



Research in Production and Operations Management

University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329

Vol. 16, Issue 3, No. 42, Autumn 2025



DOI: [10.22108/pom.2025.142730.1577](https://doi.org/10.22108/pom.2025.142730.1577)

(Research paper)

Prioritization of Optimized Scenarios in the Food Chain

Yahia Zare Mehrjerdi *

Faculty of Industrial engineering, Yazd University, Yazd, Iran, yzare@yazd.ac.ir

Amir Hossein Karimi

Faculty of Industrial engineering, Yazd University, Yazd, Iran, m.a.h.k.z1999@gmail.com

Purpose: This study aims to identify the optimal scenario within the realm of sustainable food supply chains, utilizing a set of meticulously designed indicators and scenarios. The research also aims to analyze the nature, direction, and extent of influence among these indicators to develop a comprehensive solution that minimizes the environmental footprint of food production. Furthermore, the study seeks to promote self-sufficiency in domestic food production, enhance income generation, and alleviate the financial burdens associated with both food production and imports. By addressing these multifaceted goals, the research contributes to the strategic planning efforts of the Ministry of Agricultural Jihad and bolsters national food security initiatives.

Design/methodology/approach: The proposed framework is organized into three distinct phases. In the first phase, relevant indicators and scenarios concerning sustainable food supply chains are identified through a systematic review of existing literature and prior studies in the field. This phase also includes data collection from authoritative sources such as the Statistical Center of Iran and the Ministry of Agricultural Jihad, ensuring the reliability and relevance of the input data. The second phase involves the design and mathematical modeling of the system, which incorporates six objective functions representing sustainability indices, along with a set of equations and constraints. The model is solved using the goal programming method, where specific goals and targets are assigned to each index to guide the optimization process. In the third phase, the scenarios developed in the first phase are prioritized using the TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) method. This prioritization assumes equal weights for all indicators to ensure an unbiased evaluation. Additionally, a structured questionnaire was designed and distributed among domain experts to assess

* Corresponding author, [0000-0002-4731-4985](https://orcid.org/0000-0002-4731-4985)

2981-0329 / © University of Isfahan



This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

the degree and manner of influence among the indicators. The collected data were analyzed using the DEMATEL-Fuzzy method, which enabled the identification of causal relationships and the strength of interdependencies among the indicators. The final step of this phase involved a comprehensive analysis of the results obtained from both the prioritization and influence assessment.

Findings: The study effectively prioritized the proposed scenarios based on six sustainability indicators and revealed significant interrelationships among them. Scenario 4 emerged as the most advantageous option, demonstrating notable improvements in both economic and environmental dimensions. Specifically, this scenario resulted in increased self-sufficiency in the production of plant-based foods while simultaneously reducing water consumption and greenhouse gas emissions. These outcomes indicate that strategic and optimal allocation of resources in food cultivation can yield substantial environmental benefits and enhance national self-reliance. Among the indicators, greenhouse gas emissions and self-sufficiency in plant-based food production were identified as the most influential and causal factors, with the latter having the greatest impact on other indicators.

Research limitations/implications: Despite its contributions, the study acknowledges certain limitations. A key limitation is the exclusion of secondary food products such as cheese and yogurt, which restricts the model's applicability to a broader range of food items. Additionally, the diversity and complexity of food products in the market present challenges for generalizing the findings across all categories.

Practical implications: The results of this research offer valuable insights for policymakers and stakeholders in the agricultural sector. They can be utilized to tackle existing challenges in the food supply chain, including insufficient domestic production, rising food prices, and inefficiencies in resource allocation. However, the model's limitations should be considered when applying its recommendations to various food categories.

Social implications: The study highlights the significance of social dimensions in sustainable food systems by incorporating indicators related to self-sufficiency in both plant-based and animal-based food production. These indicators reflect the broader societal goal of ensuring equitable access to nutritious food for all segments of the population.

Originality/value: This research presents a novel approach by designing four distinct scenarios, six sustainability indicators, and evaluating seventeen types of food products of plant and animal origin. The scenarios are tailored to address specific weaknesses in Iran's sustainable food supply chain. Each scenario involves optimal resource allocation based on environmental factors (e.g., water usage, greenhouse gas emissions), economic factors (e.g., import/export prices), and social factors (e.g., self-sufficiency). The findings provide actionable guidance for the Ministry of Agricultural Jihad to enhance food production strategies and rectify existing imbalances in the national food system.

Keywords: Sustainable Food Supply Chain, TOPSIS, Fuzzy Dematel, Goal Programming, Multi-Objective Optimization



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۶، شماره ۳، پیاپی ۴۲، پاییز ۱۴۰۴

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴ ص ۴۷-۷۲



DOI: [10.22108/pom.2025.142730.1577](https://doi.org/10.22108/pom.2025.142730.1577)

(مقاله پژوهشی)

اولویت‌بندی سناریوهای بهینه‌سازی شده در زنجیره تأمین مواد غذایی

یحیی زارع مهرجردی^{۱*}؛ امیرحسین کریمی^۲

۱- استاد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، yzare@yazd.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، m.a.h.k.z1999@gmail.com

چکیده: امروزه با توجه به شرایط نامناسب آب‌وهوایی و تغییرات اقلیمی در دنیا و ایران، لزوم توجه به مبحث پایداری در تمام موضوعات احساس می‌شود. در این تحقیق، ۶ شاخص تعریف شده است که هر یک از آنها به یک بعد پایداری مربوط است. این شاخص‌ها شامل میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و آب مصرفی، مقدار تراز تجاری و میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی حیوانی و گیاهی و پروتئین حیوانی‌اند. همچنین ۴ سناریو یا رخداد، که احتمال وقوع آنها در زنجیره تأمین مواد غذایی در ایران نسبتاً زیاد است، بررسی و با شاخص‌های تعریف‌شده سنجیده شده‌اند. پرسش اصلی این تحقیق، نحوه ارتباط شاخص‌ها با یکدیگر و چگونگی تأثیر سناریوی انتخاب‌شده بر هر بعد پایداری است. در نهایت با استفاده از روش تاپسیس، سناریوها براساس این شاخص‌ها اولویت‌بندی شده است. همچنین به منظور تعیین نحوه و میزان اثرگذاری یا اثرپذیری هر معیار از دیگر معیارها، از روش دیمتل فازی استفاده و پرسش‌نامه‌ای به این جهت، طراحی شده است و خبرگان آن را پر کرده‌اند. نتیجه حاصل شده به این صورت است که سناریوی ۴، که به طور مستقیم به بعد شاخص اقتصادی تمرکز دارد، در اولویت اول قرار گرفته است. از طرف دیگر معیارهای «میزان آب مصرفی» و «خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی»، معیارهای اثرگذار و علی و مابقی معیارها اثرپذیرند. معیارهای «میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی حیوانی» و «میزان خودکفایی در تولید پروتئین حیوانی»، بیشترین تعامل را با دیگر معیارها دارند.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین پایدار مواد غذایی، تاپسیس، دیمتل فازی، برنامه‌ریزی آرمانی، بهینه‌سازی

چندهدفه



۱- مقدمه

زنجیره تأمین پایدار مواد غذایی، سه بعد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی را در نظر می‌گیرد. بعد اجتماعی زنجیره تأمین مواد غذایی بر مسائلی مانند عدالت در توزیع مواد غذایی در سراسر دنیا و خودکفایی کشورها در تأمین مواد غذایی موردنیاز خود، تأکید دارد (Ehtesham Rasi & Sohanian, 2021).

