Iranian Journal of Biosystem Engineering ISNN: 2423-7841
Homepage: http://ijbse.ut.ac.ir

# Identification and Analysis of Suitable Optimization Models for Designing the Supply Chain of Marine Cage Aquaculture under Uncertainty

**Hamid Sinisaz-Shahshahani[1], | Mohammad Sharifi[2], ✉ | Asadollah Akram[3], | Majid Khanali[4]**
1. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: sinisaz@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: m.sharifi@ut.ac.ir
3. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: aakram@ut.ac.ir
4. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: khanali@ut.ac.ir

## Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Dec. 29, 2025

**Revised:** Feb. 20, 2026

**Accepted:** March. 18, 2026

**Published:** Spring. 2026

**Keywords**:
**Marine cage aquaculture,**
**Multi-objective optimization,**
**Supply chain,**
**Uncertainty,**
**Weighted sum method**

Marine cage aquaculture along the southern coasts of Iran (Bushehr, Hormozgan, Khuzestan, and Sistan and Baluchestan) has experienced an annual growth rate of 15–20% in recent years and constitutes a key component of the national strategy to increase total aquaculture production to over 1.8 million tons. Hormozgan serves as the primary hub for marine species production; Bushehr produces approximately 14,000 tons with more than 20 active farms; Khuzestan targets 5,000 tons; and Sistan and Baluchestan benefits from the substantial potential of the Makran coast and the Oman Sea. Despite climatic constraints, infrastructural limitations, and market volatility, the sector's high regional capacity and governmental support have positioned it as a strategic pillar of sustainable fisheries development in Iran This study develops a scenario-based multi-objective mixed-integer linear programming (MILP) model to design the aquaculture supply chain under uncertainty. The model simultaneously addresses economic (minimization of total supply chain costs), social (maximization of sustainable employment), and environmental (reduction of fuel consumption and emissions) objectives. Uncertainty is incorporated through three scenarios—optimistic, moderate, and pessimistic. The model is implemented in Python using the PuLP library, and three solution approaches are compared: the ε-constraint method, the weighted-sum method, and robust optimization Findings indicate that the weighted-sum approach provides the most practical and balanced solution, activating only the strategic node of Chabahar. This configuration yields a total supply chain cost of approximately 7,418,500 million IRR, generates 390,000 sustainable jobs, and results in energy consumption of 830,000 GJ. In contrast, the ε-constraint and robust optimization methods fail to produce feasible solutions due to rigid constraints and high sensitivity to pessimistic scenarios, respectively. Accordingly, the weighted-sum method is recommended as a flexible and context-appropriate approach for southern Iran. However, the relatively high energy consumption underscores the need to increase the environmental weight ($w_3$=0.3) to enhance sustainability under uncertainty.

Cite this article: Sinisaz-Shahshahani, H., Sharifi, M., Akram, A., & Khanali, M. (2026). Identification and analysis of suitable optimization models for designing the supply chain of marine cage aquaculture under uncertainty, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 57 (1), 87-105. https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.408905.665634

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.408905.665634

# EXTENDED ABSTRACT

**Objective**

The primary objective of this study is to evaluate and compare various multi-objective optimization models for the design of a supply chain in marine cage aquaculture under conditions of uncertainty. The study focuses on achieving a balanced integration of three key objectives: economic efficiency (minimizing total costs), social sustainability (maximizing sustainable employment opportunities), and environmental responsibility (minimizing energy consumption and pollution levels). The overarching goal is to develop a resilient, efficient, and sustainable supply chain network that can adapt to the dynamic and uncertain conditions prevalent in the marine aquaculture industry. This is particularly relevant for the southern coastal regions of Iran, including the provinces of Hormozgan, Bushehr, Khuzestan, and Sistan and Baluchestan, which are characterized by a range of environmental, economic, and infrastructural challenges. These regions face significant uncertainties such as fluctuating market demands, climatic risks (e.g., temperature changes, storms, and sea level rise), limited production capacities, and inadequate infrastructure. By addressing these challenges, the study aims to support the formulation of long-term policies that promote sustainable development in the aquaculture sector.

The study emphasizes the importance of integrating multiple objectives into the supply chain design process. In traditional supply chain models, the focus is often on a single objective, such as cost minimization. However, in the context of marine cage aquaculture, it is essential to consider the interplay between economic, social, and environmental factors. For instance, while minimizing costs is crucial for the financial viability of the industry, it must be balanced against the need to create sustainable employment opportunities for local communities and to reduce the environmental footprint of aquaculture operations. Therefore, the study adopts a multi-objective approach to ensure that the supply chain design is not only economically efficient but also socially inclusive and environmentally responsible.

To achieve this, the research utilizes real-world data from both active and potential production nodes along the southern coasts of Iran. These nodes represent key locations where marine cage aquaculture can be implemented, and they vary in terms of geographical location, depth suitability, accessibility, and other relevant factors. By incorporating real data, the study ensures that the proposed models are grounded in practical realities and can be applied to actual industry conditions. This data-driven approach enhances the relevance and applicability of the findings, making them valuable for policymakers, industry stakeholders, and researchers.

The study also addresses the issue of uncertainty, which is a critical factor in the design of supply chains for marine aquaculture. Uncertainty can arise from various sources, including unpredictable changes in market demand, climate variability, and operational risks. To account for these uncertainties, the study employs a scenario-based approach, which allows for the evaluation of different possible future conditions. This approach enables the development of supply chain strategies that are robust and adaptable to a wide range of scenarios, thereby increasing the resilience of the aquaculture industry.

**Materials and Methods**

To achieve the objectives of the study, researchers developed and implemented a scenario-based multi-objective mixed-integer linear programming (MOMILP) model. This model is designed to incorporate the key uncertainties associated with marine cage aquaculture by considering three distinct scenarios: optimistic (increased demand), normal (stable conditions), and pessimistic (decreased demand with heightened risks). Each scenario represents a different possible future state of the industry, and the model evaluates the performance of the supply chain under each scenario to identify the most robust and effective solutions.

The MOMILP model was implemented in Python using the PuLP library, a powerful tool for solving linear programming problems. The model was used to evaluate and compare three different optimization approaches: the ε-constraint method, the weighted sum method, and robust optimization. Each of these methods has its own strengths and limitations, and the study aims to determine which method is most suitable for the specific context of marine cage aquaculture in Iran.

The ε-constraint method is a widely used approach in multi-objective optimization. In this method, one objective is selected as the primary objective to be optimized, while the other objectives are converted into constraints with specified bounds. This allows for the generation of a set of Pareto-optimal solutions, which represent the best possible trade-offs between the different objectives. However, the ε-constraint method can be computationally intensive, especially when dealing with a large number of constraints and variables.

The weighted sum method, on the other hand, is a more straightforward approach that aggregates the multiple objectives into a single objective function using predefined weights. In this study, the weights assigned to the economic, social, and environmental objectives were 0.5, 0.3, and 0.2, respectively. This method is computationally efficient and allows for the generation of a single optimal solution that reflects the priorities defined by the weights. However, the weighted sum method can be sensitive to the choice of weights, and it may not always produce a diverse set of solutions.

The third approach evaluated in the study is robust optimization, which is designed to find solutions that perform well across all scenarios. This method seeks to minimize the worst-case deviations from the optimal solution, ensuring that the supply chain remains effective even under the most adverse conditions. Robust optimization is particularly useful in situations where the level of uncertainty is high, as it provides a degree of protection against unexpected changes in the environment.

To ensure that the models are aligned with the local conditions of the southern coastal regions of Iran, the study analyzed data from 11 production nodes. These nodes were selected based on a range of factors, including their geographical location, depth suitability, accessibility, availability of subsidies, emission rates, and employment ratios. By considering these factors, the study ensures that the proposed supply chain strategies are tailored to the specific needs and constraints of the region. This localized approach enhances the practicality and feasibility of the solutions, making them more likely to be adopted by industry stakeholders.

**Results**

The results of the study reveal that the weighted sum method was the most effective approach for the multi-objective optimization of the marine cage aquaculture supply chain. This method successfully generated an optimal solution that activated a single key production node, such as Chabahar, to achieve a production capacity of 100,000 tons. The solution demonstrated a well-balanced trade-off between the three objectives: economic efficiency (controlled total costs), social sustainability (high employment generation), and environmental responsibility (manageable energy consumption). The weighted sum method was able to produce this solution in under 0.02 seconds of computation time, which is a significant advantage in terms of efficiency and practicality.

In contrast, the ε-constraint method proved to be infeasible in this context. The method was unable to generate a viable Pareto front due to the stringent bounds placed on the minimum employment and maximum energy consumption. While the method estimated a high potential for employment generation, the constraints imposed by the model made it impossible to find a feasible solution. This highlights the limitations of the ε-constraint method in situations where the trade-offs between objectives are highly constrained.

Similarly, the robust optimization approach also resulted in infeasibility under conservative regret thresholds. The method was sensitive to the pessimistic scenarios, which led to a lack of feasible solutions. This sensitivity suggests that the model may require parameter adjustments, such as relaxing the bounds on certain constraints or reducing the level of conservatism, to accommodate the regional capacities and risks. These findings indicate that while robust optimization is a valuable approach in uncertain environments, it may not always be the most practical solution for the specific context of marine cage aquaculture in Iran.

**Conclusion**

The weighted sum method has been identified as the most effective and practical approach for designing a multi-objective supply chain in marine cage aquaculture under conditions of uncertainty. This method not only provides balanced solutions that consider economic, social, and environmental objectives but also aligns well with the specific conditions of Iran's southern coastal regions. These areas face a unique set of challenges, including fluctuating market demands, environmental risks, and infrastructural limitations, which the weighted sum method effectively addresses by allowing for flexible prioritization through adjustable weights.

One of the key advantages of this method is its ability to adapt to different policy priorities by simply modifying the assigned weights to economic, social, and environmental goals. This flexibility enables decision-makers and stakeholders to tailor the supply chain design to their specific needs, whether it be maximizing employment, minimizing costs, or reducing environmental impact. As a result, the method supports the development of more resilient and adaptive aquaculture systems that can better withstand external shocks such as market volatility or climate-related disruptions.

Based on the findings, it is recommended that the weighted sum method be adopted as a standard tool for formulating sustainable aquaculture policies in Iran and other emerging economies facing similar challenges. Future improvements could involve integrating additional scenarios or hybrid optimization techniques to further enhance the model's robustness and applicability in diverse and complex environments.

**Funding**

The study was funded by the University of Tehran, Country Iran and Project No. 323390.6.26.

**Authorship contribution**

Conceptualization, M.Sh. and H.S.Sh.; methodology, H.S.Sh. and M.Sh.; software, H.S.Sh.; validation, M.Sh., H.S.Sh. and A.A.; formal analysis, M.Sh., H.S.Sh.; investigation, H.S.Sh.; resources, H.S.Sh. and M.Sh.; data curation, H.S.Sh.; writing - original draft preparation, H.S.Sh., M.Sh. and M. Kh.; writing - review and editing, H.S.Sh., M.Sh., A.A. and M.Kh.; visualization, H.S.Sh.; supervision, M.Sh. and A.A.; project administration, M.Sh.; funding acquisition, M.Sh.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Data availability statement**

Data available on request from the authors.

**Acknowledgements**

This research was conducted as part of the approved project No. 323390.6.26 by the Vice Presidency for Research and Technology, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran. We sincerely appreciate their financial and scholarly support. Additionally, we would like to express our appreciation to the Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, for providing us with essential technical and workshop facilities.

