینه زنجیره تأمین آن است. کارآمدی نژادهای مختلف مرغ شامل نژاد رأس، آراین و کاپ متفاوت است. هر نژاد به تغذیه، مواد تقویت کننده و واکسیناسیون مختلفی نیاز دارد و دوره پرورش، قیمت جوجه، متوسط وزن نهایی و درصد تلفات نژادها متفاوت است. برای تأمین کنندگان جوجه و تأمین کنندگان مواد غذایی می‌توان نامزدهایی لحاظ کرد و بسته به هزینه‌های حمل و نقل براساس فاصله یا مسافت، انتخاب تأمین کننده را مورد توجه قرار داد. در عمل، پرورش هم‌زمان چند نژاد مختلف در یک مرغداری به دلیل تفاوت در شرایط پرورش امکان پذیر نیست. هدف توسعه مدل ریاضی است که انتخاب بهینه نژادها، انتخاب تأمین کنندگان مناسب جوجه و تأمین کنندگان مناسب مواد غذایی براساس

هزینه‌های تحمیلی، ارسال مرغ گوشتی از مزرعه به کشتارگاه و در نهایت توزیع کننده را هم‌زمان بهینه‌سازی کند. شکل ۱، شبکه این زنجیره تأمین را نمایش می‌دهد. فرضیات مسئله عبارت‌اند از:

- افق زمانی، یک دوره چرخه تولید در نظر گرفته می‌شود.
 - تقاضای مشخص و قطعی است و کمبود تقاضا مجاز نیست.
 - وزن هر نژاد مرغ در پایان دوره، مقدار مشخصی است. به عبارت دیگر، همه مرغ‌های یک نژاد پس از پرورش وزن، ثبات و مشخصی دارند. خواص گوشت مرغ (مثل وزن نهایی) برای هر نژاد ثابت بوده و به شرایط پرورش وابسته نیست.
 - همه مزارع برای پرورش مرغ در دسترس هستند و محدودیت تعطیلی یا خرابی ندارند.
 - حمل‌ونقل مرغ از یک مزرعه به یک کشتارگاه امکان‌پذیر است و دارای هزینه است.
 - هر مزرعه برای هر نژاد، دارای حداقل و حداکثر ظرفیت پرورش است.
 - هر مزرعه، حداکثر می‌تواند یک نژاد مرغ را پرورش دهد.
 - مزارع مستقل عمل می‌کنند و انتقال مرغ بین آن‌ها مجاز نیست.
 - زمان انتقال مرغ از تأمین کننده به مزرعه و از مزرعه به کشتارگاه نسبت به دوره‌ها ناچیز است.
 - نرخ تلفات برای هر نژاد به صورت ثابت و مستقل از تصمیم‌های مدیریتی و شرایط پرورش در نظر گرفته شده است و برای امحاء کردن تلفات، هزینه لحاظ خواهد شد.
 - انتخاب تأمین کنندگان صرفاً بر اساس معیارهای اقتصادی شامل هزینه خرید و هزینه حمل‌ونقل انجام می‌شود؛ درحالی‌که معیارهای کیفی و عملیاتی مهم همچون قابلیت اطمینان در تحویل به موقع، کیفیت جوجه و خوراک، رعایت استانداردهای بهداشتی و سطح عملکرد تأمین کننده می‌توانند نقش تعیین کننده‌ای در کاهش تلفات پنهان، بهبود بهره‌وری تولید و کاهش ریسک‌های عملیاتی زنجیره تأمین داشته باشند.
- این فروض برای توسعه یک چارچوب تحلیلی منسجم و قابل حل ضروری هستند؛ اگرچه ممکن است دامنه تعمیم‌پذیری نتایج به شرایط واقعی و پویای صنعت طیور را محدود کنند.

شکل ۱: شمایی از زنجیره تأمین مرغ گوشتی



در ادامه اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای موردنیاز مسئله معرفی می‌شوند.

اندیس‌ها

s : اندیس تأمین کنندگان جوجه

f : اندیس تأمین کنندگان مواد غذایی (ذرت، گندم و غیره)

l : اندیس تأمین کنندگان واکسن و مواد تقویت کننده و غیره

i : اندیس مزارع پرورش مرغ

j : اندیس کشتارگاه

k : اندیس مرکز توزیع (بازار)

m : اندیس نژاد مرغ

پارامترها

C_{ms}^1 : هزینه خرید هر واحد جوجه مرغ نژاد نوع m از تأمین کننده s

C_f^2 : هزینه خرید هر واحد مواد غذایی از تأمین کننده f

C_l^3 : هزینه خرید هر واحد واکسن و مواد تقویت کننده از تأمین کننده l ام

CA_{ms}^1 : ظرفیت تأمین کننده جوجه نژاد نوع m ام از تأمین کننده s ام

CA_f^2 : ظرفیت تأمین کننده مواد غذایی تأمین کننده f ام

CA_l^3 : ظرفیت تأمین کننده واکسن و مواد تقویت کننده از تأمین کننده l ام

TC_{si}^1 : هزینه واحد انتقال هر واحد جوجه مرغ از تأمین کننده s ام مزرعه i ام

TC_{fi}^2 : هزینه واحد انتقال هر واحد مواد غذایی از تأمین کننده f ام به مزرعه i ام

TC_{li}^3 : هزینه واحد انتقال هر واحد تقویت کننده از تأمین کننده l ام به مزرعه i ام

TC_{ij}^4 : هزینه واحد انتقال هر واحد مرغ زنده از مزرعه i ام به کشتارگاه j ام

TC_{jk}^5 : هزینه واحد انتقال هر واحد مرغ ذبح شده از کشتارگاه j ام به مرکز توزیع (بازار) k ام

C_j^4 : هزینه کشتار و بسته بندی هر واحد مرغ در کشتارگاه j ام

CD_i^2 : هزینه معدوم سازی تلفات مرغ در مزرعه i ام

γ_m : درصد تلفات مرغ نژاد نوع m ام

OD_{msi}^1 : فاصله تأمین کننده جوجه مرغ نژاد نوع m ام از تأمین کننده s ام تا مزرعه i ام

OD_{fi}^2 : فاصله تأمین کننده مواد غذایی تأمین کننده f ام تا مزرعه i ام

OD_{li}^3 : فاصله تأمین کننده واکسن و تقویت کننده تأمین کننده l ام تا مزرعه i ام

OD_{ij}^4 : فاصله مزرعه i ام تا کشتارگاه j ام

OD_{jk}^5 : فاصله کشتارگاه j ام تا مرکز توزیع k ام

PC_{mi} : هزینه تولید هر واحد مرغ نژاد نوع m ام در مزرعه i ام

Cap_{mi} : حداکثر ظرفیت پرورش مرغ نژاد نوع m ام در مزرعه i ام

$CapM_{mi}$: حداقل ظرفیت پرورش مرغ نژاد نوع m ام در مزرعه i ام

COR_m^1 : ضریب مصرف هر واحد مرغ نژاد نوع m ام از جوجه مرغ

COR_m^2 : ضریب مصرف هر واحد مرغ نژاد نوع m ام از مواد غذایی

COR_m^3 : ضریب مصرف هر واحد مرغ نژاد نوع m ام از واکسن

COR_m^4 : وزن مرغ نژاد نوع m ام در هنگام بلوغ

CAP_j^2 : حداکثر ظرفیت کشتارگاه j ام

ER_m : ضریب تبدیل هر واحد مرغ نژاد نوع m به مرغ ذبح شده

DR_m : ضریب تبدیل هر واحد مرغ نژاد نوع m به کود

DE_k : تقاضای گوشت مرغ از مرکز توزیع k ام

PR^1 : قیمت فروش هر کیلوگرم مرغ

PR^2 : قیمت فروش هر واحد کود

BM : یک عدد خیلی بزرگ

متغیرها

SI_{msi} : میزان انتقال جوجه نوع نژاد نوع m از تأمین کننده s ام به مزرعه i ام

FI_{fi} : میزان انتقال مواد غذایی از تأمین کننده f ام به مزرعه i ام

LI_{li} : میزان انتقال واکسن و تقویت کننده از تأمین کننده l ام به مزرعه i ام

PP_{mi} : میزان تولید مرغ نژاد نوع m در مزرعه i ام

PR_{mi} : میزان انتقال مرغ نژاد نوع m در مزرعه i ام به کشتارگاه j ام

PEX_j : میزان مرغ ذبح شده در کشتارگاه j ام

PX_{jk} : میزان انتقال مرغ ذبح شده در کشتارگاه j ام به مرکز توزیع k ام

EX_i : میزان کود تولیدی در مزرعه i ام

MX_{mi} : در صورتی که جوجه نژاد نوع m در مزرعه i ام پرورش داده شود؛ یک در غیراین صورت صفر

X_i : در صورتی که مزرعه i ام فعال شود؛ یک در غیراین صورت صفر

در ادامه مدل مسئله در قالب تابع هدف و محدودیت‌های مسئله با جزییات تبیین و توصیف می‌شوند.