افزایش تقاضا برای مواد غذایی و به‌دنبال آن افزایش فعالیت‌های کشاورزی، دولت‌ها را برای رفع نیازهای آتی، وادار به تولید بیشتر مواد غذایی می‌کند که این موضوع، باعث برهم‌خوردن نظم آب‌وهوایی می‌شود (Ogbolumani & Nwulu, 2021). در حال حاضر زنجیره تأمین مواد غذایی، تأثیر منفی زیادی بر محیط‌زیست دارد؛ به‌طوری‌که انتشار حدود ۱۸٪ از گازهای گلخانه‌ای، به این صنعت مربوط است (Drofenik et al., 2023).

با توجه به مطالب بالا، ضرورت و اهمیت این تحقیق، لزوم تولید پایدار مواد غذایی با در نظر گرفتن هر سه بعد پایداری است.

هدف اصلی این تحقیق، دستیابی به یک راه‌حل برای جلوگیری از اثر منفی زنجیره تأمین مواد غذایی بر محیط‌زیست و جلوگیری از صرف منابع اضافی برای تولید و واردات مواد غذایی (یارانه‌های پرداختی از سوی دولت)، با ارائه راه‌حل‌هایی است که تضمین غذایی کشور ایران را نیز در نظر بگیرد.

مدیریت زنجیره تأمین پایدار در دهه‌های اخیر در دانشگاه و صنعت، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Gholizadeh et al., 2021). محسنی و همکاران^۱ (۲۰۲۲)، شاخص‌های طراحی شده در زنجیره تأمین مواد غذایی را اولویت‌بندی کردند. این شاخص‌ها شامل افزایش سلامتی مردم، اشتغال‌زایی و کاهش آلودگی آب‌وخاک‌اند. میزان تأثیر شاخص‌های پایداری بر یکدیگر، با استفاده از روش دیمتل فازی^۲ بررسی شده است که نتیجه آن کاهش و بهینه‌سازی مصرف آب و دارای بیشترین تأثیر بر دیگر عوامل است. این شاخص‌ها شامل حذف سوخت‌های فسیلی، بهینه‌سازی استفاده از آب و تصویر ذهنی مثبت مصرف‌کنندگان از زنجیره تأمین پایدارند. شهابادی و زارع مهرجردی^۳ (۲۰۲۲) نیز، عوامل تأثیرگذار بر تولید برنج را با استفاده از روش تاپسیس^۴ فازی اولویت‌بندی کرده‌اند و نتیجه‌اش این بود که متغیرهای تکنولوژی، تحقیق و توسعه، دانش کاشت و برداشت و عوامل کشت، با یک‌روند مشخص به افزایش پایداری منجر می‌شوند. همچنین رضایی و همکاران^۵ (۲۰۲۳) در یک تحقیق، نحوه تأثیر هر بعد پایداری را بر دیگر جنبه‌های پایداری، با استفاده از روش دیمتل فازی بررسی کرده‌اند. در این تحقیق هر بعد پایداری با استفاده از چندین شاخص بررسی و سپس با استفاده از یک پرسش‌نامه، دیتاهای لازم از خبرگان جمع‌آوری شده است. امیری و همکاران^۶ (۲۰۲۰) نیز، زنجیره تأمین پایدار گندم را از طریق مدل‌سازی پویایی بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، ۴ سناریو در نظر گرفته شده است. همچنین با استفاده از چند شاخص، عملکرد هر سناریو سنجیده شده است. همچنین ارتیز باریس و همکاران^۷ (۲۰۱۹) در یک تحقیق، از روش‌های ای‌اچ‌پی^۸ و تاپسیس برای اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان گوشت خوک استفاده کرده‌اند. همچنین آنها از روش دیمتل^۹ برای ارزیابی میزان وابستگی بین عناصر تصمیم‌گیری استفاده کرده‌اند. تیرکلایی و همکاران^{۱۰} (۲۰۲۱) در تحقیقی، تأمین‌کنندگان سبز را در زنجیره تأمین کشاورزی-غذایی با استفاده از ترکیب روش‌های ای‌اچ‌پی، تاپسیس و مدل برنامه‌ریزی هدفی مقاوم آر جی پی^{۱۱} انتخاب می‌کنند. هدف اصلی این تحقیق، تخصیص بهینه سفارش‌ها تحت شرایط عدم

قطعیت است. اسدی و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۵) نیز در تحقیقی، چالش‌های پایداری زنجیره تأمین مواد غذایی را در ایران شناسایی و اولویت‌بندی کرده‌اند. این اولویت‌بندی با استفاده از روش ای‌اچ‌پی انجام شده است. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد مهم‌ترین چالش در پایداری زنجیره تأمین ایران، کارایی پایین و ضعف در شیوه‌های مصرف صحیح منابع در حوزه کشاورزی است. کومار و کومار^{۱۳} (۲۰۲۳) در تحقیقی، دو سناریوی استفاده و عدم استفاده از فناوری بلاک‌چین را در زنجیره تأمین پایدار پنیر، شبیه‌سازی کرده‌اند. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از فناوری بلاک‌چین، باعث کاهش زمان سفارش‌گذاری و کاهش آلودگی کامیون‌های حمل‌ونقل پنیر می‌شود.

با بررسی مطالعات پیشین و تحقیقات مشابه در حوزه زنجیره تأمین پایدار مواد غذایی، تحقیق مشابهی یافت نشد که شاخص‌ها و سناریوها را مطابق وضعیت فعلی زنجیره تأمین مواد غذایی در ایران، با در نظر گرفتن طیف وسیعی از مواد غذایی و انواع روش‌های کشت و اولویت‌بندی سناریوهای طراحی شده در نظر گرفته باشد. بیشتر تحقیقات، تأمین‌کنندگان را اولویت‌بندی کرده بودند و سناریوی متناسب با شرایط کشور را در هر یک از جنبه‌های پایداری در نظر گرفتن انواع کشت هر ماده غذایی، طراحی نکرده بودند.

برای پاسخ مناسب به چالش‌های موجود در زنجیره تأمین مواد غذایی، ابتدا باید شاخص‌های پایدار تعریف و پایش شوند و پس از آن، تأثیر و میزان ارتباط هر معیار بر دیگر معیارها شناسایی شود. در انتهای این تحقیق، به سؤالات زیر پاسخ داده می‌شود:

- سناریوی انتخاب‌شده بر کدام یک از ابعاد پایداری تمرکز بیشتری دارد؟
- تأثیر سناریوهای مختلف بر ابعاد پایداری چگونه است؟
- نحوه ارتباط و اثر شاخص‌ها بر یکدیگر چگونه است؟

در نهایت نتایج این تحقیق، معیار تصمیم‌گیری مناسبی برای مدیران صنعت کشاورزی در ایران است. در ادامه مقاله در بخش ۲، مبانی نظری تحقیق بیان شده است. در بخش ۳ نیز، روش پژوهش شامل مدل‌سازی، تعریف مسئله و تشریح سناریوها شرح داده شده است. در بخش ۴ یافته‌های تحقیق، در بخش ۵ بحث و در بخش ۶ نتیجه‌گیری تحقیق شرح داده شده است.

۲- مبانی نظری

۲-۱ زنجیره تأمین پایدار مواد غذایی

زنجیره تأمین پایدار مواد غذایی یک سیستم گسترده از تولید، حمل‌ونقل، فراوری، توزیع و فروش مواد غذایی است که با هدف تأمین پایدار مواد غذایی به جامعه در حوزه محیط‌زیست، بعد اجتماعی و اقتصادی کمک می‌کند. زنجیره تأمین پایدار مواد غذایی، سه بعد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی را در نظر می‌گیرد (Ehtesham Rasi & Sohanian, 2021).

۲-۲ روش تصمیم‌گیری تاپسیس

تاپسیس یک روش تصمیم‌گیری و براساس این استوار است که بهترین گزینه‌ها باید کمترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی داشته باشند (Ehtesham Rasi & Sohanian, 2021).