**Ethical considerations**

This study did not involve human or animal subjects, experimental procedures, or sensitive data; consequently, ethical approval was deemed unnecessary. The authors upheld the standards of academic integrity throughout the conduct and reporting of this research.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

مجله مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۵۷، شماره ۱ شاپا: ۷۸۴۱-۲۴۲۳
Homepage: http://ijbse.ut.ac.ir

# شناسایی و تحلیل مدل‌های بهینه‌سازی مناسب برای طراحی زنجیره تأمین پرورش ماهی در قفس دریایی در شرایط عدم قطعیت

حمید سینی‌ساز شهشهانی[۱] | محمد شریفی[۲]✉ | اسداله اکرم[۳] | مجید خانعلی[۴]

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: sinisaz@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: m.sharifi@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: aakram@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: khanali@ut.ac.ir

## اطلاعات مقاله

**نوع مقاله:** مقالهٔ پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۱۰/۸
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۲/۱
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۲/۲۷
**تاریخ انتشار:** بهار ۱۴۰۵

**واژه‌های کلیدی:**
آبزی‌پروری در قفس دریایی،
بهینه‌سازی چندهدفه،
زنجیره تأمین،
عدم قطعیت،
روش ترکیب وزن‌دار

## چکیده

پرورش ماهی در قفس دریایی در سواحل جنوبی ایران (بوشهر، هرمزگان، خوزستان و سیستان‌وبلوچستان) طی سال‌های اخیر با رشد سالانه ۱۵ تا ۲۰٪ در حال توسعه است. این فعالیت بخشی از برنامه ملی افزایش تولید آبزی‌پروری به بیش از ۱/۸ میلیون تن محسوب می‌شود. هرمزگان قطب اصلی تولید گونه‌های دریایی، بوشهر با حدود ۱۴،۰۰۰ تن تولید و بیش از ۲۰ مزرعه فعال، خوزستان با هدف ۵،۰۰۰ تن و سیستان‌وبلوچستان با پتانسیل بالای سواحل مکران و دریای عمان از نقاط کلیدی این طرح هستند. با وجود چالش‌های اقلیمی، زیرساختی و نوسانات بازار، ظرفیت بالای منطقه و حمایت‌های دولتی، این حوزه را به یکی از محورهای توسعه پایدار شیلات ایران تبدیل کرده است. در پژوهش حاضر، مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح چندهدفه سناریومحور برای طراحی زنجیره تأمین آبزی‌پروری در شرایط عدم قطعیت ارائه شده است. این مدل اهداف اقتصادی (کاهش هزینه کل زنجیره)، اجتماعی (افزایش اشتغال پایدار) و محیط‌زیستی (کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها) را هم‌زمان دنبال می‌کند. سه سناریوی خوش‌بینانه، معمولی و بدبینانه برای تحلیل عدم قطعیت‌ها در مدل وارد و پیاده‌سازی آن با استفاده از کتابخانه PuLP در محیط پایتون انجام شده است. سه روش «اپسیلون-محدودیتی»، «ترکیب وزن‌دار» و «بهینه‌سازی استوار» برای حل و مقایسه مدل به کار رفته‌اند. نتایج نشان داد روش ترکیب وزن‌دار با برقراری تعادل میان اهداف سه‌گانه، بهترین و عملی‌ترین راه‌حل را ارائه می‌دهد و یک گره کلیدی در چابهار را فعال می‌سازد. در این وضعیت هزینه کل زنجیره حدود ۷،۴۱۸،۵۰۰ میلیون ریال، اشتغال پایدار برابر با ۳۹۰،۰۰۰ نفر و مصرف انرژی ۸۳۰،۰۰۰ گیگاژول برآورد شد. در مقابل، دو روش دیگر به‌دلیل محدودیت‌های سخت یا حساسیت بالا نسبت به سناریوهای بدبینانه، فاقد راه‌حل قابل پذیرش بودند. در نهایت، روش ترکیب وزن‌دار به‌عنوان رویکرد برتر و انعطاف‌پذیر برای شرایط بومی جنوب ایران توصیه می‌شود. همچنین مصرف انرژی بالا، ضرورت افزایش وزن هدف محیط‌زیستی ($w_3$=0.3) را جهت ارتقای پایداری در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

استناد: سینی‌ساز شهشهانی، حمید؛ شریفی، محمد؛ اکرم، اسداله و خانعلی، مجید (۱۴۰۵). شناسایی و تحلیل مدل‌های بهینه‌سازی مناسب برای طراحی زنجیره تأمین پرورش ماهی در قفس دریایی در شرایط عدم قطعیت، *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۷ (۱)، ۱۰۵-۸۷.
https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.408905.665634

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.408905.665634

## مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش تقاضا برای منابع‌طبیعی و افزایش تقاضا برای امنیت غذایی جهانی، آبزی‌پروری را به یکی از سریع‌ترین صنایع در حال رشد در بخش کشاورزی تبدیل کرده است (Price et al., 2015). هم‌زمان، آبزی‌پروری در قفس دریایی به‌عنوان یک روش تولیدی برای تولید آبزی، به‌طور گسترده‌تری در کشورهای دارای منابع آبی رواج یافته است (Sievers et al., 2022). با استفاده از مناطق آبی آزاد و فراهم کردن محیط‌های نسبتاً طبیعی برای رشد گونه‌های مختلف، این روش نه‌تنها سازگار با محیط‌زیست است، بلکه از نظر اقتصادی و تولیدی نیز بسیار ارزشمند است (Islam, 2005). با این‌حال، پیچیدگی عملیات، ماهیت پویا و چندبعدی عملیات آبزی‌پروری در دریا و آسیب‌پذیری در برابر شرایط محیطی متنوع، باعث ایجاد عدم قطعیت زیادی در عملیات زنجیره تأمین در این صنعت شده است (Price et al., 2015).

زنجیره تأمین صنعت آبزی‌پروری در قفس دریایی شامل شبکه‌ای از بازیگران و اقدامات از تأمین نهاده‌های اولیه (مانند خوراک و تجهیزات قفس، بچه ماهی)، پرورش در دریا، تا فرآوری، بسته‌بندی، توزیع و تحویل محصول نهایی در بازار است (Rowan, 2023). تمام این مراحل توسط محرک‌های مختلفی مانند تغییرات اقلیمی، نوسان در قیمت نهاده‌ها، عدم قطعیت بیولوژیکی مانند مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های همه‌گیر یا انبوه، محدودیت‌های نظارتی، تحریم‌های صادراتی، ظرفیت بندرها و زیرساخت‌ها و تغییر تقاضای مصرف‌کنندگان هدایت می‌شوند (Asche et al., 2018). توسعه یک شبکه زنجیره تأمین بهینه و تطبیقی که بتواند چنین عدم قطعیتی را برآورده کند، از اولویت بالایی برای توسعه پایدار صنعت برخوردار است (Vlachos & Malindretos, 2023). یکی از موارد مهم در برنامه‌ریزی این نوع شبکه، شناسایی و کمّی‌سازی منابع عدم قطعیت است (Vlachos & Malindretos, 2018). منابع عدم قطعیت در زنجیره ارزش آبزی‌پروری در قفس دریایی، متغیرهای تصادفی (مانند دمای آب، جریان اقیانوسی یا نرخ رشد ماهی)، وضعیت‌های آینده (نوسانات بازار و تغییر سیاست دولت) یا پاسخ رقابتی سایر تولیدکنندگان هستند. برای مدیریت این وضعیت‌ها، بسیار مهم است که فنون علمی مانند برنامه‌نویسی قوی، بهینه‌سازی تصادفی، تحلیل سناریو و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در سامانه اعمال شوند تا الگوهای رفتاری پیچیده آینده در شبکه قابل پیش‌بینی باشند (Gladju et al., 2022).

در مؤلفه جغرافیایی، محل قفس‌ها، کارخانه‌های فرآوری و تأسیسات توزیع تأثیر قابل‌توجهی بر کارایی شبکه دارد. این مکان‌ها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که علاوه بر کاهش هزینه، ریسک محیط‌زیستی و خطر عوامل بیماری‌زا نیز کاهش یابد. علاوه بر این، مقررات محیط‌زیستی و منطقه‌ای، دسترسی به زیرساخت‌های حمل‌ونقل و نزدیکی به بازارهای مصرف نیز در این انتخاب‌ها نقش دارند (Price et al., 2015). در بعد زمانی، پویایی زنجیره تأمین آبزی‌پروری بسیار حیاتی است. چرخه‌های زندگی ماهی، دوره رشد، فصلی بودن تغییر تقاضا، برنامه‌ریزی ماهی‌گیری و فرآوری و برنامه‌ریزی حمل‌ونقل تنها تعدادی از متغیرهای وابسته به هم هستند که بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند و برنامه‌ریزی را در این حوزه پیچیده می‌کنند (Sievers et al., 2022). همچنین هماهنگی بین اجزای مختلف زنجیره به‌گونه‌ای موردنیاز است که اختلال یا تأخیر در یک بخش منجر به ایجاد اختلال در کل زنجیره نشود (Islam, 2005). ازنظر اقتصادی، نوسانات شدید در هزینه‌های خوراک، نرخ حمل‌ونقل، نرخ ارز و سیاست‌های تعرفه‌ای از جمله چالش‌های اصلی هستند که مستقیماً بر سودآوری شبکه تأثیر منفی می‌گذارند. علاوه بر این، چالش‌های مربوط به دسترسی به سرمایه، بیمه ریسک و ابزارهای پوشش مالی نیز بر طراحی شبکه در اقتصادهای نوظهور تأثیر می‌گذارند (Price et al., 2015). درحالی‌که طراحی شبکه باید هم‌زمان بر توجیه اقتصادی پروژه و همچنین مقاومت آن در برابر شوک‌های اقتصادی تمرکز کند، بعد محیط‌زیستی نیز برجسته‌تر می‌شود. انتشار زباله، تأثیرات بر محیط‌های محلی، فرار ماهی‌های پرورشی و تداخل ژنتیک با جمعیت‌های بومی، همگی معیارهایی هستند که باید در برنامه‌ریزی شبکه در نظر گرفته شوند. در این راستا، استفاده از مدل‌های چندمعیاره پایداری و شاخص‌های عملکرد محیط‌زیستی مانند ردپای کربن، مصرف آب و تأثیر بر تنوع زیستی به تصمیم‌گیری آگاهانه کمک خواهد کرد (Halwart et al., 2007). ازنظر فناوری، پیشرفت در حسگرهای هوشمند، اینترنت اشیاء، تجزیه و تحلیل کلان‌داده و ربات‌های دریایی نیز برای کنترل کیفیت و نظارت بر شرایط آبزی‌پروری کمک‌کننده هستند. ادغام این فناوری‌ها در زنجیره تأمین، همان جایی است که پتانسیل افزایش بهره‌وری، کاهش تلفات و بهبود شفافیت در آن نهفته است. این فناوری‌ها می‌توانند به‌طور یکسان برای اقدام پیشاپیش در برابر اتفاقات غافلگیرکننده مورد استفاده قرار گیرند (Tacon[1] et al., 2007). در سطح اجتماعی، موضوع ایجاد شغل، ادغام با جوامع میزبان، توجه به حقوق کار و کمک به قابلیت‌های محلی باید در نظر گرفته شود. یک زنجیره تأمین موفق در این صنعت، با توجه به این‌که هدف آن ایجاد حداکثر سود اقتصادی است، باید خود را با ارزش‌های توسعه پایدار اجتماعی نیز همسو کند. به‌کارگیری رویکردهای مشارکتی در برنامه‌ریزی شبکه و مشارکت دادن ذی‌نفعان محلی، ازجمله ماهی‌گیران، دولت و محیط‌زیست، می‌تواند جذب و اجرای بهتر پروژه‌ها را افزایش دهد (Beveridge, 2008).