تابع هدف

تابع هدف مدل، سود کلی زنجیره است که براساس تفاوت درآمدهای فروش و هزینه‌های زنجیره محاسبه می‌شود که می‌توان کمینه‌سازی انتشار دی‌اکسید کربن یا تغییرات سود را به‌عنوان توابع هدف دیگری لحاظ کرد. درآمد زنجیره حاصل فروش مرغ گوشتی به مصرف کننده و کود است. در رابطه (۱) فروش مرغ گوشتی از مرکز توزیع به مصرف کننده و رابطه (۲)، فروش کود نشان می‌دهد.

$$\sum_j \sum_k PR^1 \times PX_{jk} \quad (۱)$$

$$\sum_i PR^2 \times EX_i \quad (۲)$$

هزینه‌های زنجیره شامل هزینه‌های خرید و انتقال مواد اولیه به مزارع، هزینه‌های تولید و معدوم‌سازی تلفات در مزارع، هزینه‌های انتقال مرغ زنده از مزارع به کشتارگاه و جوجه ذبح‌شده از کشتارگاه به بازار، هزینه‌های کشتار و بسته‌بندی است.

در رابطه (۳) به محاسبه هزینه‌های خرید و انتقال مواد اولیه شامل جوجه مرغ، مواد غذایی، واکسن و تقویت‌کننده می‌پردازد.

$$\begin{aligned} & \sum_m \sum_s \sum_i (C_{ms}^1 + TC_{si}^1 \times OD_{msi}^1) \times SI_{msi} \\ & + \sum_f \sum_i (C_f^2 + TC_{fi}^2 \times OD_{fi}^2) \times FI_{fi} \\ & + \sum_l \sum_i (C_l^3 + TC_{li}^3 \times OD_{li}^3) \times LI_{li} \end{aligned} \quad (۳)$$

رابطه (۴) هزینه‌های تولید در مزارع را تبیین می‌کند.

$$\sum_m \sum_i PC_{mi} \times PP_{mi} \quad (۴)$$

رابطه (۵) هزینه‌های معدوم‌سازی تلفات نشان می‌دهد.

$$\sum_m \sum_i CD_i^2 \times \gamma_m \times PP_{mi} \quad (۵)$$

هزینه انتقال مرغ زنده از مزارع به کشتارگاه و هزینه کشتار و بسته‌بندی در رابطه (۶) قابل مشاهده است.

$$\sum_m \sum_i \sum_j (TC_{ij}^4 \times OD_{ij}^4 + C_j^4) \times PR_{mij} \quad (۶)$$

هزینه انتقال مرغ ذبح‌شده به بازار نیز در رابطه (۷) محاسبه شد.

$$\sum_j \sum_k TC_{jk}^5 \times OD_{jk}^5 \times PX_{jk} \quad (۷)$$

محدودیت‌ها

در ادامه محدودیت‌های مسئله معرفی می‌شوند. محدودیت‌های حداکثر ظرفیت تأمین در رابطه‌های (۸) و (۹) و (۱۰) وجود دارند.

$$\sum_i SI_{msi} \leq CA_{ms}^1 \quad \forall m, s \quad (8)$$

$$\sum_i FI_{fi} \leq CA_f^2 \quad \forall f \quad (9)$$

$$\sum_i LI_{li} \leq CA_l^3 \quad \forall l \quad (10)$$

محدودیت‌های حداقل و حداکثر ظرفیت هر مزرعه در رابطه (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شد.

$$PP_{mi} \geq CapM_{mi} \times MX_{mi} \quad \forall m, i \quad (11)$$

$$PP_{mi} \leq Cap_{mi} \quad \forall m, i \quad (12)$$

ج) در روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) محدودیت‌های انتقال مواد اولیه به مزرعه در صورت فعال شدن مزرعه لحاظ خواهد شد.

$$\sum_s SI_{msi} \leq BM \times X_i \quad \forall i, m \quad (13)$$

$$\sum_f FI_{fi} \leq BM \times X_i \quad \forall i \quad (14)$$

$$\sum_l LI_{li} \leq BM \times X_i \quad \forall i \quad (15)$$

محدودیت‌های استفاده از یک مزرعه برای پرورش یک نژاد مرغ در یک دوره زمانی در رابطه (۱۶) بیان شد.

$$\sum_m MX_{mi} = X_i \quad \forall i \quad (16)$$

در رابطه (۱۷) محدودیت‌های امکان تولید یک نژاد مرغ در یک مزرعه فعال شده را مدل‌سازی کرد.

$$PP_{mi} \leq BM \times MX_{mi} \quad \forall m, i \quad (17)$$

و) محدودیت‌های مصرف مواد اولیه در روابط (۱۸) و (۱۹) و (۲۰) ارائه شد.

$$COR_m^1 \times PP_{mi} \leq \sum_s SI_{msi} \quad \forall i, m \quad (18)$$

$$COR_m^2 \times PP_{mi} \leq \sum_f FI_{fi} \quad \forall i, m \quad (19)$$

$$COR_m^3 \times PP_{mi} \leq \sum_l LI_{li} \quad \forall i, m \quad (20)$$

در رابطه (۲۱) محدودیت‌های مجموع مرغ زنده تولیدی سالم ارسالی از یک مزرعه به کشتارگاه‌ها برآورد شد.

$$PP_{mi} \times (1 - \gamma_m) = \sum_j PR_{mij} \quad \forall m, i \quad (21)$$

میزان کود تولیدشده از هر مزرعه در رابطه (۲۲) بیان شد.

$$EX_i = \sum_m DR_m \times PP_{mi} \quad \forall i \quad (22)$$

در رابطه (۲۳) میزان گوشت تولیدی از مرغ زنده در هر کشتارگاه براساس ورودی به آن مدل شد.

$$PEX_j = \sum_m \sum_i ER_m \times COR_m^4 \times PR_{mij} \quad \forall j, \quad (23)$$

محدودیت ظرفیت کشتارگاه‌ها در رابطه (۲۴) لحاظ شد.

$$\sum_k PX_{jk} \leq CAP_j^2 \quad \forall j \quad (24)$$

در رابطه (۲۵) محدودیت‌های مجموع گوشت مرغ تولیدی ارسالی از یک کشتارگاه به مراکز توزیع رعایت شد.

$$PEX_j = \sum_k PX_{jk} \quad \forall j \quad (25)$$

محدودیت‌های تقاضای گوشت مرغ از مراکز توزیع در رابطه (۲۶) بیان شد.

$$DE_k \geq \sum_j PX_{jk} \quad \forall k \quad (26)$$

محدودیت‌ها ذاتی نیز در روابط (۲۷) تا (۲۹) ارائه شد.

$$FI_{fi}, LI_{li}, PEX_j, PX_{jk}, EX_i \geq 0 \quad (27)$$

$$SI_{msi}, PP_{mi}, PR_{mij} \geq 0 \text{ عدد صحیح و } (28)$$

$$MX_{mi}, X_i \in \{0,1\} \quad (29)$$

یافته‌ها

به‌منظور سنجش اعتبار، کارایی و قابلیت اجرای مدل ریاضی پیشنهادی، مدل با استفاده از داده‌های عددی واقع‌بینانه آزمون شد. دستیابی به داده‌های دقیق و جامع از تمامی بخش‌های زنجیره تأمین مرغ گوشتی با چالش‌های متعددی داشت و اکثر مراکز و نهادهای مربوطه از در اختیار گذاری اطلاعات به دلایل حفظ حریم خصوصی شرکت امتناع می‌کردند؛ لذا داده‌ها، به‌صورت تقریبی و با بهره‌گیری از ترکیبی از روش‌های مختلف گردآوری شد. رویکردی ترکیبی جمع‌آوری داده‌ها شامل بررسی آمار و گزارش‌های در دسترس، مطالعه قیمت‌های بازار و هزینه‌های عملیاتی با استفاده از سایت‌های معتبر و کمک‌گیری از هوش مصنوعی و همچنین تا حد امکان مشاوره و بهره‌گیری از نظرات خبرگان صنعت طیور انجام شد.

در پژوهش حاضر، داده‌های ضریب مصرف جوجه، مواد غذایی و واکسن براساس نظر خبرگان و متوسط‌گیری و داده‌های هزینه‌ای (خرید جوجه، حمل و نقل، تولید، کشتار و بسته‌بندی) و قیمت‌های فروش (گوشت مرغ و کود) براساس داده‌های بازار و گزارش‌های رسمی استخراج شده‌اند. فاصله‌های موجودیت‌های بین دو لایه زنجیره و ظرفیت‌ها براساس مقادیر منطقی تولید شده‌اند. استفاده از داده‌های تقریبی می‌تواند دقت مطلق نتایج را تحت تأثیر قرار داده و قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج به تمامی واحدهای تولیدی را محدود کند؛ بنابراین، نتایج مدل باید به‌عنوان ابزاری راهنما و پشتیبان تصمیم‌گیری و نه برآورد قطعی همه پارامترها در نظر گرفته شوند. جمع‌آوری داده‌های واقعی و جامع‌تر از طریق همکاری با واحدهای تولیدی و استفاده از تکنیک‌های مدیریت عدم قطعیت، می‌تواند قابلیت اطمینان و تکرارپذیری نتایج را بهبود بخشد. توسعه آتی مدل با رویکردهای عدم قطعیت‌محور، همچون برنامه‌ریزی تصادفی، بهینه‌سازی مقاوم و مدل‌های پویا می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت تعمیم نتایج کمک کند.