۳-۲ تکنیک دیمتل فازی

روش دیمتل، یک ابزار کاربردی برای تعیین معنای توصیفات و روابط بین معیارها تعریف شده است. مهم‌ترین جنبه‌ای که روش دیمتل را از دیگر رویکردهای تصمیم‌گیری متمایز می‌کند، توانایی ارزیابی رابطه علت و معلولی بین عوامل است (Kuzu, 2021).

دیمتل فازی روابط علی و معلولی بین روابط را بررسی می‌کند؛ بنابراین برای شناسایی میزان اثرگذاری و اثرپذیری عوامل مختلف بر یکدیگر، مناسب است (Jindal et al., 2021). از زمانی که روش دیمتل پیشنهاد شد، به‌طور گسترده برای شناسایی عوامل حیاتی و تحلیل رابطه علت و معلولی در مسائل مختلف تصمیم‌گیری در دنیای واقعی استفاده شده است (Zhang et al., 2023).

۴-۲ پایداری

پایداری یعنی تمرکز بر آثار بلندمدت عملیات شرکت و دوام منابع برای استفاده در آینده؛ در حالی که امروز سودآور است (Rostami et al., 2022).

۵-۲ برنامه‌ریزی آرمانی

برنامه‌ریزی آرمانی یک روش حل مسائل چندهدفه است. در این روش، سطح آرزوی هر تابع هدف با روش برنامه‌ریزی هدف تعریف می‌شود (Taheri et al., 2023).

۳- روش شناسی پژوهش

در این تحقیق، با توجه به ماهیت چندبعدی مسئله و نیاز به تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده، از ترکیب روش‌های کمی و چندمعیاره استفاده شده است. از روش حل برنامه‌ریزی آرمانی، برای حل معادله و دستیابی به اهداف متضاد به کار گرفته شد؛ زیرا این روش، توانایی بالایی در مدیریت اهداف چندگانه دارد. روش تاپسیس برای اولویت‌بندی سناریوها انتخاب شد؛ زیرا امکان مقایسه گزینه‌ها براساس نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل را فراهم می‌کند. همچنین روش دیمتل فازی برای شناسایی روابط علی بین عوامل مؤثر به کار گرفته شد تا ساختار تأثیرگذاری متقابل عوامل به‌صورت دقیق‌تر و با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌سازی شود. ترکیب این روش‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده است که هرکدام مکمل دیگری بوده است و در مجموع، تصویری جامع و اتکاشدنی را از مسئله ارائه می‌دهند. این پژوهش در ۳ فاز و ۶ گام انجام شده است. گام‌ها و فازهای این تحقیق، در شکل ۱ نشان داده شده است.

فاز اول: تعریف مسئله و جمع‌آوری داده‌ها

گام ۱: در این گام، مسئله تحقیق با مطالعه پژوهش‌های گذشته و مرور پیشینه موضوع تعریف شده است.

گام ۲: جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز مسئله با توجه به سناریوهای تعریف‌شده در گام ۱.

فاز دوم: مدل‌سازی و حل مسئله

گام ۳: مدل‌سازی مسئله.

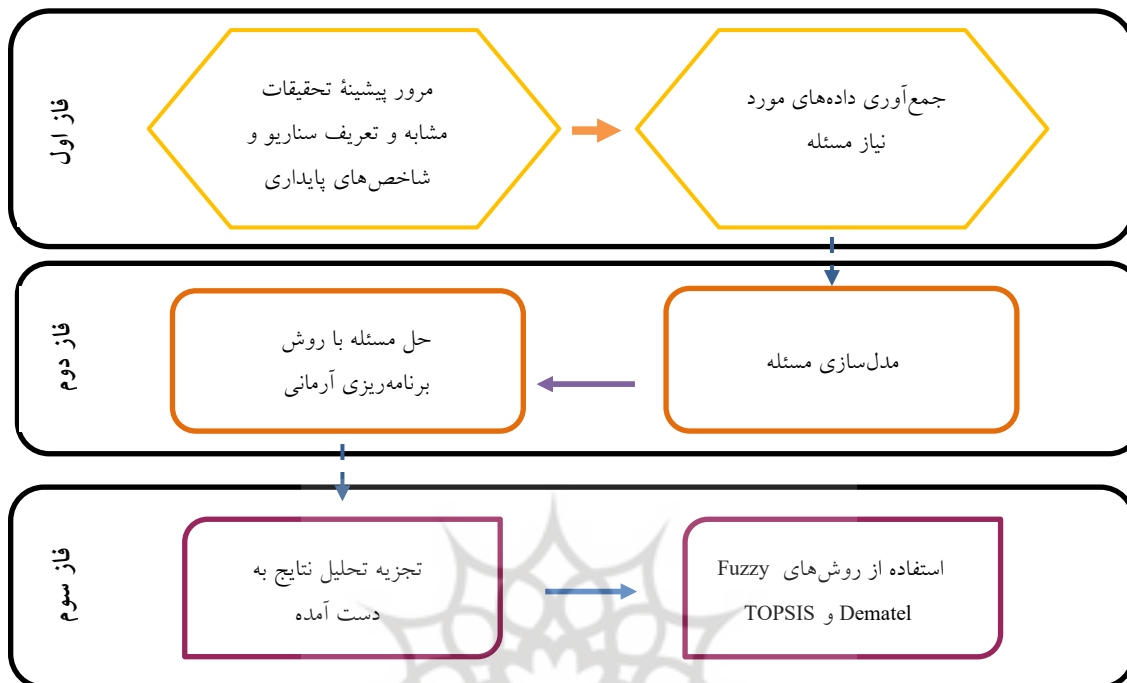
گام ۴: حل مسئله با روش برنامه‌ریزی آرمانی و تعریف مدل خاص هر سناریو.

فاز سوم: تجزیه و تحلیل نتایج و انتخاب سناریوی بهینه

گام ۵: تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از هر سناریو.

گام ۶: انتخاب سناریوی بهینه با استفاده از روش‌های تاپسیس و استفاده از روش دیمتل فازی برای سنجش

میزان اثرگذاری هر معیار بر دیگر معیارها.



شکل ۱- چارچوب پژوهش

Fig 1- Study framework

۱-۳ شناسایی سناریوها و شاخص‌های پایداری

در ادامه تحقیق با انجام مرور پیشینه، شاخص‌های موجود در زمینه زنجیره تأمین پایدار مواد غذایی اقدام شناسایی شده است. شاخص‌های استخراج شده از مقالات مختلف مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱- شناسایی شاخص‌های پایداری

Table 1- Identification of sustainability indicators

ردیف	محقق	جنبه‌های پایداری		
		اقتصادی	زیست محیطی	اجتماعی
۱	سلطانی و همکاران ^{۱۴} (۲۰۲۰)		۱	۲
۲	طاهر ^{۱۵} (۲۰۱۹)	۲	۱	۳
۳	قلی‌زاده و همکاران ^{۱۶} (۲۰۲۱)	۱ ۲	۳	۴

شخص ها	جنبه‌های پایداری			محقق	ش.ع.ن
	اجتماعی	زیست محیطی	اقتصادی		
۱. افزایش سلامتی مردم					
۲. اشتغال‌زایی و استفاده از نیروهای بومی		۳			
۳. کاهش آلودگی آب و خاک	۱	۴	۶		
۴. کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای	۲	۵	۷		۴
۵. کاهش مصرف آب					
۶. کاهش هزینه‌ها					
۷. افزایش درآمدها					
۱. خودکفایی					
۲. میزان درآمدها			۲		
۳. میزان هزینه‌ها	۱	۴	۳	درفنیک و همکاران ^{۱۷} (۲۰۲۳)	۵
۴. میزان تولید گازهای گلخانه‌ای					
۵. میزان استفاده از کودهای شیمیایی					