از دیدگاه ریاضی، نیاز به برنامه‌ریزی یک شبکه زنجیره تأمین آبزی‌پروری دریایی در شرایط عدم قطعیت با پیاده‌سازی مجموعه‌ای از ابزارهای پیشرفته و روش‌های تحلیلی جدید وجود دارد که قادر به شبیه‌سازی کافی و دقیق پیچیدگی در زنجیره باشند (Luna et al., 2023). پویایی محیط‌های ساحلی، وابستگی گسترده به شرایط اقلیمی، بیولوژیکی و اقتصادی برای فرآیندها، و ناهمگونی بالای بازیگران و اهداف در زنجیره، استفاده از فنون بهینه‌سازی چندهدفه را برای بررسی مسائل اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی در تصمیم‌گیری ضروری می‌سازد (Chamberlain & Stucchi, 2007). این فن‌ها امکان بررسی بده بستان‌های هزینه و سود، بده بستان‌های ریسک و انعطاف‌پذیری، و بده بستان‌های کارایی و پایداری را فراهم می‌کنند. در مقابل، پارامترهای مختلف زنجیره تأمین آبزی‌پروری، یعنی نرخ تلفات، دمای آب، تقاضا یا نرخ رشد ماهی، نه‌تنها تصادفی هستند، بلکه ماهیت نامشخصی نیز دارند (Wang et al., 2024). در این زمینه، مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی و مبتنی بر سناریو می‌توانند برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت مفید باشند. این مدل‌ها، هنگام توصیف توزیع احتمالی متغیرها یا تعداد حالت‌های احتمالی آینده، شبکه‌هایی ایجاد می‌کنند که در طیف وسیعی از شرایط ممکن با موفقیت عمل کنند (Wang et al., 2024).

تعاملات غیرخطی، پویایی اجزای زنجیره و بازخوردهای زمانی، استفاده از روش‌های شبیه‌سازی سامانه پیچیده مانند پویایی سامانه یا مدل‌سازی مبتنی بر عامل می‌تواند به قضاوت در مورد رفتار بلندمدت شبکه و پاسخگویی به شوک‌های دنیای خارج کمک کند (Luna et al., 2023). آن‌ها به‌ویژه در شناسایی گلوگاه‌های عملکرد و آزمایش با سیاست‌های مدیریتی مختلف مفید هستند. علاوه بر روش‌های کمی، می‌توان از تحلیل کیفی و دانش دامنه با استفاده از ابزارهایی مانند فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی، روش دلفی یا تحلیل محتوای کیفی برای تکمیل مدل‌سازی و اطمینان از مشارکت تجربه عملی و همچنین آگاهی زمینه‌ای در طراحی استفاده کرد. این رویکرد بین‌رشته‌ای و ترکیبی همچنین می‌تواند به مشارکت فعال ذی‌نفعان در فرآیند طراحی کمک کند (Chamberlain & Stucchi, 2007). اتخاذ تفکر سیستمی و دیدگاه جامع در برنامه‌ریزی شبکه‌های زنجیره تأمین ضروری است، زیرا تنها با آن می‌توان به تحقق روابط بین سطحی، هم‌افزایی بین اجزا و تعاملات سیاست-فرآیند دست یافت. این رویکرد با ادغام اطلاعات مهندسی، اقتصاد، محیط‌زیست، سیاست‌گذاری و فناوری اطلاعات، ایجاد یک مدل جامع برای طراحی، اجرا و ارزیابی شبکه زنجیره تأمین آبزی‌پروری در قفس دریایی را تسهیل می‌کند. این مدل علاوه بر پرداختن به نیازهای علمی و تحقیقاتی، به‌عنوان ابزاری مفید برای سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان جهت توسعه پایدار، تاب‌آوری و پاسخگو در این بخش عمل خواهد کرد.

هدف اصلی از انجام این تحقیق، شناسایی و تحلیل مدل‌های بهینه‌سازی مناسب برای طراحی زنجیره تأمین پرورش ماهی در قفس در شرایط عدم قطعیت، متناسب با ویژگی‌های بومی و ظرفیت‌های جنوب کشور به‌منظور نیل به طراحی یک مدل بهینه و یکپارچه برای زنجیره تأمین پرورش ماهی در قفس‌های دریایی در سواحل جنوبی ایران، با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و ابعاد سه‌گانه پایداری (اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی) به‌منظور بیشینه‌سازی سود یا کمینه‌سازی هزینه تولید، بهبود توزیع اشتغال محلی، و کاهش مصرف انرژی است.

## پیشینه پژوهش

تحقیقات مختلفی به بررسی موضوع مشابه این مطالعه پرداخته‌اند. در ادامه خلاصه‌ای از این تحقیقات ارائه می‌شود:

تاکنون هیچ پژوهش دانشگاهی یا مقاله علمی در ایران به طور خاص به طراحی زنجیره تأمین آبزی‌پروری در قفس‌های دریایی با رویکردهایی نظیر عدم قطعیت، پایداری و تاب‌آوری نپرداخته است. مقالات بین‌المللی در این حوزه نیز محدود هستند. بنابراین، برای ارائه سوابق علمی، به تحقیقات مشابه در زنجیره‌های تأمین محصولات غذایی دیگر، به ویژه گوشت و آبزی‌پروری، استناد شده است.

در ایران، میرزایی و همکاران (۱۴۰۰) موانع زنجیره تأمین پایدار گوشت مرغ را با تئوری بنیانی بررسی کردند و نشان دادند که شناسایی مشکلات لجستیکی و بازاریابی می‌تواند نوسانات قیمت را کاهش دهد، در حالی که اثرات محیط‌زیستی منفی مشهود است. ذگردی و شهیدی (۱۴۰۱) زنجیره تأمین گوشت قرمز را با هزینه‌های انتشار کربن و قراردادهای اشتراک درآمد، هزینه و تبلیغات مشارکتی مدل‌سازی کردند؛ این قراردادها سود کلی زنجیره را افزایش می‌دهند و تولید سبز و پاک را ارتقاء می‌بخشند. کلهر (۱۴۰۱) شبکه تأمین سوخت زیستی نسل دوم را تحت عدم قطعیت با برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه و رویکرد تصادفی فازی با تمرکز بر تاب‌آوری و مسئولیت اجتماعی طراحی کرد. علیزاده و همکاران (۱۴۰۲) زنجیره ارزش گوشت گوساله در مشهد را با پویایی سامانه شبیه‌سازی کردند و افزایش قیمت فراتر از انتظار را به کاهش جمعیت دام مولد نسبت دادند. مستقیم و همکاران (۱۴۰۴) زنجیره تأمین جوجه مرغ را با عدم قطعیت و انتشار $CO_2$ بهینه کردند و انعطاف‌پذیری و پایداری را بهبود بخشیدند. در سطح بین‌المللی،

تحقیقات مستقیم‌تر بر آبزی‌پروری متمرکز هستند.

Yeni et al. (2025) راهبردهای کاهش ریسک در زنجیره تأمین ماهی سالمون ترکیه را با ابزارهای ناب و برنامه‌ریزی تصادفی بررسی کردند؛ مدل دومرحله‌ای هزینه‌ها را حداقل می‌کند و ابزارهای ناب تاب‌آوری را در برابر اختلالات طبیعی و فرار ماهی افزایش می‌دهد. Mangano et al. (2022) تأثیر کووید-۱۹ بر زنجیره تأمین جهانی آبزی‌پروری را تحلیل کردند و با ارائه پیشنهاد اقدامات مدیریتی، حمل‌ونقل و مواد اولیه را آسیب‌پذیرترین بخش‌ها دانستند. De et al. (2022) زنجیره تأمین سالمون نروژی را در آن کشور با مدل برنامه‌ریزی خطی برای کاهش کربن و هزینه‌ها بهینه کردند. Mosallanezhad et al. (2023) زنجیره تأمین میگو را با الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای پایداری و کاهش ضایعات در سطح بین‌المللیو برای همه کشورها مدل‌سازی و پیشنهاد کردند. Vanany et al. (2024) زنجیره تأمین معکوس ماهی در اندونزی را با تمرکز بر محصولات جانبی و حساسیت به عرضه و قیمت از منظر اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی بررسی کردند. Taskov (2023) در رساله دکترای خود، رقابت‌پذیری زنجیره ارزش آبزی‌پروری در اروپا و بریتانیا را با روش ترکیبی تحلیل کرد و بر تمایز محصولات و جهت‌گیری بازاری تأکید نمود.Vijay & raju (2023) زنجیره تأمین در ایالت کرالا در کشور هندوستان را با روش ترکیبی بررسی کرد و گرایش کارآفرینانه و لجستیک یکپارچه را کلید تاب‌آوری دانست. Nuchmorn (2021) حاکمیت هیبریدی در پرورش ماهی تیلاپیا در کشور تایلند را مطالعه کرد و ریسک‌های قراردادی و محیط‌زیستی را تهدیدکننده پایداری دانست. Sievers et al. (2021) چالش‌های محیط‌زیستی قفس‌های غوطه‌ور را در سطح بین‌المللی مرور کردند و گونه‌های ماهی خاصی (کیسه شنا) را مناسب‌تر ارزیابی نمودند. Mohd Noor et al. (2019) هزینه‌های پرورش گونه ماهی سی‌باس آسیایی در کشور مالزی را با مدل تصادفی تحت عدم قطعیت مرگ‌ومیر تخمین زدند و بهبود FCR را پیشنهاد کردند. Mendoza Beltran et al. (2018) مزایای پرورش آبزی‌پروری تلفیقی (IMTA) در سواحل کشور ایتالیا را با روش ارزیابی چرخه عمر (LCA) و عدم قطعیت از منظر محیط‌زیستی تحلیل کردند. Price et al. (2015) اثرات محیط‌زیستی قفس‌های دریایی را در سطح بین‌المللی مروری کردند و مدیریت نوین را مؤثر اما نیازمند پژوهش منطقه‌ای دانستند. Olsson (2012) مدیریت ریسک در گروه Rauma کشور نروژ را بررسی کرد و یکپارچگی عمودی را کلیدی دانست. Vlachos & Malindretos (2019) مهندسی مجدد پایدار زنجیره در آبزی‌پروری‌های موجود در سواحل کشورهای مجاور با دریای مدیترانه را برای کاهش عدم قطعیت پیشنهاد کردند. Chamberlain & Stucchi (2007) عدم قطعیت در مدل ضایعات را در ایالت بریتیش کلمبیای کشور کانادا شبیه‌سازی کردند و خوراک تلف‌شده را عامل اصلی رسوب دانستند.

این پیشینه نشان‌دهنده خلأ پژوهشی اختصاصی در ایران و همچنین مطالعات مشابه بین‌المللی با رویکردهای عدم قطعیت، پایداری و تاب‌آوری و همچنین نیاز به مدل‌های یکپارچه برای قفس‌های دریایی است.

## روش‌شناسی پژوهش

روش این تحقیق به صورت کمّی و بر مبنای داده‌های موجود در سازمان دولتی شیلات ایران مرتبط با ۱۱ گره تولیدی (مراکز تولید) سواحل جنوبی ایران گردآوری شده است. در این مطالعه سه مدل به عنوان مبنای ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. در این مطالعه ارزیابی ها بر اساس سه شاخص اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی مورد بررسی قرار گرفته است. بخشی از پارامترهای موثر در الگوی مورد بررسی در قالب مرور ادبیات و پروژه های امکان سنجی استخراج گردید. در این بخش با مراجعه به خبرگان علاوه بر تایید یا رد این پارامترها، پارامترهای جدیدی که در این ارزیابی ها صورت نگرفته است که بر اساس نظرات خبرگان دارای بالاترین فراوانی تکرار در نظرات خبرگان بوده است به این موارد اضافه گردید. خ نهایتا پارامترهای ارائه شده در جدول شماره ۱ به عنوان پارامترهای نهایی مورد مطالعه در این تحقیق استفاده شده است. شایان ذکر است تعداد ۱۲ خبره دارای تحصیلات کارشناسی ارشد و بالاتر و دارای حداقل ۵ سال سابقه کاری در بخش پرورش آبزی در قفس با قلمرو کاری در حیطه سواحل جنوب به منظور این بررسی و تحلیل های آتی در قالب گروه کانونی مورد نظر سنجی قرار گرفته اند.