داده‌ها

دو تأمین‌کننده جوجه، سه تأمین‌کننده مواد غذایی، سه تأمین‌کننده واکسن و مواد تقویتی، چهار مزرعه، سه کشتارگاه، شش مرکز توزیع و نژادهای رأس، آرین و کپ برای تجزیه و تحلیل مدل در نظر گرفته شد. جدول ۲، پارامترهای فنی و اقتصادی نژادها را نشان می‌دهد. دوره پرورش نژاد رأس، آرین و کاپ به ترتیب ۴۵، ۴۰ و ۴۲ روزه بوده که در مدل نقشی نداشته ولی در هزینه‌های تولید مرغ در مزرعه تأثیر آن‌ها دیده شد. قیمت فروش هر کیلوگرم کود ۳۰۰۰ تومان، قیمت فروش هر کیلوگرم گوشت مرغ ۱۴۵۰۰۰ هزار تومان و M (عدد بزرگ)، ۱۰۰۰۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شد. قیمت فروش گوشت مرغ

مستقل از نژاد و به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده که بازتاب دهنده ساختار واقعی بازار گوشت مرغ در ایران است. در بازار مصرف، محصول نهایی به صورت گوشت مرغ آماده عرضه می شود و تفکیکی بر اساس نژاد مرغ وجود ندارد. مصرف کنندگان نهایی نیز عموماً اطلاعی از نژاد مرغ مصرفی نداشته و تصمیم خرید آن ها بر اساس نژاد شکل نمی گیرد.

جدول ۲: ویژگی های نژادهای مرغ گوشتی

پارامترها	نژاد رأس	نژاد آرین	نژاد کاپ
قیمت جوجه (تومان)	۳۱۰۰۰ تا ۳۲۰۰۰	۲۷۰۰۰ تا ۲۸۰۰۰	۳۱۰۰۰ تا ۳۲۰۰۰
وزن نهایی (کیلوگرم)	۲٫۵	۱٫۸	۲٫۵
قیمت فروش مرغ (تومان به ازای کیلوگرم)	۱۴۵۰۰۰	۱۴۵۰۰۰	۱۴۵۰۰۰
درصد تلفات	۴	۶	۵
ضریب تبدیل به مرغ ذبح شده	۰٫۷۲۳	۰٫۶۸۰	۰٫۷۵۰
ضریب تبدیل به کود	۰٫۲۵	۰٫۲۲	۰٫۲۸
ضریب مصرف جوجه به ازای هرواحد مرغ (تلفات در راه)	۱٫۰۳۸	۱٫۰۶۴	۱٫۰۵۱
ضریب مصرف مواد غذایی به ازای هر مرغ	۴٫۲۵	۳٫۱۰	۴٫۴۰
ضریب مصرف واکسن و مواد تقویتی به ازای هرواحد مرغ	۰٫۰۰۰۵	۰٫۰۰۰۶۵	۰٫۰۰۰۵۶

پارامترهای ظرفیتی، حداکثر مقدار منابع قابل تأمین و همچنین دامنه عملیات مجاز در هر یک از حلقه های زنجیره را مشخص می کنند که داده های تقریبی براساس گزارش های صنعتی هستند. جدول ۳، ظرفیت تأمین کنندگان جوجه را به تفکیک نژادهای مختلف و جدول ۴، ظرفیت تأمین کنندگان مواد غذایی، واکسن و مواد تقویتی و همچنین هزینه های خرید از تأمین کنندگان مختلف را نشان می دهد. همچنین در این جدول، ظرفیت کشتارگاه ها و هزینه کشتار و بسته بندی را تبیین می کند.

جدول ۵، حداقل و حداکثر ظرفیت پرورش در مزارع را برای هر نژاد مشخص می کند. در این جدول، هزینه تولید مرغ و هزینه معدوم سازی تلفات در مزارع درج شد.

بهبودسازی تصمیمات یکپارچه تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین مرغ گوشتی ...؛ طباطبائی و همکاران | ۱۴۷

جدول ۳: ظرفیت تأمین کنندگان جوجه بر اساس نژاد (تعداد جوجه)

نژاد کاپ	نژاد آراین	نژاد راس	
۴۵۰۰۰	۷۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	تأمین کننده ۱
۵۰۰۰۰	۸۵۰۰۰	۶۰۰۰۰	تأمین کننده ۲

جدول ۴: ظرفیت تأمین کنندگان و خرید از آن‌ها و همچنین ظرفیت کشتارگاه‌ها و هزینه کشتار و بسته‌بندی

نام موجودیت	شماره	ظرفیت	هزینه خرید/ کشتار و بسته‌بندی
تأمین کنندگان مواد غذایی (کیلوگرم)	۱	۲۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰
	۲	۱۸۰۰۰۰	۴۵۰۰۰
	۳	۲۲۰۰۰۰	۴۲۰۰۰
تأمین کنندگان واکسن و تقویتی (لیتر)	۱	۵۰۰۰	۲۲۰۰۰۰
	۲	۴۵۰۰	۲۱۸۰۰۰
	۳	۵۵۰۰	۲۸۵۰۰۰
کشتارگاه	۱	۲۰۰۰۰	۵۶۰۰
	۲	۲۵۰۰۰	۵۴۰۰
	۳	۱۸۰۰۰	۵۸۰۰

جدول ۵: حداقل و حداکثر ظرفیت پرورش در مزارع

مزرعه					
۴	۳	۲	۱		
۲۱۰۰۰-۸۵۰۰	۱۹۰۰۰-۷۵۰۰	۲۲۰۰۰-۹۰۰۰	۲۰۰۰۰-۸۰۰۰	ظرفیت (حداقل - حداکثر)	نژاد رأس
۷۰۰۰	۸۰۰۰	۶۰۰۰	۷۰۰۰	هزینه تولید مرغ	
۱۹۰۰۰-۷۵۰۰	۱۷۰۰۰-۶۵۰۰	۲۰۰۰۰-۸۰۰۰	۱۸۰۰۰-۷۰۰۰	ظرفیت (حداقل - حداکثر)	نژاد آراین
۶۰۰۰	۷۰۰۰	۵۵۰۰	۶۵۰۰	هزینه تولید مرغ	
۲۳۰۰۰-۹۰۰۰	۲۱۰۰۰-۸۰۰۰	۲۴۰۰۰-۹۵۰۰	۲۲۰۰۰-۸۵۰۰	ظرفیت (حداقل - حداکثر)	نژاد کاپ
۹۰۰۰	۸۰۰۰	۹۵۰۰	۸۵۰۰	هزینه تولید مرغ	
۱۰۰	۱۲۰	۱۱۰	۱۰۰	هزینه‌های معدوم‌سازی	

جدول ۶، هزینه حمل و نقل جوجه از تأمین کننده به مزرعه را نشان داده که اولین مرحله از جریان مواد در زنجیره است. این جدول، هزینه حمل و نقل مواد غذایی به مزرعه و همچنین، هزینه حمل و نقل واکسن به مزرعه را نیز نشان می دهد.

جدول ۶: هزینه حمل و نقل از تأمین کنندگان به مزرعه (تومان به ازای واحد جابجایی)

مزرعه				شماره	تأمین کننده
۴	۳	۲	۱		
۳,۵	۳,۳	۳,۲	۳,۴	۱	جوجه
۳,۲	۳,۱	۳,۴	۳,۳	۲	
۱۰	۸	۹	۷	۱	مواد غذایی
۱۱	۹	۸	۸	۲	
۱۰	۱۰	۷	۹	۳	
۱۱۰۰	۱۵۰۰	۱۴۰۰	۱۲۰۰	۱	واکسن و تقویت کننده
۱۵۰۰	۱۷۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۲	
۱۴۰۰	۱۳۰۰	۱۶۰۰	۱۴۰۰	۳	

جدول ۷، به نمایش هزینه های حمل و نقل مرغ به کشتارگاه می پردازد. جدول ۸، هزینه های حمل و نقل مرغ ذبح شده به بازار را ارائه می دهد. این هزینه ها با در نظر گرفتن الزامات نگهداری در زنجیره سرما محاسبه شده اند.

جدول ۷: هزینه حمل و نقل مرغ ذبح شده به کشتارگاه (هزار تومان به ازای هر واحد در هر کیلومتر)

مزرعه / کشتارگاه	۱	۲	۳
۱	۲,۲	۲,۱	۲,۲
۲	۱,۹	۳,۵	۲,۲
۳	۴,۲	۲	۲,۲
۴	۲,۱	۱,۹	۲,۰

جدول ۸: هزینه حمل و نقل مرغ ذبح شده به بازار (هزار تومان به ازای هر کیلوگرم در هر کیلومتر)

کشتارگاه / مرکز توزیع	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۱,۴	۱,۵	۰,۹	۱,۰	۱,۲	۱,۲
۲	۱,۵	۱,۰	۱,۲	۱,۲	۱,۱	۱,۱
۳	۲	۱,۴	۱,۳	۱,۱	۱,۳	۱,۲

بهینه‌سازی تصمیمات یکپارچه تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین مرغ گوشتی ...؛ طباطبائی و همکاران | ۱۴۹

داده‌های مربوط به فواصل بین حلقه‌های مختلف زنجیره در قالب جدول ۹، براساس توزیع یکنواخت ایجاد شد. این جدول، فاصله موجودیت‌های هر لایه با موجودیت لایه بعدی را برحسب کیلومتر نشان می‌دهد که بر هزینه و زمان انتقال جوجه‌ها تأثیر مستقیم دارد.