در نهایت سناریو و شاخص‌های اولیه براساس مرور پیشینه، بررسی مقالات مشابه و مشکلات و ضعف‌های حال حاضر کشور استخراج و پس از آن با نظر خبرگان شاخص و سناریوهای مناسب، انتخاب شده‌اند. این ۶ شاخص برای تمامی ابعاد پایداری است که به شرح ذیل‌اند:

۱. بعد زیست محیطی

• C1: میزان آب مصرفی (-)

• C2: میزان گازهای گلخانه‌ای تولیدشده (-)

۲. بعد اقتصادی

• C3: میزان تراز تجاری حوزه کشاورزی (+)

۳. بعد اجتماعی

• C4: میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی (+)

• C5: میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ حیوانی (+)

• C6: میزان خودکفایی در تولید پروتئین حیوانی (+)

۲-۳ تعریف مسئله

در مواجهه با چالش‌های روزافزون امنیت غذایی، پایداری محیط زیست و بهره‌وری منابع، انتخاب ترکیب بهینه‌ای از محصولات کشاورزی و شیوه‌های تولید، اهمیت حیاتی پیدا کرده است. در این پژوهش، چهار سناریوی متفاوت برای تولید مواد غذایی، با توجه به شرایط فعلی کشور و هریک از جنبه‌های پایداری طراحی شده‌اند. این مدل شامل ۱۳ نوع ماده غذایی گیاهی و ۴ نوع ماده غذایی حیوانی است. هر ماده غذایی در صورت امکان کشت در قالب چهار نوع کشت مختلف، بررسی شده است تا امکان تحلیل جامع‌تری از الگوهای تولید فراهم شود.

هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی میزان تولید هر ماده غذایی در هر سناریو و نوع کشت و در نهایت انتخاب سناریوی بهینه با توجه به معیارهای چندگانه است. برای این منظور، ابتدا با استفاده از روش ترکیبی تاپسیس، سناریوها براساس ۶ معیار کلیدی اولویت بندی شدند؛ سپس، به منظور تحلیل تأثیر هر سناریو بر معیارهای مدنظر، از روش فازی دیمتیل بهره گرفته شد تا روابط علی و شدت تأثیرات میان معیارها به صورت دقیق‌تر مشخص شود. این پژوهش با ترکیب مدل‌سازی سناریو، تحلیل چندمعیاره و روش‌های تصمیم‌گیری فازی، تلاش دارد تا چارچوب علمی را برای انتخاب الگوی بهینه تولید مواد غذایی ارائه دهد که هم از نظر زیست محیطی پایدار باشد و هم نیازهای تغذیه‌ای جامعه را به صورت مؤثر پاسخ دهد. مواد غذایی و انواع کشاورزی‌های ذیل، در دامنه این تحقیق‌اند.

• مواد غذایی با منشأ حیوانی:

- ۱) گوشت قرمز (گاو و گوسفند)؛
- ۲) گوشت سفید (مرغ)؛
- ۳) شیر گاو؛
- ۴) تخم مرغ.

• مواد غذایی با منشأ گیاهی:

❖ مواد غذایی گیاهی به کار برده شده از طریق انسان:

- ۱) غلات شامل: گندم، برنج و جو؛
- ۲) میوه‌ها شامل: پسته؛
- ۳) صیفی‌جات شامل: هندوانه، زعفران، گوجه‌فرنگی و خیار سبز؛
- ۴) سبزی‌ها: سیب‌زمینی و پیاز؛
- ۵) دانه‌های روغنی شامل کلزا و سویا.

❖ مواد غذایی استفاده‌شده حیوانات:

- ۱) کاه، علوفه و خوراک دام و طیور (ذرت، سویا و جو)
- همچنین روش‌های کشت در ایران نیز به ۴ دسته مختلف تقسیم می‌شوند که شامل موارد ذیل‌اند:
- ۱) کشاورزی گلخانه‌ای؛
 - ۲) کشاورزی غرق آبی؛
 - ۳) کشاورزی نوین؛
 - ۴) کشاورزی دیمی.

۳-۳ سناریوها

سناریوی ۱: رسیدن به خودکفایی در تولید مواد غذایی استراتژیکی نظیر گندم، دانه‌های روغنی، علوفه، خوراک دام و طیور، برنج، گوشت قرمز و سفید، تخم‌مرغ و شیر

با توجه به اهمیت مواد غذایی مهم نظیر گندم، برنج، دانه‌های روغنی نظیر کلزا و خوراک دام و طیور نظیر ذرت، به جهت کاهش ریسک در مواقع وقوع جنگ‌های بین‌المللی، اعمال تحریم‌های گسترده، وقوع خشک‌سالیهای جهانی و دیگر موارد، انتظار می‌رود کشورمان در تولید این مواد غذایی به خودکفایی نسبی ۸۰٪^{۱۸} برسد. افزایش کشت این محصولات، مستلزم افزایش تخصیص منابعی نظیر آب، زمین‌های کشاورزی و نیروی انسانی است. هم‌اکنون کشور ما در تولید گندم دارای خودکفایی ۱۰۰٪ است؛ ولی این خودکفایی در مواد غذایی مهم دیگر، وجود ندارد. طبیعی است که در پی افزایش کشت این محصولات مهم، مقداری از سهم دیگر تولیدات فعلی بخش کشاورزی باید کاهش یابد تا منابع به کشت این مواد غذایی تخصیص داده شود. این استراتژی، اثر مستقیمی بر بخش خودکفایی دارد. همچنین در صورت صرفه اقتصادی کاشت این محصولات در داخل نسبت به واردات آنها، این استراتژی بر جنبه اقتصادی نیز تأثیر مثبت دارد.

سناریو ۲: مصرف آب در حوزه کشاورزی به میزان استاندارد (شبیه‌سازی شرایط کم‌آبی)

کشور ما در یک منطقه خشک و نیمه خشک و کم بارش، با پتانسیل تبخیر بالای آب واقع شده است. میزان بارش بلندمدت سالیانه در بیشتر مناطق ایران ۲۵۰ میلی‌متر، یعنی یک سوم میانگین دیگر مناطق جهان و در ۸ درصد مناطق بیش از ۵۰۰ میلی‌متر بوده است (Maghrebi et al., 2020). از طرفی مطابق یک تحقیق دیگر، میزان مصرف فعلی آب در حوزه کشاورزی و تولید مواد غذایی ۸۶ میلیارد متر مکعب است که به منظور رسیدن به یک سطح مناسب برای محیط‌زیست، این رقم باید به عدد ۳۸/۵ میلیارد متر مکعب در سال برسد که این عدد نشان‌دهنده لزوم کاهش مصرف آب در حوزه کشاورزی و تولید مواد غذایی به میزان ۵۵٪ تا ۶۰٪ است (Soltani et al., 2020).

هدف این سناریو، تولید مواد غذایی در شرایط کم‌آبی و مطابق با استانداردهای جهانی است. میزان آب مجاز برای استفاده در زنجیره تأمین مواد غذایی حاضر در این تحقیق، سالانه ۲۵ میلیارد متر مکعب است.