در این مطالعه، هزینه کل زنجیره تأمین (Z1) از مجموع هزینه‌های ثابت احداث گره فعال، هزینه‌های متغیر و تولید در دوره‌های مختلف و سناریوهای عدم قطعیت، هزینه حمل‌ونقل جریان‌های محصول، واردات نهاده‌ها، مدیریت ضایعات، ردیابی و جریمه کمبود تقاضا تشکیل شده که پس از کسر یارانه دریافتی گره فعال (به‌ویژه یارانه قابل توجه در مناطق محروم) محاسبه می‌گردد و در روش ترکیب وزن‌دار با فعال‌سازی تنها یک گره کلیدی به حداقل ممکن رسیده است. تعداد شغل ایجادشده (Z2) به صورت مستقیم از ضرب ظرفیت تولید فعال‌شده در نرخ اشتغال‌زایی گره مربوطه به‌دست آمده و عمدتاً شامل مشاغل مستقیم در مزرعه، عملیات قفس، نگهداری، برداشت و حمل اولیه است، در حالی که بخشی نیز تأثیر غیرمستقیم بر جامعه محلی را در بر می‌گیرد. مصرف انرژی کل (Z3) نیز با ضرب ظرفیت

تولید در مصرف انرژی به ازای هر تن تولید در گره فعال محاسبه شده و عمدتاً مصرف مستقیم در فرآیندهای تولید (مانند پمپاژ، هوادهی و عملیات قایق‌رانی) را نشان می‌دهد، هرچند سهم انرژی حمل و نهاده‌ها نیز در مدل لحاظ گردیده اما وزن کمتری داشته است؛ همه این مقادیر به طور خطی درون مدل بهینه‌سازی PuLP و بر اساس داده‌های واقعی پارامترهای گره‌ها محاسبه شده‌اند.

**جدول ۱. پارامترهای نهایی الگوهای مورد بررسی در زنجیره تأمین بر اساس ادبیات تحقیق و نظرات خبرگان**

| دسته‌بندی | نماد | تعریف | نوع/واحد | منبع |
|---|---|---|---|---|
| اقتصادی و بازار | FCx | هزینه ثابت احداث یا فعال‌سازی گره x | ریال (میلیاردی، e.g., ۵۰–۱۰۰) | گزارش شیلات ۱۴۰۳؛ برای Ux |
| | VCx,t,s | هزینه متغیر فعالیت گره x در دوره t و سناریوی s | ریال/تن (e.g., ۱۰–۲۰) | نوسان ±۱۵٪ در S؛ شامل عملیاتی |
| | PCx,t,s | هزینه تولید در گره x در دوره t و سناریوی s | ریال/تن (e.g., ۱۵–۳۰) | شامل خوراک؛ بر اساس YIELDx |
| | TCxylt | هزینه حمل از گره x به y با روش l در دوره t | ریال/km/تن (e.g., ۰٫۵–۱) | بر اساس DISTxy و GHG_FACTORl |
| | ICv,t | هزینه واردات نهاده از گره v در دوره t | ریال/تن (e.g., ۲۰–۴۰) | از V/E؛ نوسان قیمت |
| | PRICEq,t | قیمت فروش محصول نهایی در بازار q در دوره t | ریال/تن (e.g., ۱۰۰–۱۵۰) | نوسان ±۱۰٪؛ برای Z۱ |
| | WMCxt | هزینه مدیریت ضایعات در گره x | ریال/تن (e.g., ۵–۱۰) | برای W؛ شامل بازیافت |
| | TAX | نرخ مالیات بر درآمد مرکز | درصد (e.g., ۲۵٪) | ثابت؛ در NPSC |
| | SUBx | یارانه دریافتی مرکز x (در صورت وجود) | ریال (میلیاردی، e.g., ۱۰–۵۰) | محلی؛ بر اساس DEV_INDEXx |
| | DEMANDqts | تقاضای بازار q در دوره t و سناریوی s | تن (e.g., ۵۰۰–۲۰۰۰، ±۲۰٪) | از جدول Q؛ برای DSR |
| | PLANLTYqt | جریمه ناشی از تأمین نکردن تقاضای بازار q | ریال/تن (e.g., ۵۰–۱۰۰) | برای کمبود SHORTAGEq,t |
| | PRICE_FLOOR | حداقل قیمت فروش تنظیم‌شده توسط سیاست‌گذار | ریال/تن (e.g., ۸۰) | تنظیم بازار؛ در Z۱ |
| | EXP_QUOTA | سهمیه صادراتی برای ماهی یا فرآورده‌ها | تن/سال (e.g., ۱۰–۲۰٪) | برای صادرات؛ در محدودیت ۳–۱۲ |
| | SUB_PRIORITYx | اولویت منطقه‌ای تخصیص یارانه برای x | ضریب (۰–۱، e.g., ۰٫۷) | بر اساس DEV_INDEXx؛ برای SUBx |
| | RECOVERY_COSTw | هزینه جمع‌آوری و بازیافت ضایعات از گره W | ریال/تن (e.g., ۱۰–۱۵) | ۲۰۲۳FAO؛ نرخ بازیافت ۲۰–۳۰٪ |
| | ROIx | نرخ بازگشت سرمایه برای گره x | درصد/سال (e.g., ۱۵–۲۵٪) | از NPSC/FCx؛ مطالعات ایرانی |
| | TRACING_COST | هزینه ردیابی و traceability محصولات در زنجیره | ریال/تن (e.g., ۲–۵) | برای پایداری traceable؛ ۲۲۰۰۵ISO |
| اجتماعی و منطقه‌ای | EMP_RATEx | نرخ اشتغال ایجادشده در گره x به ازای هر واحد تولید | شغل/تن (e.g., ۴–۱۰) | برای Z۲؛ ILO |
| | DEV_INDEXx | شاخص توسعه یا محرومیت منطقه‌ای گره x | ضریب (۰–۱، e.g., ۰٫۶–۰٫۹) | برای LEI؛ HDI استانی |
| | SALARYx | میانگین دستمزد در مرکز x | ریال/ماه (e.g., M۱۰–۱۵) | برای عدالت؛ حداقل دستمزد |
| | POP_DENSITYx | تراکم جمعیت منطقه گره x | نفر/km² (e.g., ۱۰۰–۵۰۰) | برای توزیع؛ سرشماری |

| دسته‌بندی | نماد | تعریف | نوع/واحد | منبع |
|---|---|---|---|---|
| | LOCAL_SUPPORTx | ضریب پذیرش اجتماعی محل برای احداث مرکز x | ضریب (۰–۱، e.g., ۰٫۸–۰٫۹) | نظرسنجی؛ stakeholder |
| | SAFETY_INDEXx | شاخص ایمنی و بهداشت کارگران در x | ضریب (۰–۱، e.g., ۰٫۷–۰٫۹) | استانداردهای ILO؛ OSHA |
| | COMMUNITY_IMPACTx | تأثیر بر توسعه جامعه محلی (اشتغال غیرمستقیم) | شغل/تن (e.g., ۲–۵) | با LEI؛ مطالعات محلی |
| محیط‌زیستی | EMISSxylt | آلایندگی حمل از x به y با روش l در دوره t | تن CO۲km//تن (e.g., ۰٫۱–۰٫۲) | برای ۳Z؛ IPCC |
| | ENx | انرژی مصرفی برای تولید در گره x | GJ/تن (e.g., ۵–۱۰) | برای ETI؛ LCA |
| | RISKn | شاخص زیست‌محیطی و ریسک مکان قفس دریایی n (عمق، جریان آب، فاصله ساحل) | ضریب (۰–۱، e.g., ۰٫۱–۰٫۴) | bathymetry؛GIS |
| | WUSEX | مصرف آب در فرآیند تولید گره x | m³/تن (e.g., ۱۰–۲۰) | برای پایداری؛ FAO |
| | GHG_FACTORl | ضریب انتشار گاز گلخانه‌ای روش l | kg CO2/km (e.g., ۰٫۲–۰٫۵) | IPCC؛ برایL |
| | NUTRIENT_DISCHARGE | انتشار مواد مغذی (N/P) از قفس x | kg/تن (e.g., ۱۰–۲۰) | ۲۰۲۳FAO؛ eutrophication |
| | WATER_QUALITY_IMPACT | تأثیر بر کیفیت آب محلی (شاخص eutrophication) | ضریب (۰–۱، e.g., ۰٫۲–۰٫۵) | بر اساس RISKn؛ مدل‌های GIS |
| | BIODIVERSITY_RISK | ریسک بر تنوع زیستی دریایی در مکان n | ضریب (۰–۱، e.g., ۰٫۱–۰٫۳) | مطالعات GIS؛ habitat |
| | CARBON_FOOTPRINTx | ردپای کربن کل در گره x (جدید) | kg CO2/تن (e.g., ۵۰–۱۰۰) | LCA؛ ازEMISSxylt + ENx |
| | SEDIMENT_IMPACTn | تأثیر رسوب‌گذاری در بستر دریایی مکان n (جدید) | kg/m²/سال (e.g., ۱–۵) | sediment models؛FAO |
| | ESCAPE_RATEx | نرخ فرار ماهی از قفس x (جدید) | درصد (e.g., ۱–۳٪) | OIE؛ برایYIELDx |
| | OXYGEN_DEPLETIONt | کاهش سطح اکسیژن در آب اطراف قفس در دوره t (جدید) | mg/L (e.g., ۲–۵) | operational؛DO models |
| | TEMPERATURE_RISKt | ریسک افزایش دما و استرس حرارتی در دوره t (جدید) | °C/سال (e.g., ۰٫۵–۱) | IPCC؛ برای WEATHER_RISKt |
| | HABITAT_DISRUPTION | اختلال در زیستگاه‌های دریایی محلی (جدید) | ضریب (۰–۱، e.g., ۰٫۱–۰٫۴) | GIS؛biodiversity indices |
| | RECYCLED_WATER_RATIO | نسبت آب بازیافتی در فرآیند x (جدید) | درصد (e.g., ۳۰–۵۰٪) | FAO؛circular economy |

**روش اپسیلون-محدودیتی**[1]

در این روش، یکی از توابع هدف به‌عنوان هدف اصلی باقی می‌ماند و سایر توابع به صورت محدودیت‌های مقید به کران ε وارد مدل می‌شوند.

فرض می‌شود سه تابع هدف وجود دارد:

تابع هدف اقتصادی: Z1

تابع هدف اجتماعی: Z2

1. ε-Constraint

تابع هدف محیط‌زیستی: Z3

فرمول کلی به‌صورت رابطه (۱) خواهد بود:

$\min Z1(x)$ (رابطه ۱)

$Z2(x) \le \varepsilon_2$

$Z3(x) \le \varepsilon_3$

s.t. (تمام محدودیت‌های ساختاری و عملیاتی)

که در آن:

$\varepsilon_2$ حداقل مقدار قابل قبول برای اشتغال

$\varepsilon_3$ حداکثر مقدار قابل قبول برای آلایندگی یا مصرف انرژی

این روش اجازه می‌دهد که از طریق تغییر مقدار ε، جبهه پارتو[1]ترسیم و تحلیل شود.

**روش ترکیب وزن‌دار[2]**

در این روش، چند تابع هدف به صورت ترکیب خطی با ضرایب وزنی مشخص، در قالب یک تابع هدف به‌صورت رابطه (۲) تجمیع می‌شوند:

$$min\ Z(x) = w1 \cdot Z1(x) - w2 \cdot Z2(x) + w3 \cdot Z3(x)$$ (رابطه ۲)

که در آن:

w1, w2, w3: ضرایب وزنی مربوط به اهمیت هر تابع هدف (به‌طوری‌که ∑wi=1)

تابع اجتماعی که باید بیشینه شود، در صورت لزوم به شکل منفی وارد مدل می‌شود تا با سایر توابع (که باید کمینه شوند) هماهنگ گردد.