جدول ۹: فاصله موجودیت‌های یک لایه از موجودیت‌های لایه دیگر (کیلومتر)

لایه مقدم	لایه مؤخر	فاصله
تأمین‌کننده جوجه	مزرعه	توزیع یکنواخت (۲۰۰، ۱۰۰)
تأمین‌کننده مواد غذایی	مزرعه	توزیع یکنواخت (۹۰، ۷۰)
تأمین‌کننده واکسن و مواد تقویتی	مزرعه	توزیع یکنواخت (۸۰، ۵۰)
مزرعه	کشتارگاه	توزیع یکنواخت (۷۰، ۶۰)
کشتارگاه	مراکز توزیع	توزیع یکنواخت (۷۰، ۶۰)

جدول ۱۰، تقاضای مراکز توزیع را نشان می‌دهد که از معیارهای اصلی برای برنامه‌ریزی تولید و توزیع در کل زنجیره تأمین محسوب می‌شود.

جدول ۱۰: تقاضای مراکز توزیع (کیلوگرم)

میزان تقاضا	مراکز توزیع
۱۰۰۰۰	۱
۹۰۰۰	۲
۱۲۰۰۰	۳
۱۱۰۰۰	۴
۱۱۰۰۰	۵
۷۰۰۰	۶

نتایج محاسباتی

پس از پیاده‌سازی مدل ریاضی ارائه‌شده در نرم‌افزار GAMS 23.5 و حل آن با داده‌های گردآوری‌شده با حل‌کننده CPLEX روی کامپیوتری با مشخصات Intel core i7 CPU, 2.2 GHz و حافظه RAM 6 Gb، نتایج عددی ارائه شد. مسئله با ابعاد نسبتاً کوچک شامل دو تأمین‌کننده مواد غذایی، دو تأمین‌کننده جوجه، دو تأمین‌کننده واکسیناسیون و مواد تقویتی، دو مزرعه، دو کشتارگاه و چهار مرکز توزیع در

مدت زمان ۸ دقیقه و ۳۵ ثانیه با گپ صفر به جواب بهینه جهانی رسید. از آنجایی که مسئله MILP نسبتاً بزرگ (تعداد محدودیت‌ها، ۱۳۹، تعداد متغیرهای پیوسته ۱۳۸ و تعداد متغیرهای صفر و یک، ۱۶ و تعداد متغیرهای عدد صحیح ۷۲) است، برای دستیابی به یک جواب با زمان معقول، بین جواب به دست آمده و جواب بهینه جهانی، اختلاف یا خطای 10^{-4} پذیرفته شد و مدل با این اختلاف جواب را در زمان ۲/۲۳ ثانیه جواب را به دست آورد. خروجی‌های مدل در قالب جداول و تحلیل‌های مرتبط، گویای توانایی مدل در تعیین استراتژی‌های بهینه برای انتخاب نژاد، تخصیص ظرفیت، برنامه‌ریزی تولید و مدیریت لجستیک است. مقدار تابع هدف بهینه (سود خالص) برابر با ۱,۱۸۲۱ میلیارد تومان محاسبه شد. در ادامه، جزئیات مربوط به متغیرهای تصمیم کلیدی در قالب جداول ارائه شده‌اند. جدول ۱۱، میزان توزیع جوجه هر نژاد از تأمین‌کنندگان به مزارع، تأمین مواد غذایی از تأمین‌کنندگان به مزارع و تأمین واکسن و مواد تقویتی را نشان می‌دهد. براساس نتایج مدل، نژاد رأس از تأمین‌کننده ۲ به مزرعه ۲ و کاپ از تأمین‌کننده ۲ به مزرعه ۳ تخصیص یافته است. جدول ۱۲، میزان توزیع مواد غذایی از تأمین‌کنندگان به مزارع مختلف را نشان می‌دهد. تأمین‌کننده ۱ به عنوان منبع اصلی تأمین مواد غذایی برای مزارع ۲ و ۳ انتخاب شد و تأمین‌کننده واکسن و مواد تقویتی نیز تأمین‌کننده ۲ خواهد بود. براساس نتایج جدول، نژادهای کاپ و رأس به عنوان گزینه‌های بهینه برای کلیه مزارع انتخاب شدند. انتخاب تنها دو نژاد و دو مزرعه در پاسخ بهینه، بیانگر آن است که تحت محدودیت‌های موجود و ساختار هزینه‌ها و درآمدها، استفاده از نژاد دیگر، یا مزارع دیگر منجر به بهبود مقدار تابع هدف نمی‌شود؛ در غیر این صورت، مدل به‌طور خودکار آن‌ها را در ترکیب بهینه لحاظ می‌کرد. از منظر تحلیلی، این نتیجه نشان‌دهنده برتری نسبی این نژادها از نظر ترکیبی از ویژگی‌های زیستی (مانند نرخ تلفات و عملکرد تولید)، هزینه نهاده‌ها و سازگاری با ظرفیت و موقعیت مکانی مزارع منتخب است. همچنین، انتخاب محدود مزارع را می‌توان ناشی از هم‌زمانی سه عامل دانست: ظرفیت مؤثر پرورش، نزدیکی مکانی به کشتارگاه‌ها و هزینه‌های حمل‌ونقل، به گونه‌ای که مزارع منتخب کمترین هزینه لجستیکی را در کنار تأمین حجم مورد نیاز تقاضا ایجاد کرده‌اند.

بهینه‌سازی تصمیمات یکپارچه تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین مرغ گوشتی ...؛ طباطبائی و همکاران | ۱۵۱

جدول ۱۱: تعداد جوجه، میزان مواد غذایی و واکسن و تقویت‌کننده انتقال داده‌شده از تأمین‌کنندگان به مزارع

مزرعه					
۴	۳	۲	۱		
				رأس-۱	نوع نژاد و تأمین‌کننده جوجه
		۱۳۵۹۸		رأس-۲	
	۲۱۹۸۷			کاپ-۱	
				کاپ-۲	
	۹۲۰۴۸	۵۵۶۷۵		۱	تأمین‌کننده مواد غذایی
				۲	
				۳	
				۱	تأمین‌کننده واکسن و مواد تقویتی
	۱۱,۷۱۵	۶,۵۵۰		۲	
				۳	

جدول ۱۲: تعداد مرغ تولید نژادهای مختلف در مزارع و کود تولیدی

مزرعه				نوع نژاد مرغ
۴	۳	۲	۱	
		۱۳۱۰۰		رأس
	۲۰۹۲۰			کاپ
	۵۸۸۷,۶	۳۲۷۵		میزان کود تولیدی

جدول ۱۳، الگوی انتقال مرغ‌های پرورشی از مزارع به کشتارگاه‌ها را نمایش می‌دهد. مزرعه ۲ نژاد رأس را به کشتارگاه ۱ و ۳ منتقل می‌کند. مزرعه ۳ نژاد کاپ را بین کشتارگاه‌های ۲ و ۳ توزیع می‌کند که سهم کشتارگاه ۲ بیشتر است. میزان مرغ ذبح‌شده در کشتارگاه ۲، از سایرین بیشتر است. در این مسئله هر سه کشتارگاه فعال شده‌اند.

جدول ۱۳: تعداد مرغ انتقالی نژاد مشخص از مزرعه به کشتارگاه

کشتارگاه			نژاد مرغ-مزرعه
۳	۲	۱	
۱۵۱۲		۱۱۰۶۴	رأس-۲
۶۵۴۱	۱۳۳۳۳		کاپ-۳
۸۰۵۳	۱۳۳۳۳	۱۱۰۶۴	میزان مرغ ذبح شده

بر اساس نتایج بهینه سازی مدل، جدول ۱۴، میزان انتقال مرغ ذبح شده از کشتارگاه ها به مراکز توزیع را نشان می دهد. براساس نتایج، کشتارگاه ۱ مرغ ذبح شده را به مراکز توزیع ۱، ۳ ارسال می کند. کشتارگاه ۲ محصول خود را به مراکز توزیع ۱، ۲، ۵ و ۶ تخصیص داده است. همچنین کشتارگاه ۳ مرغ ذبح شده را به مراکز توزیع ۴ و ۶ ارسال می کند.

جدول ۱۴: میزان انتقال مرغ ذبح شده از کشتارگاه ها به مراکز توزیع

مرکز توزیع						کشتارگاه
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
			۱۲۰۰۰		۷۹۹۸,۱۸	۱
۳۰۰۲,۶۸۵	۱۱۰۰۰			۹۰۰۰	۱۹۹۶,۶۹	۲
۳۹۹۷,۳۱۵		۱۱۰۰۰				۳