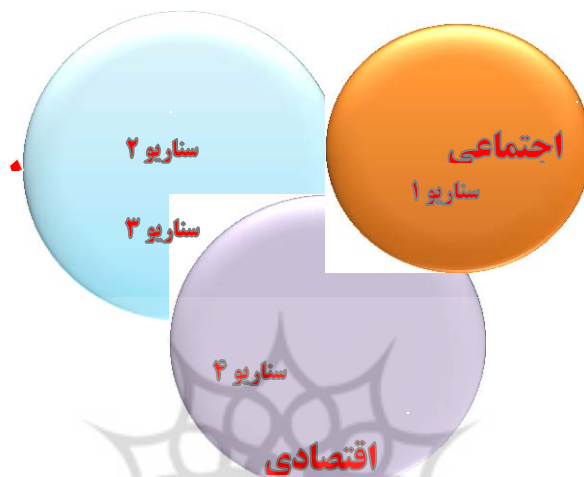
سناریوی ۳: تأمین حداقل ۵۰ درصدی مواد غذایی، که مصرف آب بالایی دارند، از طریق واردات

مطابق با آمار وزارت نیرو، در حال حاضر در بخش کشاورزی ایران حدوداً ۸۱ میلیارد متر مکعب آب مصرف می‌شود که مقدار بسیار زیادی است. با توجه به بحران آبی که در حال حاضر در کشور ما وجود دارد، کشور ما باید به سمت صرفه‌جویی در مصرف آب حرکت کند. برای ترمیم سفره‌های زیرزمینی، چند سالی برداشت از آنها کاهش می‌یابد و استراتژی واردات مواد غذایی پرمصرف به جای تولید آنها در نظر گرفته می‌شود.

این محصولات شامل:

- برنج؛
- گوشت قرمز؛
- گوشت مرغ؛
- تخم‌مرغ و
- دانه‌های روغنی هستند.

سناریوی ۴: رسیدن به سود خالص ۱۵ میلیارد دلاری در ازای صادرات و واردات مواد غذایی مدنظر در این سناریو، هدف حداکثرکردن تراز تجاری کشور در حوزه مواد غذایی است. دلیل این هدف، وجود ظرفیت تولید و صادرات محصولات پرسود نظیر پسته و زعفران و در اولویت قرار گرفتن افزایش تولید این محصولات و محصولات وارداتی است که حجم مصرف زیادی نیز دارند (ذرت و علوفه دامی و دانه‌های روغنی). محصولات صادراتی ایران در حال حاضر، که در دامنه این تحقیق نیز هستند، شامل تخم‌مرغ، شیر، زعفران، سیب‌زمینی، هندوانه، پیاز و پسته‌اند. این سناریو برای مشخص کردن مقدار تولید و صادرات هر محصول برای رسیدن به سود خالص سالیانه ۱۵ میلیارد دلار کوشیده است. شکل ۲، نشان‌دهنده تأثیر مثبت هر سناریو بر هر یک از ابعاد پایداری است.



شکل ۲- تأثیر مثبت هر سناریو روی هر بعد پایداری

Fig 2- The positive impact of each scenario on each dimension sustainability

۳-۴ مدل مسئله

۳-۴-۱ نمادهای مدل‌سازی

جدول ۲ نشان‌دهنده متغیر، پارامتر و اندیس‌های مدل‌سازی است.

جدول ۲- نمادهای مدل‌سازی

Table 2- Modeling Symbols

اندیس‌ها:
i: نوع ماده غذایی با منشأ گیاهی
j: نوع ماده غذایی با منشأ حیوانی
k: نوع کشاورزی
پارامترها:
Ycph: مقدار تولید هر نوع ماده غذایی در هر هکتار (هکتار/تن)
Aofni _i : مقدار موردنیاز از هر نوع ماده غذایی با منشأ گیاهی در سال (سال/تن)
Af _{ij} : مقدار تولید انواع غذا با منشأ حیوانی به‌ازای هر عامل (تن)
Aofnj _j : مقدار مورد نیاز از هر نوع ماده غذایی با منشأ حیوانی در سال (سال/تن)
Ccaci _{ij} : میزان خوراک مورد نیاز عامل‌های تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی (تن/تن)
Smnp: میزان استاندارد درشت‌مغذی پروتئین مورد نیاز برای جمعیت ایران در سال (سال/تن)
Ip: جمعیت ایران (میلیون نفر)

Awip: میانگین وزن مردم ایران (کیلوگرم)

Ggpfik: میزان گاز گلخانه‌ای تولیدشده به‌ازای کشت و یا تولید هر نوع ماده غذایی با منشأ گیاهی (تن/تن)

Ggptj: میزان گاز گلخانه‌ای تولیدشده به‌ازای کشت و یا تولید هر نوع ماده غذایی با منشأ حیوانی (تن/تن)

Ggpfj: میزان گازهای گلخانه‌ای تولیدشده در اثر کشت مواد غذایی وارداتی (تن/تن)

Wupfikik: میزان آب مصرفی برای تولید هر تن نوع ماده غذایی با منشأ گیاهی (مترمکعب/تن)

Wupfj: میزان آب مصرفی برای تولید هر تن نوع ماده غذایی با منشأ حیوانی (مترمکعب/تن)

Wypfj: میزان آب استفاده‌شده برای تولید محصولات گیاهی وارداتی (مترمکعب/تن)

Iffpj: درآمد حاصل از صادرات انواع مواد غذایی با منشأ حیوانی (تن/دلار)

Iffpi: درآمد حاصل از صادرات انواع مواد غذایی با منشأ گیاهی (تن/دلار)

Tpafj: هزینه حاصل از واردات انواع مواد غذایی با منشأ حیوانی (تن/دلار)

Tpafi: هزینه حاصل از واردات انواع مواد غذایی با منشأ گیاهی (تن/دلار)

Mffij: کسر جرمی میزان پروتئین موجود در هر ماده غذایی با منشأ حیوانی (/)

aij: ضریب میزان ضایعات هر ماده غذایی با منشأ گیاهی

ajj: ضریب میزان ضایعات هر ماده غذایی با منشأ حیوانی

متغیرها:

Italjk: میزان زمین‌های اختصاص‌یافته به هر ماده غذایی با هر نوع کشت (هکتار)

Apefj: مقدار هر ماده غذایی تولیدشده با منشأ گیاهی (سال/تن)

Aofwji: میزان ضایعات مواد غذایی با منشأ گیاهی (سال/تن)

Aeifj: مقدار ماده غذایی صادرشده با منشأ گیاهی (سال/تن)

Aiifj: مقدار ماده غذایی واردشده با منشأ گیاهی (سال/تن)

Apefji: مقدار هر ماده غذایی تولیدشده با منشأ حیوانی (سال/تن)

Nodc: تعداد عامل تولید غذا با منشأ حیوانی

Aofwji: میزان ضایعات مواد غذایی با منشأ حیوانی (سال/تن)

Aeaij: مقدار ماده غذایی صادرشده با منشأ حیوانی (سال/تن)

Aaiiaj: مقدار ماده غذایی واردشده با منشأ حیوانی (سال/تن)

Aofinaj: میزان مواد غذایی (کاه و علوفه و خوراک دام و طیور) مورد نیاز برای خوراک حیوانات (سال/تن)

Iffe: درآمد کل صادرات مواد غذایی (سال/دلار)

Coif: هزینه کل واردات مواد غذایی (سال/دلار)

Z1: تابع هدف میزان تولید گازهای گلخانه‌ای در اثر تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی و حیوانی

Z2: تابع هدف میزان مصرف آب در اثر تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی و حیوانی

Z3: تابع هدف تراز خالص اقتصادی

Z4: تابع هدف میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی

Z5: تابع هدف میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ حیوانی

Z6: تابع هدف میزان خودکفایی در تولید درشت‌مغذی پروتئین با منشأ غذاهای حیوانی

Z: تابع هدف میزان انحراف از هدف در تابع هدف برنامه‌ریزی آرمانی

نمادهای متغیرهای باینری:

Yefpi: متغیر باینری برای صادرات مواد غذایی با منشأ گیاهی (در صورت نبودن، نشان‌دهنده صادرات و در صورت بودن نشان‌دهنده نبود صادرات مواد غذایی با منشأ گیاهی است).