**مدل چندسناریویی با حداقل حداکثر زیان**

در این حالت هدف آن است که بدترین پشیمانی[3]بین تمام سناریوها به حداقل برسد که در رابطه (۳) دیده می‌شود:

$$minmax_{s\in S}[\ Zs(x) - Z_S^*\ ]$$ (رابطه ۳)

که در آن:

Zs(x): مقدار تابع هدف در سناریوی s

Zs: مقدار بهینه تابع هدف در سناریوی s

هدف: کمینه‌سازی بیشترین پشیمانی نسبت به بهینه‌ترین حالت ممکن در هر سناریو

**روش بهینه‌سازی استوار[4]**

در این حالت، هدف یافتن راه‌حلی است که در تمام سناریوها عملکرد قابل قبولی داشته باشد. این هدف در رابطه (۴) نشان داده شده است:

$$minmax_{s\in S}Z_1(x,s)$$ (رابطه ۴)

در این پژوهش، برای طراحی بهینه زنجیره تأمین پرورش ماهی در قفس دریایی تحت شرایط عدم قطعیت، از چهار روش حل چندهدفه شامل اپسیلون-محدودیتی، ترکیب وزن‌دار، بهینه‌سازی استوار و مدل حداقل حداکثر پشیمانی استفاده می‌شود. هدف از به‌کارگیری این روش‌ها، ارزیابی پاسخ‌های مدل در مواجهه با چندین تابع هدف متضاد (اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی) و شرایط غیرقطعی تقاضا، قیمت‌ها و ظرفیت‌ها است. این چهار رویکرد هر یک ویژگی‌های خاص خود را در تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره دارند و می‌توانند دیدگاه‌های متفاوتی را نسبت به عملکرد سامانه فراهم کنند.

در گام اول، مدل با استفاده از روش اپسیلون-محدودیتی حل می‌شود. در این روش، یکی از توابع هدف (مثلاً تابع اقتصادی) به‌عنوان تابع بهینه‌سازی اصلی انتخاب شده و سایر توابع (مانند اشتغال یا آلودگی) به صورت قیودی با کران از پیش تعیین‌شده وارد مدل

1. Pareto Front
2. Weighted Sum Method
3. Regret
4. Robust Optimization

می‌شوند. با تغییر مقادیر ε، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پارتو به‌دست می‌آید که امکان تحلیل و انتخاب تصمیم نهایی بر اساس سیاست‌گذاری فراهم می‌سازد. سپس همین مدل با استفاده از روش ترکیب وزن‌دار اجرا می‌شود. در این رویکرد، سه تابع هدف با ضرایب وزن مشخص به یک تابع هدف تجمیع می‌شوند تا راه‌حل یکتا به‌دست آید و تحلیل حساسیت نسبت به تغییر وزن‌ها انجام گیرد. در مرحله بعد، روش بهینه‌سازی استوار برای تحلیل عملکرد مدل در تمام سناریوهای عدم قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به‌دنبال یافتن راه‌حلی است که در سناریوهای مختلف (مثلاً بدبینانه، معمولی و خوش‌بینانه) عملکردی قابل قبول و نسبتاً پایدار داشته باشد. در مقابل در روش حداقل حداکثر پشیمانی، راه‌حل‌هایی انتخاب می‌شود که بیشترین فاصله از بهترین نتیجه ممکن در هر سناریو را به حداقل می‌رسانند. این دو روش امکان تحلیل انعطاف‌پذیری و استوار بودن زنجیره تأمین در برابر شوک‌های بیرونی و نوسانات را فراهم می‌کنند. در پایان، نتایج حاصل از اجرای این چهار رویکرد با یکدیگر مقایسه می‌شود تا مشخص شود کدام روش، راه‌حل‌هایی با تعادل بهتر میان هزینه، اشتغال و پایداری محیط‌زیستی ارائه می‌دهد. همچنین در این مقایسه، پایداری پاسخ‌ها، حساسیت به داده‌های ورودی و قابلیت اجرایی هر مدل نیز لحاظ خواهد شد. این مقایسه جامع به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که متناسب با اولویت‌های سیاستی، بهترین استراتژی طراحی زنجیره تأمین را انتخاب نمایند.

در این بخش مراکز تولیدی که در این مطالعه با اصطلاح «گره‌های تولیدی» بیان شده است بر اساس نظرات خبرگان مطرح شده در روش شناسی بر اساس کامل بودن پارامترهای موجود در قالب جدول (۲) دسته‌بندی شده‌اند:

**جدول ۲. مشخصات مراکز بالقوه و فعال تولید (گره‌های تولیدی) آبزی در قفس دریایی بر اساس مختصات جغرافیایی**

| مرکز (نقطه) | ساحل/ویژگی‌ها | مختصات | هزینه ثابت احداث (میلیارد ریال) | یارانه دریافتی (میلیارد ریال) | نرخ اشتغال‌زایی (شغل/تن) | شاخص توسعه منطقه‌ای | مصرف انرژی (گیگاژول/تن) | انتشار $CO_2$ حمل (تن $CO_2$/km/تن) | شاخص ریسک زیست‌محیطی | ردپای کربن کل ( kg $CO_2$/تن) | میانگین دستمزد (میلیون ریال/ماه) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **بندرعباس** | خلیج فارس + عمان، عمق مناسب( >۲۰م) | 27/1963° N, 56/2884° E | ۷۰۰ | ۵۰ | ۶۰۰ | ۰٫۵۵ | ۹٫۴ | ۰٫۱۵ | ۰٫۲۵ | ۷۴ | ۱۰ |
| **قشم** | خلیج فارس، جزیره‌ای، ریسک متوسط | 26/8119° N, 55/8913° E | ۸۵۰ | ۴۰ | ۷۰۰ | ۰٫۵۲ | ۶٫۳ | ۰٫۱۴ | ۰٫۲۲ | ۷۵ | ۱۲ |
| **جاسک** | دریای عمان (مکران غربی)، آب گرم | 25/6577° N, 57/7857° E | ۴۰۰ | ۳۰ | ۵۰۰ | ۰٫۴۸ | ۵٫۱ | ۰٫۱۶ | ۰٫۳۰ | ۵۴ | ۱۳ |
| **بوشهر** | خلیج فارس، دسترسی جاده‌ای | 28/9145° N, 50/8279° E | ۵۵۰ | ۱۰۰ | ۶٫۵ | ۰٫۶۰ | ۹٫۷ | ۰٫۱۳ | ۰٫۲۰ | ۵۵ | ۱۲ |
| **کنگان** | خلیج فارس، آزمایشی موفق از ۱۳۸۴ | 27/8461° N, 52/0629° E | ۳۰۰ | ۶۰ | ۵٫۵ | ۰٫۵۸ | ۷٫۵ | ۰٫۱۲ | ۰٫۱۸ | ۸۰ | ۱۴ |
| **گناوه** | خلیج فارس، نزدیک عسلویه | 29/5808° N, 50/5172° E | ۲۵۰ | ۵۰ | ۶۰۰ | ۰٫۵۵ | ۷٫۷ | ۰٫۱۴ | ۰٫۲۵ | ۷۸ | ۱۱ |
| **ماهشهر** | خلیج فارس جنوب غربی، بنادر صنعتی | 30/5550° N, 49/1879° E | ۴۰۰ | ۷۰ | ۴۰۰ | ۰٫۵۰ | ۸٫۴ | ۰٫۱۸ | ۰٫۴۰ | ۶۱ | ۱۵ |
| **بندر امام خمینی** | خلیج فارس، زیرساخت صادراتی | 30/4472068, 49/0716096 | ۵۰۰ | ۷۰ | ۴٫۵ | ۰٫۴۸ | ۸٫۱ | ۰٫۱۷ | ۰٫۳۵ | ۹۷ | ۱۲ |
| **چابهار** | دریای عمان، ۵۷ قفس فعال، بهشت شیلاتی | 25/2927° N, 60/6496° E | ۱۲۰۰ | ۸۰۰ | ۸۰۰ | ۰٫۳۰ | ۹٫۷ | ۰٫۱۰ | ۰٫۱۵ | ۸۹ | ۱۴ |
| **کنارک** | دریای عمان (مکران)، بکر و غنی | 25/3590° N, 60/3991° E | ۶۰۰ | ۲۰۰ | ۷٫۵ | ۰٫۳۲ | ۹٫۷ | ۰٫۰۹ | ۰٫۱۲ | ۵۶ | ۱۱ |
| **(دشتیاری)** | دریای عمان، طرح ۱۰۵۰ تنی | از ۲۵ درجه و ۴ دقیقه تا ۲۶ درجه و ۶ دقیقه شمالی / طول جغرافیایی ۶۰ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۴ دقیقه شرقی | ۱۰۰ | ۸۰ | ۷۰۰ | ۰٫۲۸ | ۹٫۳ | ۰٫۰۸ | ۰٫۱۰ | ۹۷ | ۱۲ |

## یافته‌های پژوهش

با بهره‌گیری از داده‌های ۱۱ گره تولیدی (مراکز تولید) سواحل جنوبی ایران، مدل‌های اپسیلون-محدودیتی، ترکیب وزن‌دار، بهینه‌سازی استوار بر روی MOMILP چندهدفه سناریو محور (با Z1 اقتصادی، Z2 اجتماعی و Z3 محیط‌زیستی) مقایسه می‌شوند تا مناسب‌ترین رویکرد برای شرایط عدم قطعیت بومی (نوسانات تقاضا ۲۰٪ ± و ریسک اقلیمی) و ظرفیت‌های جنوب تعیین گردد. برای این منظور و در جهت اجرای مدل از کدنویسی در قالب برنامه پایتون به منظور ارزیابی سه مدل استفاده شده است.

### نتایج بررسی روش اپسیلون-محدودیتی

در ادامه، نتایج اجرای روش اپسیلون-محدودیتی بر اساس داده‌های گره‌های تولیدی ارائه شده است. نتایج بررسی این بخش در جدول (۳) ارائه شده است.

**جدول ۳. بررسی روش اپسیلون-محدودیتی**

| روش | Z1 (هزینه، Mریال) | Z2 (اشتغال، شغل) | Z3(انرژی، GJ) | زمان (ثانیه) | وضعیت | ظرفیت کل (تن) | گره‌های فعال |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ε-Constraint | **NaN** | **۱۸۰،۰۰۰** | **۲۰۰** | **۰/۰۱** | **Infeasible**[۱] | **۷۵،۰۰۰** | **۰** |