تحلیل حساسیت

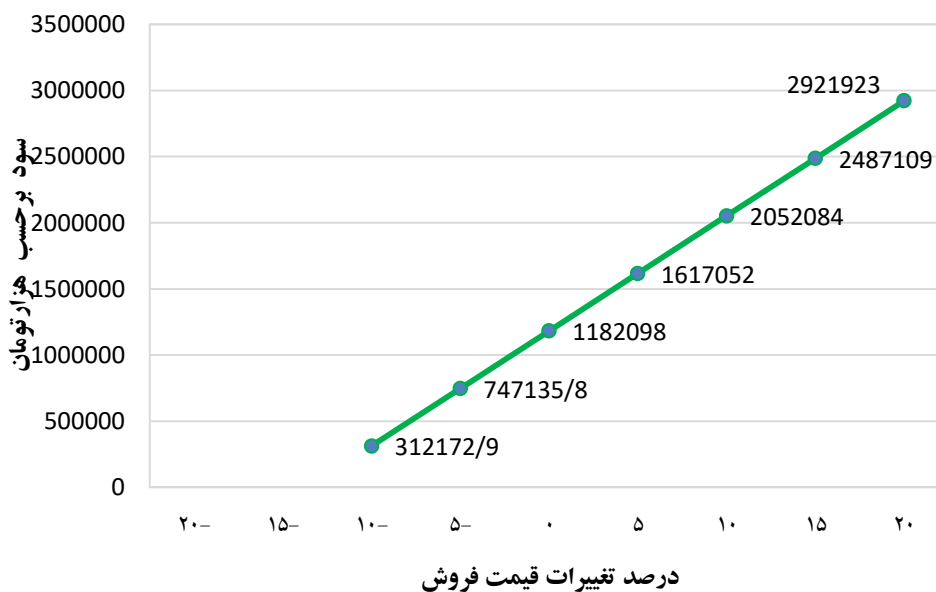
هدف اصلی از تحلیل حساسیت، نه تنها شناسایی پارامترهای حساس مؤثر بر سودآوری، بلکه تعیین نقاط بحرانی و آستانه های تغییر این پارامترها برای اتخاذ تصمیم گیری های مدیریتی هوشمندانه و مبتنی بر شواهد است. در این راستا، هر یک از پارامترها به صورت مجزا و از منهای ۲۰ درصد تا مثبت ۲۰ درصد با گام ۵ درصدی نسبت به مقادیر پایه اولیه، تغییر داده شدند و این تغییرات بر روی سود کل زنجیره تأمین بررسی و تحلیل شد.

همان طور که در شکل ۲ مشهود است، افزایش قیمت فروش مرغ منجر به رشد سود کل سیستم می شود. این روند صعودی نشان می دهد که درآمد حاصل از فروش، نقش تعیین کننده ای در سود ایفا می کند. همچنین، کاهش قیمت فروش نیز به همان نسبت باعث افت سود می شود. این رفتار متقارن و خطی

بهینه‌سازی تصمیمات یکپارچه تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین مرغ گوشتی ...؛ طباطبائی و همکاران | ۱۵۳

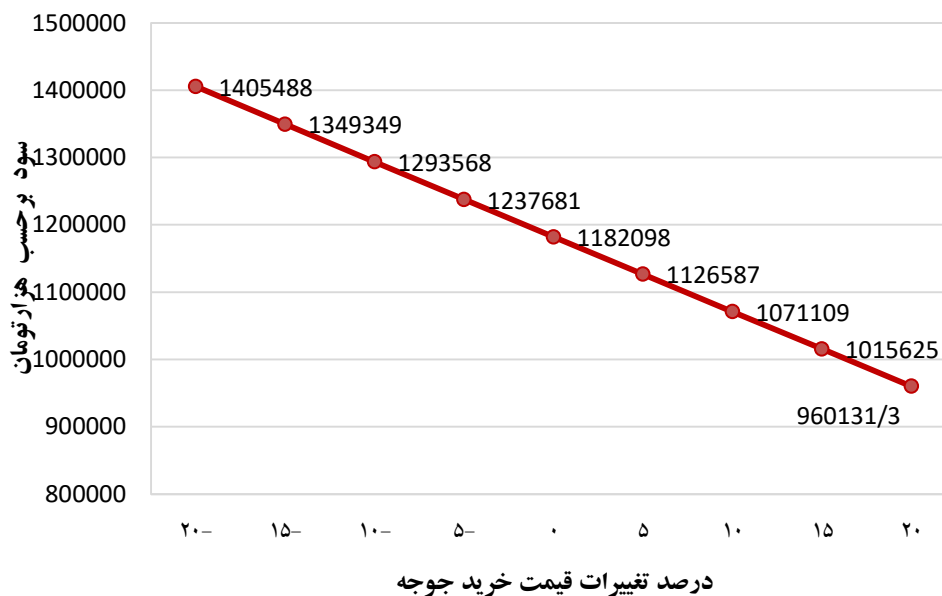
مدل، کاملاً با اصول اقتصادی و منطق کسب‌وکار سازگار است و نشان می‌دهد مدل به‌درستی رابطه بین قیمت فروش و درآمد را تبیین می‌کند. کاهش قیمت فروش در ۱۵- و ۲۰- مسئله را نشدنی می‌کند.

شکل ۲: تغییرات سود نسبت به درصد تغییرات قیمت فروش



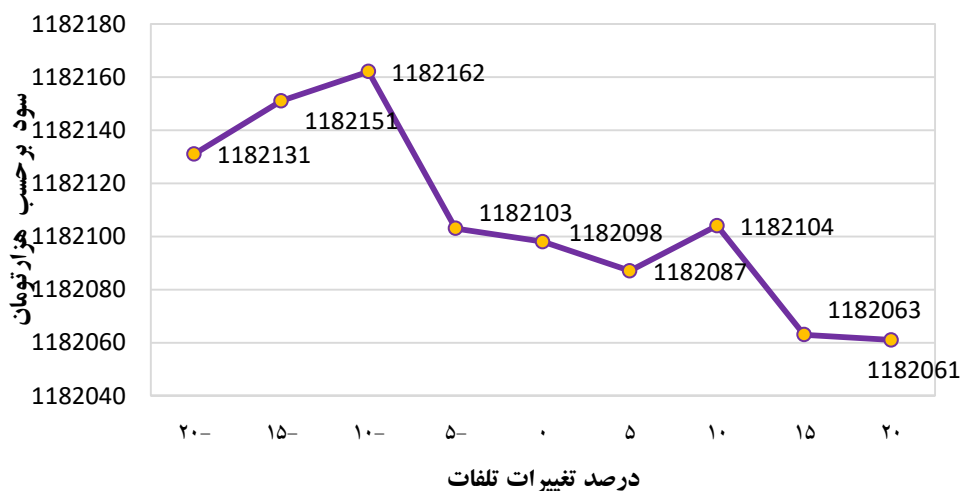
براساس شکل ۳، افزایش قیمت خرید جوجه به‌صورت مستقیم موجب کاهش سود کل سیستم می‌شود. این رابطه معکوس به‌وضوح نشان می‌دهد که هزینه خرید جوجه به‌عنوان یکی از نهاده‌های اصلی تولید، تأثیر بسزایی در اقتصاد مدل دارد. شیب زیاد بیانگر این است که این پارامتر اهمیت زیادی دارد؛ چراکه با افزایش قیمت خرید جوجه، مدل تمایل به تعدیل ترکیب نژادی و بهره‌گیری از نژادهای با بازدهی بالاتر را نشان می‌دهد تا اثرات افزایش هزینه را خنثی کند.

شکل ۳: تغییرات سود نسبت به درصد تغییرات قیمت خرید جوجه



براساس شکل ۴، با افزایش نرخ تلفات، سود کل سیستم به صورت منطقی و سیستماتیک کاهش می یابد. این رابطه معکوس کاملاً با انتظارات نظری و واقعیت های عملیاتی صنعت طیور همخوانی دارد. اگرچه رفتار نوسانی مشاهده می شود که ناشی از ماهیت محاسباتی فرآیند حل مدل و معیار توقف حل کننده بوده است و نه بیانگر یک رابطه اقتصادی واقعی؛ به گونه ای که در صورت حل مدل با گپ صفر یا خیلی نزدیک به صفر، روند سودآوری کاملاً یکنواخت و نزولی خواهد بود.

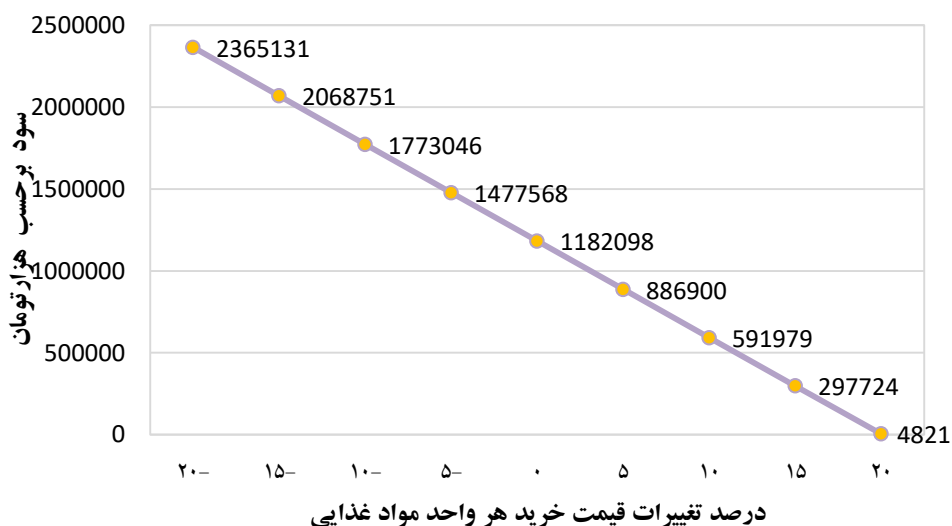
شکل ۴: تغییرات سود نسبت به درصد تغییرات تلفات



بهینه‌سازی تصمیمات یکپارچه تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین مرغ گوشتی ...؛ طباطبائی و همکاران | ۱۵۵