Yefaj: متغیر باینری برای صادرات مواد غذایی با منشأ حیوانی (در صورت نبودن نشان‌دهنده صادرات و در صورت بودن نشان‌دهنده نبود صادرات مواد غذایی با منشأ حیوانی است).

Yifpi: متغیر باینری برای واردات مواد غذایی با منشأ گیاهی (در صورت نبودن نشان‌دهنده واردات و در صورت بودن نشان‌دهنده نبود واردات مواد غذایی با منشأ گیاهی است).

Yifaaj: متغیر باینری برای واردات مواد غذایی با منشأ حیوانی (در صورت نبودن نشان‌دهنده واردات و در صورت بودن نشان‌دهنده نبود واردات مواد غذایی با منشأ حیوانی است).

۳-۵ مدل ریاضی

۳-۵-۱ محدودیت ظرفیت زمین کشاورزی

این معادله نشان‌دهنده مقدار کل زمین در دسترس برای کشاورزی و مقدار زمین اختصاص داده شده به هر نوع کشت است که در این معادله نشان‌دهنده مقدار زمین اختصاص داده شده به محصول با منشأ گیاهی i و k نشان‌دهنده نوع کشت محصول یادشده است. مجموع کل مقدار زمین‌های اختصاص داده شده به انواع مواد غذایی همراه با هر نوع کشت، باید کوچک‌تر یا مساوی کل زمین‌های موجود باشد.

معادله ۱: محدودیت ظرفیت کشت گلخانه‌ای

$$\sum_{i=1}^{13} Ttal_{i1} \leq 10000 \quad (1)$$

معادله ۲: محدودیت ظرفیت زمین‌های کشت نوین

$$\sum_{i=1}^{13} Ttal_{i3} \leq 1550000 \quad (2)$$

معادله ۳: محدودیت ظرفیت زمین‌های کشاورزی با کشت دیم و غرق‌آبی

این معادله نشان‌دهنده میزان زمین‌های در دسترس برای کشت با دو نوع غرق‌آبی و دیمی است. به دلیل نبود لزوم وجود تجهیزات خاص برای این دو کشت، این دو نوع کشت با یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند.

$$\sum_{i=1}^{13} Ttal_{i2} + \sum_{i=1}^{13} Ttal_{i4} \leq 9450000 \quad (3)$$

معادله ۴: میزان تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی

این معادله نشان‌دهنده مقدار تولید انواع مواد غذایی با منشأ گیاهی در داخل کشور است.

$$\sum_{k=1}^4 Apef_{ik} = \sum_{k=1}^4 Ycph_{ik} \cdot Ttal_{ik} \quad \forall i \quad (4)$$

معادله ۵: میزان ضایعات هر ماده غذایی با منشأ گیاهی

این معادله نشان‌دهنده میزان ضایعات مواد غذایی با توجه به ضریب α در نظر گرفته شده برای هر ماده غذایی است.

$$Aofwi_i = \frac{\alpha i_i}{2} * \left(\sum_{k=1}^4 Apef_{ik} \right) \quad \forall i \quad (5)$$

معادله ۶: تعادل جرمی مواد غذایی با منشأ گیاهی

این معادله نشان‌دهنده تعادل جرمی در میزان تولید و واردات انواع مواد غذایی در برابر میزان مصرف و صادرات مواد غذایی است.

$$Aofni_i + Aofwi_i = \sum_{k=1}^4 Apef_{ik} + Aiifi_i - Aefi_i \quad \forall i \quad (6)$$

معادله ۷: میزان تولید مواد غذایی با منشأ حیوانی

این معادله نشان‌دهنده مقدار انواع غذاهای تولیدشده با منشأ حیوانی در داخل کشور است.

$$Apefj_j = Nodc_j \cdot Afpf_j \quad \forall j \quad (7)$$

معادله ۸: میزان ضایعات هر ماده غذایی با منشأ حیوانی

$$Aofwj_j = \frac{\alpha_j}{2} * (Apefj_j) \quad \forall j \quad (8)$$

معادله ۹: تعادل جرمی مواد غذایی با منشأ حیوانی

این معادله نشان‌دهنده تعادل در مقدار تولید، مصرف، واردات و صادرات انواع مواد غذایی با منشأ حیوانی است.

$$Aofnj_j + Aofwj_j = Apefj_j + Aii_a_j - Aeia_j \quad \forall j \quad (9)$$

معادله ۱۰: میزان مواد خوراکی مورد نیاز دام و طیور برای تولید مواد غذایی با منشأ حیوانی

این معادله نشان‌دهنده مقدار مواد خوراکی مورد نیاز برای تغذیه حیواناتی است که عامل تولید انواع مواد غذایی با منشأ حیوانی‌اند.

$$Aofna_i = \sum_{j=1}^2 Ccac_{ij} . Apefj_j + \sum_{j=3}^4 Ccac_{13j} . Apefj_j \quad \forall i = \{12,13\} \quad (10)$$

معادله ۱۱: میزان پروتئین حیوانی مورد نیاز مردم ایران

$$Smnp = Ip * Awip * 365 * 0.8 * 10^{-6} \quad (11)$$

❖ توابع هدف مربوط به بعد زیست‌محیطی:

معادله ۱۲: تابع هدف میزان تولید گازهای گلخانه‌ای

این معادله نشان‌دهنده مجموع مقدار گازهای گلخانه‌ای کربن معادل تولیدشده (کربن‌دی‌اکسید) حاصل از تولید انواع مواد غذایی با منشأ گیاهی و حیوانی براساس میزان پارامترهای تأثیرگذار (مقدار تولید، مقدار صادرات، مقدار واردات و مقدار مصرف) است.

$$Z_1 = \text{Min} \left(\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{13} Ggpf_{ik} . Apef_{ik} + \sum_{j=1}^4 Ggpt_j . Apefj_j - \sum_{i=12}^{13} Aii_{fi} . Ggpf_{i_i} \right) \quad (12)$$

معادله ۱۳: تابع هدف میزان مصرف آب

این معادله نشان‌دهنده مقدار مجموع آب مصرفی برای تولید انواع مواد غذایی با منشأ گیاهی و حیوانی براساس میزان پارامترهای تأثیرگذار (مقدار تولید، مقدار صادرات، مقدار واردات و مقدار مصرف) است.

$$Z_2 = \text{Min} \left(\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{13} Wupf_{ik} . Apef_{ik} + \sum_{j=1}^4 Wupf_j . Apefj_j - \sum_{i=12}^{13} Aii_{fi} . Wypf_{i_i} \right) \quad (13)$$

در این معادله مقدار آب مصرف‌شده در کشور ایران در اثر کشت و تولید انواع مواد غذایی محاسبه و مقدار آب مصرفی از آن کم می‌شود که در اثر کشت خوراک مورد نیاز حیوانات و از طریق واردات تأمین می‌شود.