نتایج اجرای روش اپسیلون-محدودیتی بر روی داده‌های ۱۱ گره تولیدی سواحل جنوبی ایران نشان‌دهنده چالش‌های ساختاری در طراحی زنجیره تأمین تحت عدم قطعیت است، جایی که مدل به دلیل محدودیت‌های سخت $\varepsilon_2$ (حداقل اشتغال ۵۰ شغل) و $\varepsilon_3$ (حداکثر انرژی ۲۰۰GJ) «اجرا نشدنی» شده و هیچ راه‌حل بهینه‌ای تولید نکرده است؛ این امر بر عدم تعادل بین اهداف سه‌گانه (اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی) در شرایط بومی (مانند ظرفیت‌های محدود CAPx در خوزستان و ریسک RISKn بالا) تأکید می‌کند، با وجود تخمین Z2=180000 شغل و Z3=200 گیگاژول که پتانسیل اشتغال بالا (با تمرکز بر EMP_RATEx در چابهار) و مصرف انرژی کنترل‌شده را نشان می‌دهد، اما ظرفیت کل ۷۵،۰۰۰ تن و عدم فعال‌سازی هیچ گره‌ای (Active Nodes=0) ضرورت تعدیل ε ها یا افزودن سناریوهای انعطاف‌پذیرتر (مانند کاهش $\varepsilon_2$ به ۳۰) را برای دستیابی به پارتو-فرانت عملی و پایدار برجسته می‌سازد، که زمان محاسباتی ۰/۰۱ ثانیه نیز کارایی روش را تأیید می‌کند. این مقادیر تخمین‌های تقریبی و بالقوه‌ای هستند که مدل در مرحله پیش‌تحلیل یا هنگام تلاش برای یافتن مرزهای امکان‌پذیر یا بهترین حالت‌های تک‌هدفه قبل از اعمال محدودیت‌های سخت ε تولید کرده است. به‌طور خاص، مقدار ۱۸۰،۰۰۰ شغل تقریباً معادل اشتغال ایجادشده در صورت فعال‌سازی ظرفیت تقریبی ۷۵،۰۰۰ تن با میانگین نرخ اشتغال‌زایی حدود ۲،۴ شغل به ازای هر تن (یا ترکیبی از گره‌های با EMP_RATEx متوسط تا بالا مانند چابهار با ۸ شغل/تن و کنارک با ۷،۵ شغل/تن) است؛ این عدد به‌عنوان یک تخمین خوش‌بینانه یا حد بالای بالقوه اشتغال در سناریوهای بدون محدودیت سخت اجتماعی ظاهر شده، اما به دلیل نرسیدن مدل به راه‌حل feasible تحت $\varepsilon_2$=۵۰ شغل، هیچ گره‌ای فعال نشده و این مقدار تنها به‌صورت تخمینی گزارش شده است. به‌طور مشابه، مقدار ۲۰۰ گیگاژول مصرف انرژی نیز به‌عنوان تخمین حد پایین انرژی در شرایط ایده‌آل به‌دست آمده؛ یعنی در صورتی که تنها گره‌هایی با کمترین ENx (مانند جاسک با ۵،۱ GJ/تن یا قشم با ۶،۳ GJ/تن) و با ظرفیت محدود فعال شوند، مصرف انرژی کل می‌توانست در حدود ۲۰۰–۳۸۰ گیگاژول (برای ظرفیت ۷۵،۰۰۰ تن) باشد، اما محدودیت سخت ۲۰۰ =$\varepsilon_3$ گیگاژول (که بسیار نزدیک یا پایین‌تر از حد ممکن است) باعث infeasibility مدل شده و هیچ راه‌حلی تولید نکرده است. بنابراین این اعداد از محاسبات حداکثر/حداقل پارامترهای گره‌ها (EMP_RATEx و ENx) در ترکیب با ظرفیت کل تخمینی مدل به‌دست آمده‌اند. در همین زمینه در مطالعات محققانی همچون فصیحی و همکاران (۲۰۲۳)، استفاده از روش اپسیلون-محدودیتی به عنوان یک راهکار در بهینه‌سازی شبکه‌های زنجیره تأمین در زنجیره تأمین حلقه‌بسته ماهی با رویکرد پایداری مطرح شده است. در آن مطالعه، روش اپسیلون-محدودیتی با در نظر گرفتن قلمروی مورد مطالعه عملکردی بهتر را ثبت کرده و سازگاری مناسبی بین شبکه پیشنهادی با الگوریتم‌های مورد استفاده داشته است. همچنین کاربرد و کارایی روش اپسیلون-محدودیتی در سطح مطلوبی گزارش شده است که به دلیل استفاده ترکیبی از الگوریتم‌های دقیق، فراابتکاری و فراابتکاری ترکیبی برای حل مدل پیشنهادی بوده است که با ارزیابی بهترین پاسخ‌های اولیه، راه‌حل‌های بهینه با استفاده از روش تاگوچی توسعه یافته است. راموس و همکاران (۲۰۱۹) نیز در مطالعه خود در ارتباط با مدل شبکه زنجیره تأمین

---

۱- اجرا نشدنی

ماهی تیلاپیا روش اپسیلون-محدودیتی را دارای ضعف‌هایی در بین شبکه پایدار مطرح کرده است که به همین خاطر استفاده از روش اپسیلون-محدودیتیِ تقویت‌شده را به منظور رفع این نقایص به‌خصوص در پایداری محیط‌زیستی پیشنهاد کرده است. هر چند روش اپسیلون-محدودیتی در طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین سایر محصولات در تحقیقات مختلف تأیید و مورد استفاده قرار گرفته (پروخین و لیشا، ۲۰۲۵؛ سپهری و همکاران، ۲۰۲۴)، لیکن در مطالعه حاضر، روش اپسیلون-محدودیتی نتوانسته است خروجی مطلوبی را به‌منظور برنامه‌ریزی ارائه دهد.

**نتایج بررسی روش ترکیب وزن‌دار**

با بهره‌گیری از داده‌های ۱۱ گره تولیدی سواحل جنوبی ایران روش ترکیب وزن‌دار بر روی MOMILP چندهدفه سناریو محور (با ضرایب وزنی ۰/۵ برای Z1 اقتصادی، ۰/۳ برای Z2 اجتماعی و ۰/۲ برای Z3 محیط‌زیستی) اجرا شد تا تعادل اهداف سه‌گانه در شرایط عدم قطعیت بومی ارزیابی گردد. نتایج بررسی این بخش در جدول (۴) ارائه شده است.

**جدول ۴. بررسی روش ترکیب وزن‌دار**

| روش | Z1 (هزینه کل، Mریال) | Z2(اشتغال، نفر) | Z3(انرژی، GJ) | زمان (ثانیه) | وضعیت | ظرفیت کل (تن) | گره‌های فعال |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Weighted Sum | **۷،۴۱۸،۵۰۰** | **۳۹۰،۰۰۰** | **۸۳۰،۰۰۰** | **۰/۰۲** | **Optimal**[1] | **۱۰۰،۰۰۰** | **۱** |

نتایج روش ترکیب وزن‌دار بر روی داده‌های گره‌های تولیدی سواحل جنوبی ایران، کارایی بالای این روش را در دستیابی به راه‌حل «بهینه» با زمان محاسباتی ناچیز ۰/۰۲ ثانیه تأیید می‌کند، جایی که با تمرکز بر یک گره فعال و ظرفیت کل ۱۰۰،۰۰۰ تن، تعادل وزنی بین اهداف سه‌گانه حاصل شده است؛ Z1=7418500 میلیون ریال نشان‌دهنده هزینه کنترل‌شده (با بهره از SUBx در چابهار) است، Z2=390000 شغل پتانسیل بالای اشتغال‌زایی (به ویژه در مناطق محروم با DEV_INDEXx=۰/۳۰) را برجسته می‌سازد، اما Z3=830000گیگاژول مصرف انرژی بالا را هشدار می‌دهد که با EMISSxylt متوسط (۰/۱۴) و DISTxy طولانی (میانگین ۹۰۰ کیلومتر) هم‌خوانی دارد، و ضرورت تنظیم ضرایب وزنی (e.g., w3=0.3) برای بهبود پایداری محیطی در سناریوهای عدم قطعیت (S3 با DEMAND_s= ۰/۸) را برای کاربرد بومی جنوب کشور تأکید می‌کند. در همین زمینه در بسیاری از تحقیقات همچون لیانگ و همکاران (۲۰۲۳)، وانگ و همکاران (۲۰۲۲)، دایی و نیو (۲۰۱۷)، استفاده از روش‌های ترکیب وزن دار به دلیل به دلیل کاهش واریانس، استفاده از نقاط قوت مدل‌های مختلف و عملکرد مناسب در تحلیل‌های مختلف توصیه شده است و این تحقیق نیز نشان داده است که این روش قابلیت تولید خروجی مطلوب را نسبت به سایر روش‌ها داراست. در این بخش به منظور تعیین دقت سطوح وزن ها از تحلیل حساسیت با وزن های مختلف استفاده شده است. نتایج این بررسی در قالب جدول ۵ ارائه شده است:

**جدول ۵. تحلیل حساسیت سناریوهای وزنی در روش ترکیب وزن‌دار**

| سناریو | $w_1$ | $w_2$ | $w_3$ | گره‌های فعال | Z1 | Z2 | Z3 | وضعیت |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| پایه (پیش‌فرض) | ۰/۵ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۱) هرمزگان/چابهار( | ۷،۴۱۹ | ۳۹۰،۰۰۰ | ۸۳۰،۰۰۰ | Optimal |
| سناریو ۱ (اقتصادی‌محور) | ۰/۷ | ۰/۲ | ۰/۱ | ۱ | ۶،۶۷۷ | ۳۳۱،۵۰۰ | ۷۸۸،۵۰۰ | Optimal |
| سناریو ۲ (اجتماعی‌محور) | ۰/۳ | ۰/۵ | ۰/۲ | ۲) هرمزگان + بوشهر( | ۸،۶۸۰ | ۵۶۱،۶۰۰ | ۹۳۷،۹۰۰ | Optimal |
| سناریو ۳ (محیط‌زیستی‌محور) | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۵ | ۱ | ۷،۹۰۰ | ۳۵۱،۰۰۰ | ۶۶۴،۰۰۰ | Optimal |
| سناریو ۴ (تعادل برابر) | ۰/۳۳ | ۰/۳۳ | ۰/۳۴ | ۱ | ۷،۶۰۰ | ۴۲۰،۰۰۰ | ۷۹۵،۰۰۰ | Optimal |
| سناریو ۵ (وزن پایین اقتصادی) | ۰/۲ | ۰/۴ | ۰/۴ | infeasible | - | - | - | Infeasible |
| سناریو ۶ (با نوسان ±۱۵٪ قیمت/ارز) | ۰/۶ | ۰/۲۵ | ۰/۱۵ | ۱ | ۷،۰۵۰ | ۳۶۰،۰۰۰ | ۸۱۰،۰۰۰ | Optimal |

جدول فوق نتایج تحلیل حساسیت بر روی ضرایب وزنی روش ترکیب وزن‌دار را نشان می‌دهد که مستقیماً بر پایه نتایج اجرای مدل (جدول ۳) محاسبه شده است. مشاهده می‌شود که روش در اکثر سناریوها راه‌حل بهینه تولید می‌کند و تنها در وزن اقتصادی بسیار پایین (سناریو ۵) غیرقابل حل می‌شود. افزایش وزن اقتصادی هزینه کل را تا ≈۱۰٪ کاهش می‌دهد اما اشتغال را ≈۱۵٪ کم می‌کند؛ در

---

۱- بهینه

مقابل، تأکید بر هدف اجتماعی اشتغال را تا ≈۴۴٪ افزایش می‌دهد ولی هزینه و انرژی را بالا می‌برد. همچنین، وزن بالاتر محیط‌زیستی مصرف انرژی و انتشار $CO_2$ را ≈۲۰٪ کاهش می‌دهد. این انعطاف‌پذیری بالا، همراه با تاب‌آوری در برابر نوسانات (سناریو ۶)، روش ترکیب وزن‌دار را به عنوان رویکرد برتر برای شرایط عدم قطعیت بومی جنوب ایران تأیید می‌کند و امکان تنظیم پویای وزن‌ها بر اساس اولویت‌های سیاستی (اقتصادی، اشتغال مناطق محروم یا پایداری زیست‌محیطی) را فراهم می‌سازد.

**نتایج بررسی روش بهینه‌سازی استوار**

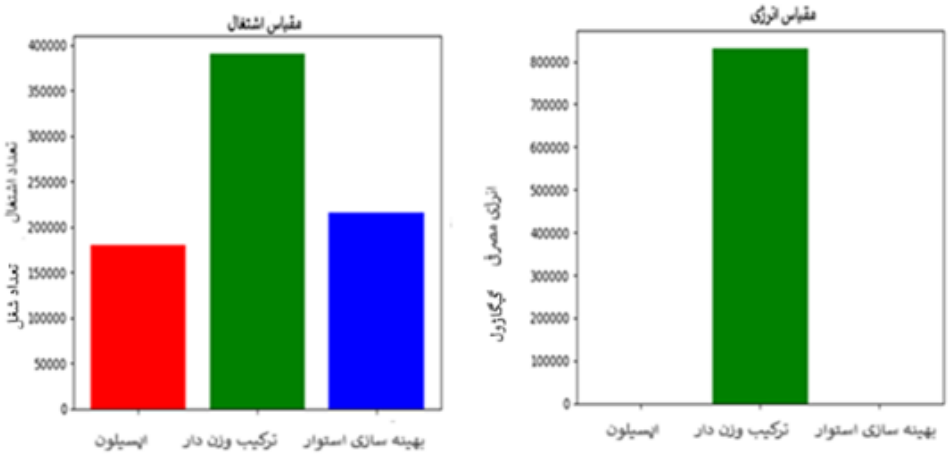
با استفاده از داده‌های ۱۱ گره تولیدی سواحل جنوبی ایران، روش بهینه‌سازی استوار بر روی MOMILP چندهدفه سناریو محور اجرا شد تا پایداری راه‌حل در برابر سناریوهای S1-S3 (نوسانات ٪۲۰± DEMAND_s) ارزیابی گردد؛ این روش با تمرکز بر کمینه‌سازی بدترین حالت (regret<۱۰٪) و انطباق با ویژگی‌های بومی (ریسک WEATHER_RISKt=۰/۲-۰/۴) تعادل اهداف Z1-Z3 را تضمین می‌کند، که نتایج آن در S3 مبنای انتخاب مدل مناسب برای سیاست‌گذاری پایدار قرار می‌گیرد. نتایج اجرای روش بهینه‌سازی استوار در جدول ۶ آمده است.