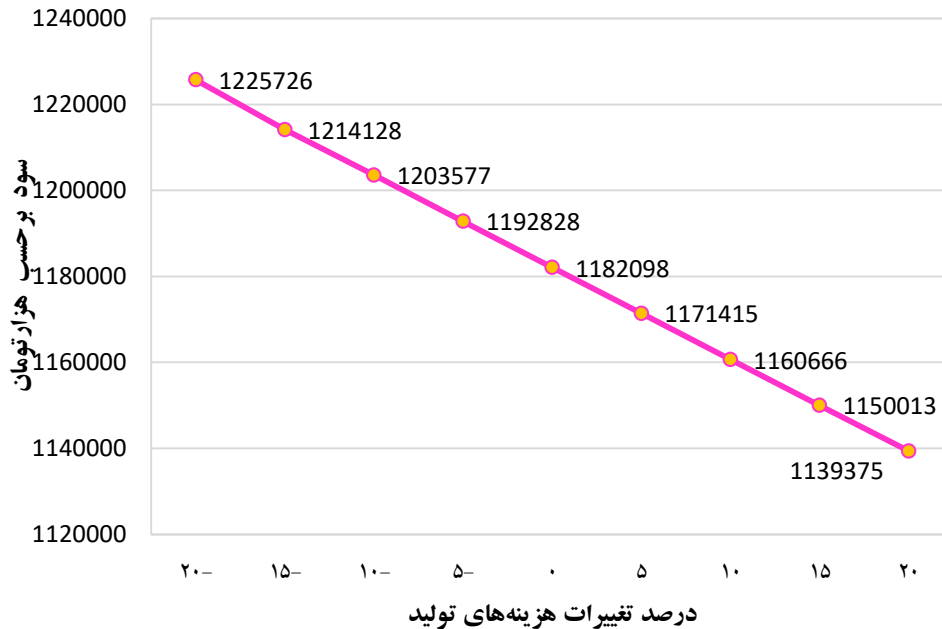
شکل ۵، رابطه بین سود و هزینه خرید مواد غذایی را نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش قیمت خرید مواد غذایی، میزان سود به‌طور محسوسی کاهش یافته است.

شکل ۵: تغییرات سود نسبت به درصد تغییرات قیمت خرید هر واحد مواد غذایی



براساس شکل ۶، تغییرات هزینه‌های تولید تأثیر مستقیم و قابل ملاحظه‌ای بر سود کل سیستم دارد. با افزایش این هزینه، سود کل به‌صورت پیوسته کاهش می‌یابد و در مقابل، کاهش هزینه تولید منجر به بهبود سود می‌شود. این حساسیت به مدیران هشدار می‌دهد که کنترل و بهینه‌سازی هزینه‌های تولید می‌تواند تأثیر معناداری بر سودآوری نهایی داشته باشد.

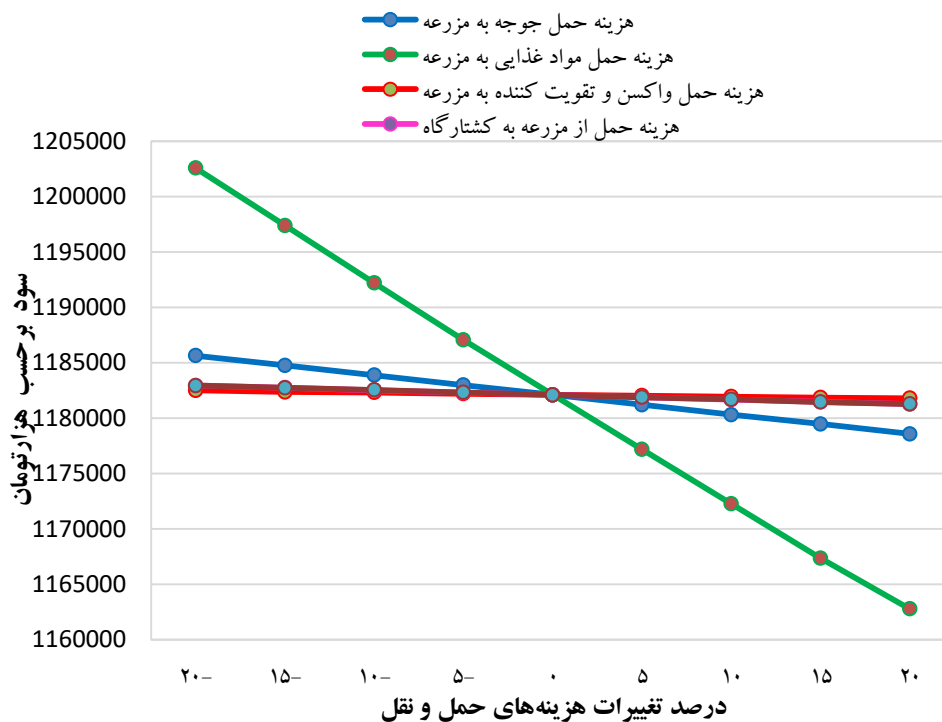
شکل ۶: تغییرات سود نسبت به درصد تغییرات هزینه‌های تولید



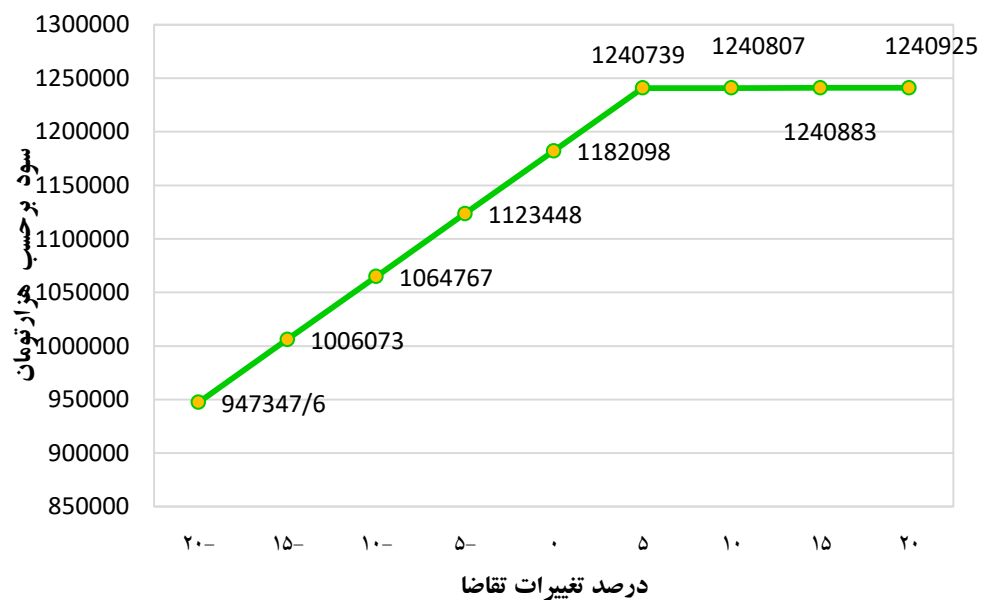
میزان سود در مقابل تغییرات هزینه‌های انتقال مرغ از مزرعه به کشتارگاه در شکل ۷ نمایش داده شده که رابطه مستقیم و منطقی بین این پارامتر و سود کل سیستم را تبیین می‌کند. افزایش هزینه حمل و نقل موجب کاهش حاشیه سود شده و این اثر در خروجی مدل قابل مشاهده است.

میزان سود در مقابل تغییرات تقاضای گوشت مرغ در شکل ۸ قابل مشاهده است که رابطه مستقیم و منطقی بین تقاضا و سود کل سیستم وجود دارد. با افزایش تقاضا، سود افزایش می‌یابد که این رفتار کاملاً همسو با اصول اقتصادی است. اگرچه ظرفیت زنجیره باید امکان برآوردسازی تقاضا را داشته باشد. مدل به دلیل آنکه با افزایش تقاضا باید تخصیص‌هایی را بدهد که قبلاً صرفه اقتصادی کمتری داشته لذا شیب افزایش سود زنجیره به شدت کاهش یافته است که از ۵ درصد به بعد، این موضوع مشهود است.