❖ معادلات مربوط به بعد اقتصادی

معادله ۱۴: تابع هدف میزان تراز خالص اقتصادی

این معادله نشان‌دهنده مقدار تراز تجاری خارجی کشور (سود) در زمینه کشاورزی است.

$$Z_3 = \text{Max}(Iffe - Coif) \quad (14)$$

معادله ۱۵: درآمد حاصل از صادرات مواد غذایی

این معادله نشان‌دهنده مقدار درآمد حاصل از صادرات انواع مواد غذایی با منشأ گیاهی و حیوانی است.

$$Iffe = \sum_{i=1}^{13} \sum_{k=1}^4 Aeif_{ik} \cdot Iffpi_{ik} + \sum_{j=1}^4 Aeia_j \cdot Iffp_j \quad (15)$$

معادله ۱۶: هزینه حاصل از واردات انواع مواد غذایی

این معادله نشان دهنده مقدار هزینه صرف شده برای واردات انواع مواد غذایی با منشأ گیاهی و حیوانی است.

$$Coif = \sum_{i=1}^{13} Aiiif_i \cdot Tpaifi + \sum_{j=1}^4 Aiiia_j \cdot Tpaif_j \quad (16)$$

❖ معادلات مربوط به بعد اجتماعی

معادله ۱۷ و ۱۸: توابع هدف مرتبط با میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ حیوانی و گیاهی

این معادله نشان دهنده میزان خودکفایی کشور ایران در تولید انواع مواد غذایی با منشأ حیوانی و گیاهی است.

$$Z_4 = \max \left(\frac{\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{13} Apefik}{\sum_{i=1}^{13} Aofni_i} \right) \quad (17)$$

$$Z_5 = \max \left(\frac{\sum_{j=1}^4 Apefj_j}{\sum_{j=1}^4 Aofnj_j} \right) \quad (18)$$

معادله ۱۹: تابع هدف مربوط به خودکفایی در تولید پروتئین حیوانی

این معادله نشان دهنده میزان پروتئین مصرف شده در ایران، که در داخل تولید می شود، نسبت به میزان پروتئین مورد نیاز برای کل مردم است.

$$Z_6 = \max \left(\frac{\sum_{j=1}^4 Mffij_j \cdot Apefj_j}{S_mnp} \right) \quad (19)$$

محدودیت های ۱ الی ۷: محدودیت های کنترل کننده میزان واردات و صادرات مواد غذایی گوشتی و گیاهی و متغیرهای مثبت

$$1 \quad Yefp_i + Yifp_i \leq 1 \quad \forall i$$

$$2 \quad Aeif_i \leq M \cdot Yefp_i \quad \forall i$$

$$3 \quad Aiiif_i \leq M \cdot Yifp_i \quad \forall i$$

$$4 \quad Yefa_j + Yifa_j \leq 1 \quad \forall j$$

$$5 \quad Aeia_j \leq M \cdot Yefa_j \quad \forall j$$

$$6 \quad Aiiia_j \leq M \cdot Yifa_j \quad \forall j$$

$$7 \quad Ttal, Apef, Aofwi, Aeif, Aiif, Apefj, Nodc, Aofwj, Aeia, Aiiia, Aofna, Iffe, Coif, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6 \geq 0$$

در این محدودیت ها، متغیرهای باینری برای هر دسته از مواد غذایی با منشأ حیوانی و گیاهی، نشان دهنده صادر یا وارد شدن آن ماده غذایی است. مجموع دو متغیر باینری برای هر دسته از مواد غذایی حیوانی و گیاهی باید کوچکتر مساوی یک باشد؛ یعنی یک ماده غذایی تنها وارد یا صادر می شود.

۳-۶ روش حل

برای حل مسئله این تحقیق، از روش برنامه ریزی آرمانی استفاده شده است. روش برنامه ریزی آرمانی^{۱۹} به منظور ارضاکردن نسبی اهداف است؛ یعنی تصمیم گیرنده تمام اهداف را به صورت کامل ارضا نمی کند. به همین دلیل در این گونه تصمیمات، تصمیم گیرنده برای به دست آوردن جوابی هرچه نزدیک تر به اهداف مدنظر خود می کوشد. به منظور حل مدل این تحقیق با روش برنامه ریزی آرمانی، ابتدا هرکدام از توابع هدف را به تنهایی و با تمام

محدودیت‌های مدل، با نرم‌افزار گمز خروجی گرفته شده است؛ سپس جواب هریک از توابع هدف در روش حل برنامه‌ریزی آرمانی برابر تابع هدف قرار داده شد و تمام توابع هدف به محدودیت تبدیل شدند. در نهایت با استفاده از یک تابع هدف، که میزان انحراف از هریک از آرمان‌هاست، در کمینه‌سازی انحراف از توابع هدف تلاش شده است؛ برای نمونه، مدل سناریوی ۲ با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی به صورت زیر است:

معادله ۲۰: تابع هدف مدل برنامه‌ریزی آرمانی

$$\text{Min } z = d_1^- + d_2^- + d_2^+ + d_3^+ + d_4^+ + d_5^+ + d_6^+ \quad (20)$$

معادله‌های ۲۱ الی ۲۷: محدودیت‌های مدل برنامه‌ریزی آرمانی

$$\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{13} Ggpf_{ik} \cdot Apef_{ik} + \sum_{j=1}^4 Ggpt_j \cdot Apef_{jj} - \sum_{i=12}^{13} Aii_{fi} \cdot Ggpf_{i_i} + d_1^- - d_1^+ = -1.39139 * 10^8 \quad (21)$$

$$\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{13} Wupf_{ik} \cdot Apef_{ik} + \sum_{j=1}^4 Wupf_j \cdot Apef_{jj} - \sum_{i=12}^{13} Aii_{fi} \cdot Wypf_{i_i} + d_2^- - d_2^+ = 2.5 * 10^{10} \quad (22)$$

$$\text{If}fe = \sum_{i=1}^{13} \sum_{k=1}^4 Aeif_{ik} \cdot \text{If}fp_{i_k} + \sum_{j=1}^4 Aeia_j \cdot \text{If}fp_j \quad (23)$$

$$\text{Co}if = \sum_{i=1}^{13} Aii_{fi} \cdot \text{Tp}af_{i_i} + \sum_{j=1}^4 Aii_{aj} \cdot \text{Tp}af_j \quad (24)$$

$$\text{If}fe - \text{Co}if + d_3^- - d_3^+ = 2.34328 * 10^{11} \quad (25)$$

$$\left(\frac{\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{13} Apef_{ik}}{\sum_{i=1}^{13} Aofn_i} \right) + d_4^- - d_4^+ = 0.679 \quad (26)$$

$$\left(\frac{\sum_{j=1}^4 Apef_{jj}}{\sum_{j=1}^4 Aofn_j} \right) + d_5^- - d_5^+ = 8.484 \quad (26)$$

$$\left(\frac{\sum_{j=1}^4 Mff_{jj} \cdot Aofn_j}{\text{S}mnp} \right) + d_6^- - d_6^+ = 8.337 \quad (27)$$

۴- مطالعه کاربردی و یافته‌ها

برای سنجش سناریوها و بررسی شاخص‌های طراحی شده، مدل طراحی شده برای زنجیره تأمین مواد غذایی در ایران به کار رفت و نتایج حاصل در چند جدول به شرح ذیل آورده شده است. جدول ۳، نشان‌دهنده مقادیر هر شاخص (تابع هدف) در هر سناریو است. براساس اعداد این جدول، سناریوهای تعریف‌شده با روش تاپسیس اولویت‌بندی شده‌اند.

جدول ۳- مقادیر توابع هدف

Table 3- Objective function values

شاخص	حال حاضر	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴
میزان گازهای گلخانه‌ای تولیدشده (تن)	$195/15320 \times 10^6$	$311/3551 \times 10^6$	$71/1821 \times 10^6$	$256/5909 \times 10^6$	$168/4877 \times 10^6$
میزان آب مصرفی (متر مکعب)	$60/6899 \times 10^9$	$137/312 \times 10^9$	25×10^9	$89/132 \times 10^9$	$59/3364 \times 10^9$
مقدار تراز تجاری \$	$-13/0478 \times 10^9$	$-14/037 \times 10^9$	$-30/105 \times 10^9$	$-19/907 \times 10^9$	15×10^9
خودکفایی مواد غذایی گیاهی	٪۵۳/۰۵	٪۷۶/۷	٪۵۰/۵	٪۶۵/۸	٪۵۷/۸
خودکفایی در تولید مواد غذایی حیوانی	٪۱۱۶/۲	٪۸۴/۹	٪۰	٪۷۸/۴	٪۸۵/۴
خودکفایی در میزان تولید پروتئین حیوانی	٪۸۵/۹۶	٪۶۹/۵	٪۰	٪۵۱/۳	٪۶۲/۹

۲-۷-۳ میزان خودکفایی در تولید هر محصول

جدول ۴ نشان‌دهنده میزان خودکفایی در تولید هریک از محصولات با منشأ حیوانی در هر سناریو است.