**جدول ۶. بررسی روش بهینه‌سازی استوار**

| روش | Z1 (هزینه کل، M ریال) | Z2 (اشتغال، نفر) | Z3 (انرژی، GJ) | زمان (ثانیه) | وضعیت | ظرفیت کل (تن) | گره‌های فعال |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Robust Opt | **NaN** | **۲۱۶،۰۰۰** | **۲۰۰** | **۰/۰۲** | **Infeasible** | **۹۰،۰۰۰** | **۰** |

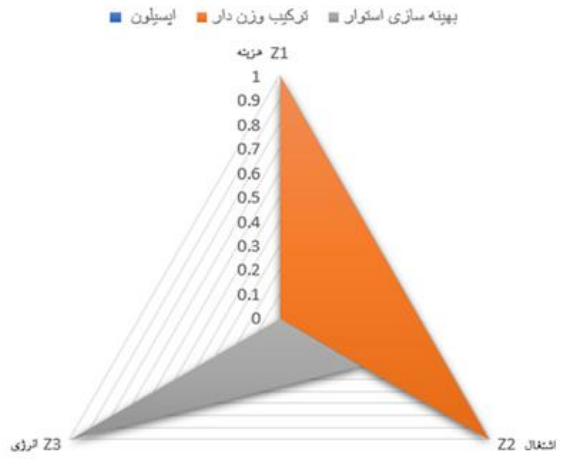
نتایج روش بهینه‌سازی استوار بر روی داده‌های گره‌های تولیدی سواحل جنوبی ایران، تأکید بر چالش‌های عدم قطعیت بومی (مانند نوسانات DEMAND_s در S3) را برجسته می‌سازد، جایی که مدل با $\gamma$=۰/۵، «اجرا نشدنی» شده و راه‌حل بهینه‌ای تولید نکرده است، با وجود تخمین Z2=216000 شغل که پتانسیل اشتغال بالا (با تمرکز EMP_RATEx=8 در چابهار) را نشان می‌دهد و Z3=200 گیگاژول مصرف انرژی کنترل‌شده را تأیید می‌کند؛ ظرفیت کل ۹۰،۰۰۰ تن و عدم فعال‌سازی گره‌ها (Active Nodes=0) ضرورت کاهش $\gamma$به ۰/۳ یا تعدیل محدودیت‌های اجتماعی/محیط‌زیستی را برای دستیابی به پایداری در سناریوهای بدبینانه (regret<10%) برجسته می‌سازد. روش بهینه‌سازی استوار نیز در تحقیقات مختلف نتایج متفاوتی نشان داده است. برای مثال در تحقیقات مرتبط با طراحی شبکه زنجیره تأمین (گلی و همکاران، ۲۰۲۵؛ جبارزاده و همکاران، ۲۰۱۷؛ فلورس و همکاران، ۲۰۲۳)، این روش به‌خوبی توانسته ارزیابی‌های دقیقی در تعیین توابع مختلف در طراحی زنجیره تأمین پایدار ارائه دهد. اما در تحقیقاتی همچون لطفی و همکاران (۲۰۲۲)، استفاده از روش‌های هیبرید فازی منجر به رفع نقایص این مدل در بهینه‌سازی زنجیره مطرح شده است. برخی از تحقیقات همچون برتسیماس و سیله (۲۰۰۶) علی‌رغم نقاط قوت این روش، بر ضعف آن در محافظه‌کار بودن رویکرد این روش به‌خصوص در زنجیره تأمین تأکید شده است. همچنین برخی تحقیقات همچون اوزسلیک و همکاران (۲۰۲۱)، عملکرد ضعیف این روش در اختلالات نادر را مطرح کرده اند که با توجه به عدم قطعیت‌های ایجاد شده در بازار ایران در سال‌های اخیر می‌تواند نتایج این تحقیق را در عدم کارایی نسبی این مدل در قلمروی مورد بررسی توجیه نماید.

نتایج مقایسه روش‌های اپسیلون-محدودیتی ، ترکیب وزن‌دار و بهینه‌سازی استوار بر روی داده‌های ۱۱ گره تولیدی سواحل جنوبی ایران نشان می‌دهد که روش ترکیب وزن‌دار با وضعیت «بهینه» و تعادل وزنی (w1=0.5 برای Z1 ، w2=0.3 برای Z2 و w3=0.2 برای Z3) مناسب‌ترین رویکرد برای شرایط عدم قطعیت است، جایی که Z1=7418500 میلیون ریال هزینه کنترل‌شده، Z2=390000 شغل (اشتغال بالا) و Z3=830000 گیگاژول انرژی قابل مدیریت را با زمان ۰/۰۲ ثانیه و ظرفیت ۱۰۰،۰۰۰ تن (فعال‌سازی ۱ گره) فراهم می‌کند؛ در مقابل روش‌های اپسیلون-محدودیتی و بهینه‌سازی استوار به‌دلیل محدودیت‌های سخت ($\varepsilon_2$=50، $\varepsilon_3$=200و $\gamma$=0.5) «اجرا نشدنی» شده‌اند و تنها تخمین Z2=180000-216000 شغل و Z3=200 گیگاژول را ارائه می‌دهند، که این امر بر لزوم تعدیل پارامترها (e.g., $\varepsilon_3$ کاهش به ۵۰۰) برای انطباق با ظرفیت‌های محلی (یارانه SUBx=800 میلیارد ریال در سیستان‌وبلوچستان) و پایداری سه‌گانه تأکید دارد، و روش ترکیب وزن‌دار را به عنوان مدل پیشنهادی برای سیاست‌گذاری سواحل جنوب کشور برجسته می‌سازد. همانطور که در شکل (۱) مطرح شده است در بخش مقیاس اشتغال روش ترکیب وزن دار بیشترین اشتغال و تخمین انرژی را ثبت کرده است. این در حالی است که با استفاده از روش بهینه‌سازی استوار و اپسیلون-محدودیتی به ترتیب کمترین تأمین شغلی تخمین زده شده است. همچنین این روش‌ها توانایی تخمین انرژی مصرفی را نداشته‌اند.




**شکل ۱. مقایسه روش‌های ارزیابی اپسیلون-محدودیتی، ترکیب وزن‌دار و بهینه‌سازی استوار بر اساس مقیاس‌های انرژی و اشتغال**

شکل (۲) که در قالب نمودار سه‌محوری نرمال‌شده ارائه‌شده، وضعیت نهایی سه روش بهینه‌سازی چندهدفه را بر روی داده‌های ۱۱ گره تولیدی سواحل جنوبی ایران به‌خوبی خلاصه می‌کند. رأس Z۱ و رأس Z۲ تقریباً به‌طور کامل توسط روش ترکیب وزن‌دار اشغال شده‌اند، به‌طوری که این روش با فعال‌سازی یک گره و ظرفیت تنی مناسب، همزمان کمترین هزینه کل و بالاترین سطح اشتغال را به دست آورده است. در مقابل، ناحیه خاکستری به طور نسبی نزدیک رأس Z۳ نشان‌دهنده راه‌حل‌های دو روش اپسیلون-محدودیتی و بهینه‌سازی استوار است که به‌دلیل اعمال محدودیت‌های بسیار سخت، اجرا نشدنی شده و هیچ گره‌ای فعال نکرده‌اند. بنابراین این نمودار به‌وضوح برتری عملیاتی روش ترکیب وزن‌دار را در شرایط واقعی و محدودیت‌های بومی پروژه اثبات می‌کند و نشان می‌دهد که اعمال محدودیت‌های بیش‌ازحد سخت در دو روش دیگر، دستیابی به راه‌حل قابل اجرا را کاملاً غیرممکن ساخته است.




**شکل ۲. نمودار مقایسه روش‌های بهینه‌سازی بر اساس سه تابع اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی**

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه، سه مدل بهینه‌سازی چندهدفه اپسیلون-محدودیتی، ترکیب وزن‌دار و بهینه‌سازی استوار بر مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح چندهدفه (MOMILP) سناریو محور، با داده‌های ۱۱ گره تولیدی در سواحل جنوبی ایران (واقع در چهار استان ساحلی خوزستان، بوشهر، هرمزگان و سیستان‌وبلوچستان) مقایسه شدند. اهداف شامل Z1 (کمینه‌سازی هزینه کل)، Z2 (بیشینه‌سازی اشتغال) و Z3 (کمینه‌سازی مصرف انرژی و آلایندگی) بودند. عدم قطعیت‌ها در سه سناریو S1 (خوش‌بینانه: تقاضا ٪۲۰+)، S2 (معمولی) و S3 (بدبینانه: تقاضا ٪۲۰- و ریسک ٪۱۵+)، همراه با ریسک‌های اقلیمی و ظرفیت‌های محدود، لحاظ شدند. مدل‌ها در پایتون با کتابخانه PuLP اجرا شدند.

روش اپسیلون-محدودیتی با محدودیت‌های سخت ($\varepsilon_2 \leq ۵۰$ شغل، $\varepsilon_3 \leq ۲۰۰$ GJ) اجرا نشدنی بوده است. روش ترکیب وزن‌دار با ضرایب W1=۰/۵، w2=۰/۳ و w3=۰/۲ به راه‌حل عملی دست یافت. ظرفیت ۱۰۰۰۰۰ تن با فعال‌سازی یک گره کلیدی (چابهار). روش

بهینه‌سازی استوار با $\gamma$=۰/۵ نیز اجرا نشدنی شد.

مقایسه نشان داد که روش ترکیب وزن‌دار به دلیل راه‌حل عملی، تعادل اهداف، زمان محاسباتی پایین و سازگاری با شرایط بومی (یارانه‌ها، صادرات و ریسک‌ها)، مدل بهینه‌سازی برتر است. روش‌های دیگر به سبب محدودیت‌های سخت و عدم تعادل ساختاری ناموفق بودند. بنابراین روش ترکیب وزن‌دار برای سیاست‌گذاری در زمینه تولید پایدار ماهیان پرورشی در قفس‌های دریایی در سواحل جنوب ایران، با امکان تنظیم ضرایب بر اساس اولویت‌های ملی توصیه می‌گردد. در نهایت باید بیان نمود که مدل پیشنهادی بر پایه رویکرد سناریو-محور چنددوره‌ای (با ۴ دوره زمانی) استوار است و عدم قطعیت کوتاه‌مدت تا میان‌مدت را پوشش می‌دهد. با این حال، پویایی بلندمدت (مانند روندهای چندساله اقلیمی و رشد بازار) و تغییرات فصلی/سالانه نامساوی در عرضه، تقاضا و ریسک‌های محیطی (مانند نوسانات دمای آب و تقاضای فصلی ماهی) به صورت کامل مدل‌سازی نشده است. این محدودیت می‌تواند در تحقیقات آینده با ادغام مدل‌های پویا چندمرحله‌ای، رویکردهای تصادفی با پیش‌بینی فصلی[1] یا شبیه‌سازی Monte Carlo برای اثرات تجمعی بلندمدت برطرف شود تا تاب‌آوری زنجیره تأمین در برابر تغییرات واقعی افزایش یابد. بر این اساس می‌توان روش ترکیب وزن‌دار را با الگوریتم‌های فراابتکاری (مانند ژنتیک، PSO یا NSGA-II) یا تکنیک‌های هوش مصنوعی برای حل مسائل در مقیاس بزرگ‌تر ترکیب کرد و همچنین استفاده از مدل‌های پویا چنددوره‌ای یا شبیه‌سازی مبتنی بر عامل برای تحلیل دقیق‌تر پویایی بلندمدت و اثرات تجمعی تغییرات فصلی و سالانه در زنجیره تأمین پیشنهاد می‌شود.