شکل ۷: تغییرات سود نسبت به درصد تغییرات هزینه‌های حمل و نقل

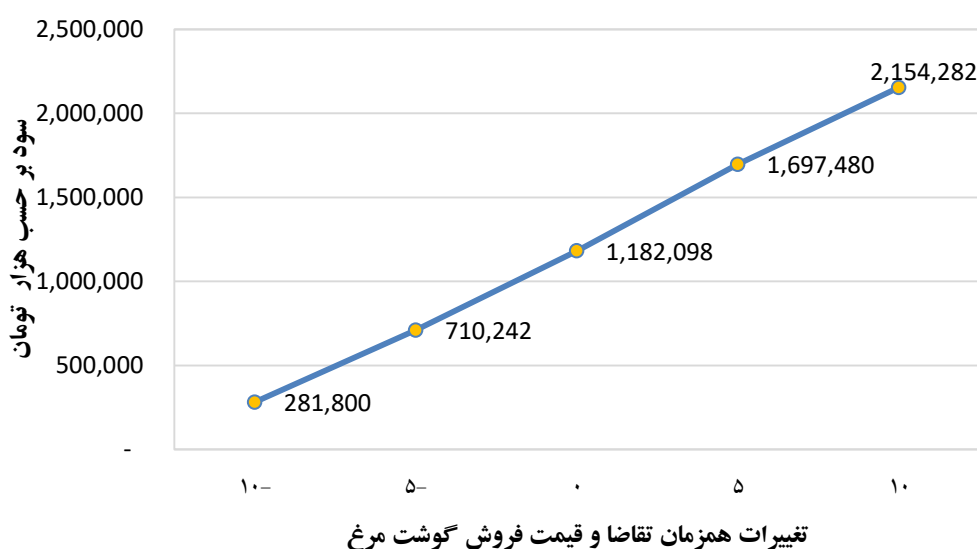


شکل ۸: تغییرات سود نسبت به درصد تغییرات تقاضا



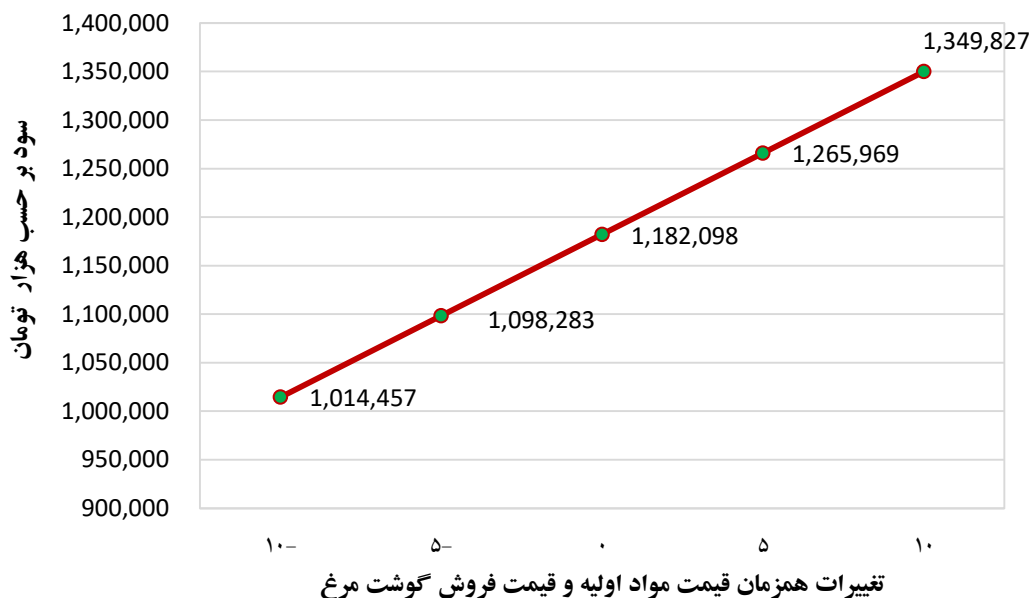
شکل ۹، یک سناریو ترکیبی از تغییرات هم‌زمان قیمت فروش گوشت مرغ و تقاضا، امکان بررسی رفتار سود کل زنجیره و پایداری تصمیم‌های بهینه را در شرایط متغیر بازار فراهم می‌سازد. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی از رفتار منطقی و سازگار در مواجهه با تغییرات هم‌زمان این دو پارامتر برخوردار بوده و تصمیم‌های بهینه آن از درجه مناسبی از پایداری برخوردار هستند. افزودن این تحلیل دوبعدی، دقت ارزیابی عملکرد مدل را افزایش داده و کاربردپذیری آن را در محیط‌های واقعی و ناپایدار بازار تقویت می‌کند.

شکل ۹: تغییرات سود با تغییرات تقاضا و قیمت فروش گوشت مرغ



سناریویی که تغییرات هم‌زمان و هم‌جهت قیمت مواد اولیه (جوجه، مواد غذایی، واکسیناسیون) زنجیره تأمین گوشت مرغ و قیمت فروش گوشت را در بازه ± 10 درصد با گام ۵ درصد در نظر می‌گیرد، در شکل ۱۰ ارائه شده است. این سناریو، نحوه واکنش سود کل زنجیره و میزان پایداری تصمیم‌های بهینه را در مواجهه با نوسانات بازار بررسی می‌کند. نتایج گواه آن است که مدل پیشنهادی در برابر تغییرات هم‌زمان این دو دسته پارامتر، از رفتاری منطقی و سازگار برخوردار بوده و ساختار تصمیم‌های بهینه آن از سطح قابل قبولی از پایداری برخوردار است. انجام این تحلیل دوبعدی موجب افزایش دقت ارزیابی عملکرد مدل و تقویت قابلیت کاربرد آن در شرایط واقعی و ناپایدار بازار می‌شود.

شکل ۱۰: تغییرات سود با تغییرات قیمت مواد اولیه و قیمت فروش گوشت مرغ



نتایج تحلیل حساسیت و سناریوهای مختلف نشان داد که این الگوی انتخاب در دامنه معقولی از تغییرات پارامترهای کلیدی پایدار بوده و تنها در صورت تغییرات ساختاری قابل توجه در قیمت نهاده‌ها، تقاضا یا ظرفیت‌ها، ترکیب بهینه نژادها و مزارع تغییر می‌کند. از این رو، نتایج عددی صرفاً یک خروجی محاسباتی نبوده، بلکه بازتاب‌دهنده تعامل منطقی میان تصمیم‌های زیستی، تولیدی و لجستیکی در چارچوب مدل پیشنهادی هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش باهدف طراحی یک مدل ریاضی یکپارچه برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین گوشت مرغ در چهار لایه تأمین‌کننده، مزرعه، کشتارگاه و مرکز توزیع با در نظرگیری هم‌زمان انتخاب نژاد و مدیریت تلفات، انجام شد. مدل توسعه‌یافته توانست تصمیم‌های راهبردی و تاکتیکی در سطوح مختلف، از تأمین نهاده و انتخاب نژاد گرفته تا تولید، توزیع و مدیریت پسماند را در یک چارچوب بهینه‌سازی واحد ادغام کند. نوآوری اصلی این پژوهش، لحاظ کردن انتخاب نژاد به‌عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری کلیدی و مدل‌سازی واقع‌بینانه عدم امکان پرورش هم‌زمان نژادهای مختلف در یک واحد پرورشی است. حل مدل در نرم‌افزار گمز، کارایی و اعتبار مدل را به اثبات رساند. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی قادر است با

تخصیص بهینه منابع، انتخاب بهترین ترکیب نژادی، برنامه‌ریزی تولید در مزارع، مدیریت لجستیک و توزیع را تبیین کند. تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای کلیدی، رفتار منطقی و پایدار مدل را در برابر تغییرات شرایط بازار و عملیاتی تأیید کرد. لذا این مدل می‌تواند ابزاری قابل اعتماد برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی باشد. علاوه بر جنبه اقتصادی، این پژوهش با لحاظ کردن درآمد حاصل از فروش کود مرغی، گامی کوچک در جهت عملیاتی‌سازی مفاهیم اقتصاد چرخشی و توسعه پایدار در صنعت طیور برداشت. چالش اصلی این پژوهش، جمع‌آوری داده‌های دقیق و کامل به دلیل محرمانه بودن اطلاعات مالی و عملیاتی واحدهای تولیدی بود. این امر منجر شد که برخی از پارامترهای مدل از مقادیر مطالعات مشابه پیشین و داده‌های تقریبی گردآوری شوند. این محدودیت می‌تواند بر خروجی‌های مدل تأثیر منفی بگذارد. لذا نتایج مدل باید به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری و نه یک نسخه قطعی تلقی شوند و توسعه آتی مدل با رویکردهای عدم قطعیت‌محور، نظیر برنامه‌ریزی تصادفی، بهینه‌سازی مقاوم و مدل‌های پویا می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت تعمیم نتایج کمک شایانی کند.

در مدل حاضر، برخی پارامترها همچون تقاضای بازار، نرخ تلفات و قیمت نهاده‌ها قطعی فرض شدند؛ درحالی‌که این متغیرها از نوسانات قابل توجهی برخوردارند. همچنین متوسط قیمت نهاده‌های دامی لحاظ شد. توسعه مدل با روش‌هایی مانند برنامه‌ریزی تصادفی می‌تواند توانایی مدل را برای مقابله با نااطمینانی‌های محیطی افزایش داده و راهکارهای عملیاتی مقاوم‌تری در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد.

مدل پیشنهادی می‌تواند در شرایطی که سیاست‌های حمایتی دولت همچون نرخ ارز ترجیحی نهاده‌های دامی، حذف یا اصلاح شوند، به عنوان ابزاری تحلیلی برای تعیین قیمت تعادلی گوشت مرغ مورد استفاده قرار گیرد؛ به گونه‌ای که با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف نرخ نهاده‌ها، قیمتی شناسایی شود که ضمن حفظ سودآوری تولیدکنندگان، فشار اقتصادی غیرمتعارفی به مصرف‌کنندگان نهایی وارد نکند. استفاده از چنین مدل‌هایی در سطح کلان می‌تواند به نهادهای تصمیم‌گیر کمک کند تا با طراحی سیاست‌های حمایتی هدفمند، به بهبود بهره‌وری، افزایش سودآوری و ارتقای پایداری زنجیره تأمین مرغ گوشتی در شرایط رقابتی و ناپایدار بازار دست یابند. مدل حاضر بر جنبه اقتصادی متمرکز بوده و گسترش مدل به یک چارچوب چندهدفه که اهدافی مانند کاهش انتشار کربن و مدیریت پسماند را در کنار بهینه‌سازی سود دنبال کند، می‌تواند همسو با الزامات توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی عمل کند. توسعه مدل در چارچوب اقتصاد چرخشی و زنجیره تأمین سبز می‌تواند مدل را از یک چارچوب خطی به یک

بهبودسازی تصمیمات یکپارچه تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین مرغ گوشتی ...؛ طباطبائی و همکاران | ۱۶۱