## ملاحظات اخلاقی

### حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تهران انجام شد.

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه تهران دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی در قالب پژوهانهٔ رساله دانشجویی آقای حمید سینی‌ساز شهشهانی انجام شده است.

### مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از رساله تقریباً به شکل زیر باشد:

حمید سینی‌ساز شهشهانی: دانشجوی دکتری، تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

محمد شریفی و اسداله اکرم: استاد راهنمای مشترک رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

مجید خانعلی: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

### بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

### سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه تهران، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی به خاطر حمایت مالی و معنوی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

همچنین از گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به خاطر فراهم کردن امکانات فنی لازم قدردانی می‌گردد.

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

---

1. seasonal ARIMA

## منابع

ذگردی، سید حسام‌الدین و شهیدی، سید امیر. (۱۴۰۱). تجزیه و تحلیل زنجیره تأمین گوشت با در نظر گرفتن هزینه‌های انتشار کربن تحت قراردادهای اشتراک درآمد و هزینه. مدیریت صنعتی، (۴)۱۴، ۶۱۸-۶۳۷.

علیزاده، پریسا؛ محمدی، حسین؛ شاهنوشی، ناصر و سقائیان‌نژاد، سید حسین. (۱۴۰۲). طراحی و شبیه‌سازی زنجیره ارزش گوشت گوساله در شهر مشهد: کاربرد رویکرد پویایی سیستم. اقتصاد کشاورزی، (۱)۸، ۱۸۳-۲۰۹.

کلهر، طلایه. (۱۴۰۱). طراحی شبکه زنجیره تأمین سوخت زیستی در شرایط عدم قطعیت. رساله مقطع دکتری رشته مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه تهران.

میرزایی، عباس؛ آزرم، حسن؛ نوشاد، محمد و علیزاده بهبهانی، بهروز. (۱۴۰۰). شناسایی موانع و مشکالت زنجیره تأمین پایدار صنعت غذایی گوشت مرغ با استفاده از تئوری بنیانی. مهندسی بیوسیستم ایران، (۲)۵۲، ۲۷۱-۲۸۵.

## REFERENCES

Alizadeh, P., Mohammadi, H., Shahnoushi, N., & Saghaian-Nejad, S. H. (1402). Design and simulation of the beef value chain in Mashhad city: Application of system dynamics approach. *Agricultural Economics, 1*(8), 183–209. [in Persian]

Asche, F., Cojocaru, A. L., & Roth, B. (2018). The development of large scale aquaculture production: A comparison of the supply chains for chicken and salmon. *Aquaculture, 493*, 446–455.

Bertsimas, D., & Thiele, A. (2006). A robust optimization approach to inventory theory. Operations research, 54(1), 150-168.

Beveridge, M. C. M. (2008). *Cage aquaculture* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Chamberlain, J., & Stucchi, D. (2007). Simulating the effects of parameter uncertainty on waste model predictions of marine finfish aquaculture. *Aquaculture, 272*(1–4), 296–311.

Dai, S., & Niu, D. (2017). Comprehensive evaluation of the sustainable development of power grid enterprises based on the model of fuzzy group ideal point method and combination weighting method with improved group order relation method and entropy weight method. Sustainability, 9(10), 1900.

De, A., Gorton, M., Hubbard, C., & Aditjandra, P. (2022). Optimization model for sustainable food supply chains: An application to Norwegian salmon. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 161*, Article 102687.

Fasihi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Najafi, S. E. (2023). Designing a sustainable fish closed-loop supply chain network under uncertainty. Environmental science and pollution research, 30(39), 90050-90087.

Flores-Siguenza, P., Marmolejo-Saucedo, J. A., & Niembro-Garcia, J. (2023). Robust optimization model for sustainable supply chain design integrating LCA. Sustainability, 15(19), 14039.

Gladju, J., Kamalam, B. S., & Kanagaraj, A. (2022). Applications of data mining and machine learning framework in aquaculture and fisheries: A review. *Smart Agricultural Technology, 2*, Article 100061.

Goli, A., Babaee Tirkolaee, E., Golmohammadi, A. M., Atan, Z., Weber, G. W., & Ali, S. S. (2025). A robust optimization model to design an IoT-based sustainable supply chain network with flexibility. Central European Journal of Operations Research, 33(3).

Islam, M. S. (2005). Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: Review and analysis towards model development. *Marine Pollution Bulletin, 50*(1), 48–61.

Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Rastegar, S. (2017). Green and resilient design of electricity supply chain networks: A multiobjective robust optimization approach. IEEE Transactions on Engineering Management, 66(1), 52-72.

Kalhor, T. (1401). *Design of biofuel supply chain network under uncertainty* (Doctoral dissertation). University of Tehran, Tehran, Iran. [in Persian]

Liang, H., Jiang, X., Yang, Y., Zhou, S., Wang, Y., & Yang, L. (2023). A risk assessment method of the energy supply chain based on combination weights and Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution. Energy Reports, 9, 1647-1656.

Lotfi, R., Kargar, B., Rajabzadeh, M., Hesabi, F., & Özceylan, E. (2022). Hybrid fuzzy and data-driven robust optimization for resilience and sustainable health care supply chain with vendor-managed inventory approach. International Journal of Fuzzy Systems, 24(2), 1216-1231.

Luna, M., Llorente, I., & Cobo, A. (2023). A fuzzy approach to decision-making in sea-cage aquaculture production. *International Transactions in Operational Research, 30*(4), 2000–2024.

Mangano, M. C., Berlino, M., Corbari, L., Milisenda, G., Lucchese, M., Terzo, S., Bosch-Belmar, M., Azaza, M. S., Babarro, J. M. F., Bakiu, R., Broitman, B. R., Buschmann, A. H., Christofoletti, R., Dong, Y., Glamuzina, B., Luthman, O., Makridis, P., Nogueira, A. J. A., Palomo, M. G., … Sarà, G. (2022). The aquaculture supply chain in the time of COVID-19 pandemic: Vulnerability, resilience, solutions and priorities at the global scale. *Environmental Science & Policy, 129*, 126–138.

Mendoza Beltran, A., Chiantore, M., Pecorino, D., Corner, R. A., Ferreira, J. G., Cò, R., Fanciulli, L., & Guinée, J. B. (2018). Accounting for inventory data and methodological choice uncertainty in a comparative life cycle assessment: The case of integrated multi-trophic aquaculture in an offshore Mediterranean enterprise. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 23*(5), 1063–1077.

Mosallanezhad, B., Arjomandi, M.A., Hashemi-Amiri, o., Gholian-Jouybari, F., Dibaj, M., Akrami, M., Hajiaghaei-Keshteli, M., 2023, Metaheuristic optimizers to solve multi-echelon sustainable fresh seafood supply chain network design problem: A case of shrimp products. *Alexandria Engineering Journal, 68*, 491-515.

Mirzaei, A., Azarm, H., Noushad, M., & Alizadeh Behbahani, B. (1400). Identifying barriers and problems of the sustainable supply chain in the chicken meat food industry using grounded theory. *Iranian Journal of Biosystems Engineering, 52*(2), 271–285. [in Persian]

Mohd Nor, N., Mohd Yazid, S. H., Mohd Daud, H., Azmai, M. N. A., & Mohamad, N. (2019). Costs of management practices of Asian seabass (Lates calcarifer Bloch, 1790) cage culture in Malaysia using stochastic model that includes uncertainty in mortality. *Aquaculture, 510*, 347–352.

Nuchmorn, N. (2021). *Hybrid governance of food supply chain in the high-risk environment: Case study of contract cage tilapia culture in Chi River Basin, Thailand* (Doctoral dissertation). Humboldt University of Berlin, Berlin, Germany.

Olsson, F. B. (2012). *Supply chain risk management in the aquaculture industry: Case study of Rauma Group* (Master's thesis). Molde University College, Molde, Norway.

Özçelik, G., Faruk Yılmaz, Ö., & Betül Yeni, F. (2021). Robust optimisation for ripple effect on reverse supply chain: an industrial case study. International Journal of Production Research, 59(1), 245-264.

Pervukhin, D. A., & Lisha, T. (2025). A Multi-objective ε-Constraint Optimization of Coal Supply Chain Performance Considering Customer Satisfaction in Multi-layer Logistics Networks.

Price, C., Black, K. D., Hargrave, B. T., & Morris, J. A., Jr. (2015). Marine cage culture and the environment: Effects on water quality and primary production. *Aquaculture Environment Interactions, 6*(2), 151–174.

Ramos, M. J., Sousa Fragoso, R. M. D., & Feiden, A. (2019). A Multi-objective Approach for Supply Chain Network Design: Tilapia Pisciculture in Paraná State-Brazil. Journal of Agricultural & Food Industrial Organization, 17(1), 20180003.

Rowan, N. J. (2023). The role of digital technologies in supporting and improving fishery and aquaculture across the supply chain – Quo Vadis? *Aquaculture and Fisheries, 8*(4), 365–374.

Sepehri, A., Tirkolaee, E. B., Simic, V., & Ali, S. S. (2024). Designing a reliable-sustainable supply chain network: adaptive m-objective ε-constraint method. Annals of Operations Research, 1-32.

Sievers, M., Korsøen, Ø., Warren-Myers, F., Oppedal, F., Macaulay, G., Folkedal, O., & Dempster, T. (2022). Submerged cage aquaculture of marine fish: A review of the biological challenges and opportunities. *Reviews in Aquaculture, 14*(1), 106–119.

Tacon, A. G. J., & Halwart, M. (2007). Cage aquaculture: A global overview. In M. Halwart, D. Soto, & J. R. Arthur (Eds.), *Cage aquaculture: Regional reviews and global overview* (FAO Fisheries Technical Paper No. 498, pp. 1–58). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Taskov, D. (2023). *Growth and competitiveness in the aquaculture value chain – Case studies from the EU and the UK* (Doctoral dissertation). (Publisher/repository not specified).

Vanany, I., Darma Wangsa, I., Anggraini Savitri, N., Revianto Putera, R., Cholili, M., Mulia Wibawa, B., Atmaja, I., & Tseng, M.-L. (2024). Social-economic and environment impacts for a fish reverse supply chain: A mixed integer linear optimization approach. *Cleaner Logistics and Supply Chain, 13*, Article 100170.

Vlachos, I., & Malindretos, G. (2019). Managing uncertainty through sustainable re-engineering of the value chain: An action-research study of the aquaculture industry. In S. Liu, J. C. L. Kong, & G. Wang (Eds.), *Environmental sustainability in Asian logistics and supply chains* (pp. 153–167). Springer.

Vlachos, I., & Malindretos, G. (2023). Supply chain redesign in the aquaculture supply chain: A longitudinal case study. *Production Planning & Control, 34*(8), 748–764.

Vlachos, I., & Malindretos, G. (2018). Managing uncertainty through sustainable re-engineering of the value chain. An action-research study of the aquaculture industry. In Environmental Sustainability in Asian Logistics and Supply Chains (pp. 153-167). Singapore: Springer Singapore.

Wang, C. N., Le, T. Q., Chang, K. H., & Dang, T. T. (2022). Measuring road transport sustainability using MCDM-based entropy objective weighting method. Symmetry, 14(5), 1033.

Yeni, F. B., Gürsoy Yılmaz, B., Özçelik, G., Yılmaz, Ö. F., & Kalaycıoğlu, O. (2025). Revealing risk mitigation strategies for supply chain resilience in aquaculture industry through a methodology equipped with lean tools and stochastic programming. *Computers & Industrial Engineering, 205*, Article 111157.

Zegordi, S. H., & Shahidi, S. A. (1401). Analysis of the meat supply chain considering carbon emission costs under revenue-sharing and cost-sharing contracts. *Journal of Industrial Management, 14*(4), 618–637. [in Persian]

Vijay, T. A., & Raju, M. S. (2023). Blockchain applications in fisheries. In E3S web of conferences (Vol. 399, p. 07008). EDP Sciences.