سیستم چرخه‌ای و پایدار تبدیل کند. این مدل‌سازی، بازیافت و مدیریت صحیح ضایعات کشتارگاه‌ها، استفاده بهینه از کود مرغی در چرخه تولید محصولات کشاورزی و همچنین یکپارچه‌سازی معیارهای پایداری در انتخاب تأمین‌کنندگان در بر می‌گیرد. مدل توسعه داده شده یک مدل ایستا بوده و توسعه یک مدل پویا و چنددوره‌ای که دوره پرورش و قرنطینه مزرعه را لحاظ کند و اثرات تغییرات فصلی بر تقاضا، تأثیر شرایط آب‌وهوایی بر نرخ تلفات و عملکرد نژادهای مختلف در نظر بگیرد منجر به ایجاد یک مدل جامع‌تر خواهد شد.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

ORCID

Zahrasadat Tabatabaei

Mohammad Taghi Rezvan

Saeed Dehnavi



<https://orcid.org/0009-0008-7141-2957>



<https://orcid.org/0000-0002-0164-2094>



<https://orcid.org/0000-0003-0419-8344>

منابع

۱. حسینی دهشیری، سید جلال‌الدین، امیری، مقصود، الفت، لعی و پیشوایی، میرسامان. (۱۴۰۱). طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته کاغذسنگی با استفاده از برنامه‌ریزی محدودیت شانس انعطاف‌پذیر امکانی تصادفی استوار. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱(۱۲)، ۸۱-۴۵. <https://doi.org/10.52547/jimp.12.1.45>

References

2. Arabsheybani, A., Arshadi Khamseh, A., & Pishvae, M. S. (2024). Sustainable cold supply chain design for livestock and perishable products using data-driven robust optimization. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 19(4), 305-320. <https://doi.org/10.1080/17509653.2024.2331501>.
3. Brevik, E., Lauen, A. Ø., Rolke, M. C., Fagerholt, K., & Hansen, J. R. (2020). Optimisation of the broiler production supply chain. *International Journal of Production Research*, 58(17), 5218-5237. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1713415>.
4. Chaudhari, U., Bhadoriya, A., Jani, M. Y., Sarkar, B., & Sarkar, M. (2025). Controlling imperfect efficiency of live deteriorating products within a four-layer supply chain management. *RAIRO-Operations Research*, 59(4), 1803-1823. <https://doi.org/10.1051/ro/202504>.
5. Dorcheh, F. R., & Rahbari, M. (2023). Greenhouse gas emissions optimization for distribution and vehicle routing problem in a poultry meat supply chain in two phases: a case study in Iran. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 7(5), 1289-1317. <https://doi.org/10.1007/s41660-023-00339-6>.
6. Gafi, E. G., & Javadian, N. (2018). A system dynamics model for studying the policies of improvement of chicken industry supply chain. *International Journal of System Dynamics Applications (IJSDA)*, 7(4), 20-37. <https://doi.org/10.4018/IJSDA.2018100102>.
7. Hamilton, H., Henry, R., Rounsevell, M., Moran, D., Cossar, F., Allen, K., ... & Alexander, P. (2020). Exploring global food system shocks, scenarios and outcomes. *Futures*, 123, 102601. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102601>.
8. Hosseini Dehshiri, S. J., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvae, M. S. (2022). Stone Paper Closed-Loop Supply Chain Network Design using Robust Stochastic, Possibilistic and Flexible Chance-constrained Programming. *Journal of Industrial Management Perspective*, 12(1), 45-81. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/jimp.12.1.45>.
9. Hosseini Dehshiri, S. J., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvae, M. S. (2022). A Novel Robust Fuzzy Programming Approach for Closed-loop Supply Chain Network Design. *Industrial Management Journal*, 14(3), 421-457. <https://doi.org/10.22059/imj.2022.330096.1007865>.

10. Juwitaa, R., Rusdiana, S., & Ikhwan, M. (2024, September). *Optimizing Broiler Chicken Supply Chains Under Uncertain Average Growth Rate Acceleration*. In 2024 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICELTICs) (pp. 13-18). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICELTICs62730.2024.10776298>.
11. Kler, R., Gangurde, R., Elmiraev, S., Hossain, M. S., Vo, N. V., Nguyen, T. V., & Kumar, P. N. (2022). Optimization of meat and poultry farm inventory stock using data analytics for green supply chain network. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2022(1), 8970549. <https://doi.org/10.1155/2022/8970549>.
12. Muduli, S., Champati, A., Popalghat, H. K., Patel, P., & Sneha, K. R. (2019). Poultry waste management: An approach for sustainable development. *International Journal of Advanced Scientific Research*, 4(1), 8-14. https://www.researchgate.net/publication/332092544_Poultry_waste_management_An_approach_for_sustainable_development.
13. Mostaghim, N., Gholamian, M. R., & Arabi, M. (2024). A Resilient-Sustainable SCND Using Multiple Sourcing and Backup Facility Strategies in Iran's Broiler Network. *Advances in Industrial Engineering*, 58(1), 63-83. <https://doi.org/10.22059/aie.2024.363469.1878>.
14. Paredes-Rodríguez, A. M., Duque-Zúñiga, R. K., Valencia-Potes, J. B., Melo-Vallejo, J. D., & Peña-Orozco, D. L. (2024). Mathematical model for the design of a broiler chicken supply chain. *Revista Facultad de Ingeniería*, 33(69). <https://doi.org/10.19503/01211129.v33.n69.2024.17119>.
15. Petersen, S. O., Blanchard, M., Chadwick, D., Del Prado, A., Edouard, N., Mosquera, J., & Sommer, S. G. (2013). Manure management for greenhouse gas mitigation. *Animal*, 7(s2), 266-282. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000736>.
16. Naprom, S., Piewthongngam, K., & Chatavithet, P. (2018). Determination of size and quantity of chicken supply: a simulation-based optimization. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(4), 717-726. doi: 10.13031/aea.12649.
17. Okechukwu, C. E., Emmanuel, U. S., Okpala, C. C., & Ezechi, D. J. (2024). Optimization of Poultry Farm Production Planning for Maximum Returns Using Mixed-Integer Linear Programming Approach. *International Journal of Industrial and Production Engineering (IJIPE)*, 2(3), 1-14. <https://hal.science/hal-05069608v1>.
18. Satir, B., & Yıldırım, G. (2020). A general production and financial planning model: case of a poultry integration. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(8), 6803-6820. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04366-0>.
19. Setiawan, D., & Wijaya, H. A. (2025). Optimization of Broiler Chicken Harvest Scheduling using Integer Linear Programming: A Case Study. *Journal of Industrial Engineering and Halal Industries*, 6(1), 14-20. <https://doi.org/10.14421/jiehis.5125>.
20. Solano- Blanco, A. L., González, J. E., Gómez- Rueda, L. O., Vargas- Sánchez, J. J., & Medaglia, A. L. (2023). Integrated planning decisions in the broiler chicken

- supply chain. *International Transactions in Operational Research*, 30(4), 1931-1954. <https://doi.org/10.1111/itor.12861>.
21. Solano-Blanco, A. L., González, J. E., & Medaglia, A. L. (2023). Production planning decisions in the broiler chicken supply chain with growth uncertainty. *Operations Research Perspectives*, 10, 100273. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2023.100273>.
 22. Tahraoui, N., Sari, L. T., & Bennekrouf, M. (2020, December). Planning and synchronization of broiler production in a poultry network. In *2020 IEEE 13th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA49782.2020.9353910>.
 23. Tahraoui, N., Triqui-Sari, L., & Bennekrouf, M. (2024). Optimisation, planning and mutualisation of chicken production in a multi-supplier, multi-period, and multi-horizon poultry network: case study. *International Journal of Operational Research*, 50(1), 94-126. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2024.138146>.
 24. Tavárez, M. A., & Solis de los Santos, F. (2016). Impact of genetics and breeding on broiler production performance: a look into the past, present, and future of the industry. *Animal Frontiers*, 6(4), 37-41. <https://doi.org/10.2527/af.2016-0042>.
 25. Unveren, H., & Luckstead, J. (2020). Comprehensive broiler supply chain model with vertical and horizontal linkages: Impact of US-China trade war and USMCA. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 52(3), 368-384. <https://doi.org/10.1017/aae.2020.5>.
 26. Yazdekhashti, A., Wang, J., Zhang, L., & Ma, J. (2021). A multi-period multi-modal stochastic supply chain model under COVID pandemic: A poultry industry case study in Mississippi. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 154, 102463. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102463>.

References (In Persian)

1. Hosseini Dehshiri, S. J., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvaei, M. S. (2022). Designing a closed-loop supply chain network for stone paper using robust stochastic flexible possibilistic chance-constrained programming. *Industrial Management Perspective*, 1(12), 45-81. <https://doi.org/10.52547/jimp.12.1.45> (In Persian)

استناد به این مقاله: طباطبائی، زهرا سادات. رضوان، محمد تقی. دهنوی، سعید. (۱۴۰۵). بهینه‌سازی تصمیمات یکپارچه تأمین، تولید و توزیع در زنجیره تأمین مرغ گوشتی با در نظر گرفتن انواع نژادهای مرغ و تلفات، مدیریت صنعتی، ۲۳(۷۹)، ۱۶۴-۱۲۵. DOI: 10.22054/jims.2026.90597.3009



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.