جدول ۴- میزان خودکفایی در تولید محصولات با منشأ حیوانی

Table 4- Self sufficiency values in the production of products of animal origin

شاخص	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴
گوشت قرمز	٪۱۰۰	٪۰	٪۵۰	٪۰
شیر	٪۷۴	٪۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰
گوشت سفید	٪۷۶	٪۰	٪۵۰	٪۱۰۰
تخم مرغ	٪۱۰۰	٪۰	٪۵۰	٪۰

جدول ۵، نشان‌دهنده میزان خودکفایی هر ماده غذایی با منشأ گیاهی در هر سناریو است.

جدول ۵- میزان خودکفایی در مواد غذایی با منشأ گیاهی

Table 5- Self sufficiency values in the production of products of animal origin

ماده غذایی با منشأ گیاهی	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴
گندم	٪۶۸	٪۶۲/۶۹	٪۲۸/۶۴	٪۸۴/۲۷
جو	٪۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۰
برنج	٪۶۹/۰۴	٪۰	٪۰	٪۰
زعفران	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۸۱۷۶/۶
پسته	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰
هندوانه	٪۱۰۰	٪۰	٪۰	٪۰
سیب زمینی	٪۱/۵۶	٪۰	٪۰	٪۰
خیار سبز	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰
گوجه فرنگی	٪۱۰۰	۷/٪۱۳۳	۲۰/٪۴	۲۰/٪۴
پیاز	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰
کلزا، سویا و سایر دانه‌های روغنی	٪۷۲	٪۰	٪۰	٪۰
کاه و علوفه	٪۷۴	-	٪۱۰۰	٪۱۰۰
خوراک دام و طیور	٪۷۴	-	٪۱۰۰	٪۱۰۰

۴-۱ اولویت‌بندی سناریوها

در این مرحله با استفاده از روش تاپسیس، سناریوها را براساس معیارهای انتخاب شده اولویت‌بندی می‌کنیم. این روش دارای ۵ گام است. در ادامه، گام‌های مربوط به روش تاپسیس ذکر شده است.

گام ۱: تشکیل ماتریس گزینه و شاخص‌ها

جدول ۶ شامل اعداد گزینه و سناریوهای خروجی مدل است که ورودی روش تاپسیس است.

جدول ۶- ماتریس گزینه و شاخصها
Table 6- Option matrix and indicators

						معیارها گزینه‌ها
C6 (+)	C5 (+)	C4 (+)	C3 (+)	C2 (-)	C1 (-)	
۶۹/۰۵	۸۴/۰۹	۷۶/۰۷	-۱۴/۰۳۷×۱۰ ^{-۹}	۱۳۷/۳۱۲×۱۰ ^{-۹}	۳۱۱/۵۵۵۱×۱۰ ^{-۶}	سناریو ۱
۰	۰	۵۰/۰۵	-۳۰/۱۰۵×۱۰ ^{-۹}	۲۵×۱۰ ^{-۹}	۷۱/۱۸۲۱×۱۰ ^{-۶}	سناریو ۲
۵۱/۰۳	۷۸/۰۴	۶۵/۰۸	۱۹/۹۰۷×۱۰ ^{-۹}	۸۹/۱۳۲×۱۰ ^{-۹}	۲۵۶/۵۹۰۹×۱۰ ^{-۶}	سناریو ۳
۶۲/۰۹	۸۵/۰۴	۵۷/۰۸	۱۵×۱۰ ^{-۹}	۵۹/۳۳۶۴×۱۰ ^{-۹}	۱۶۸/۴۸۷۷×۱۰ ^{-۶}	سناریو ۴

گام ۲: تشکیل ماتریس نرمال‌سازی شده با روش نرم اقلیدسی

در جدول ۷ با استفاده از فرمول ۱، ماتریس تصمیم را با استفاده از روش نرم اقلیدسی نرمال می‌کنیم.

فرمول ۱: فرمول نرمال‌سازی با روش نرم اقلیدسی

$$1) n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}}$$

جدول ۷- ماتریس نرمال
Table 7- Normal matrix

						معیارها گزینه‌ها
C6 (+)	C5 (+)	C4 (+)	C3 (+)	C2 (-)	C1 (-)	
۰/۶۵	۰/۵۹۱	۰/۶۰۴	-۰/۳۳۸	۰/۷۸۱	۰/۷۰۳	سناریو ۱
۰	۰	۰/۳۹۸	-۰/۷۲۵	۰/۱۴۲	۰/۱۶۱	سناریو ۲
۰/۴۸	۰/۵۴۶	۰/۵۱۹	-۰/۴۷۹	۰/۵۰۷	۰/۵۷۹	سناریو ۳
۰/۵۸۹	۰/۵۹۴	۰/۴۵۵	۰/۳۶۱	۰/۳۳۷	۰/۳۸	سناریو ۴

گام ۳: تعیین جواب ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی

تعیین جواب ایده‌آل مثبت (R^{k+}) و ایده‌آل منفی (R^{k-}) با استفاده از فرمول ۲ و ۳ انجام می‌شود.

فرمول ۲ و ۳: فرمول تعیین جواب ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی

$$2) R^{k+} = \{R_1^{k+}, R_2^{k+}, R_3^{k+}, \dots\} = \{\max r_{ij}^k, j \in J' \text{ or } \min r_{ij}^k, j \in J\}$$

$$3) R^{k-} = \{R_1^{k-}, R_2^{k-}, R_3^{k-}, \dots\} = \{\min r_{ij}^k, j \in J' \text{ or } \max r_{ij}^k, j \in J\}$$

در جدول ۸ با استفاده از فرمول‌های بالا، جواب ایده‌آل مثبت و منفی به دست آمده است.

جدول ۸- جواب ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی

Table 8- Positive ideal and negative ideal answer

۰/۶۵	۰/۵۹۴	۰/۶۰۴	۰/۳۶۱	۰/۱۴۲	۰/۱۶۱	V+
۰	۰	۰/۳۹۸	-۰/۷۲۵	۰/۷۸۱	۰/۷۰۳	V-

گام ۴: تعیین وزن شاخص‌ها

در جدول ۹ وزن هر شاخص نشان داده شده است که بنا به دلایل توضیح داده شده، وزن تمام معیارها برابر در نظر گرفته شده است.

جدول ۹- وزن هر شاخص

Table 9- The weight of each index

معیار	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (+)	C5 (+)	C6 (+)
وزن	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷	۰/۱۶۶۷

گام ۵: محاسبه فاصله اقلیدسی هر گزینه از جواب ایده‌آل مثبت و منفی

در این گام با استفاده از فرمول‌های ۴ و ۵، فاصله اقلیدسی هر گزینه از جواب‌های ایده‌آل مثبت (S_i^+) و ایده‌آل منفی (S_i^-) به دست می‌آیند.

فرمول ۴ و ۵: فرمول محاسبه فاصله اقلیدسی هر گزینه از جواب ایده‌آل مثبت و منفی

$$4) S_i^{k+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j^k (r_{ij}^k - r_{ij}^{k+})^2}, i = 1, 2, 3, 4, \dots, m$$

$$5) S_i^{k-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j^k (r_{ij}^k - r_{ij}^{k-})^2}, i = 1, 2, 3, 4, \dots, m$$

در جدول ۱۰، فاصله اقلیدسی هر گزینه از جواب ایده‌آل مثبت و منفی با استفاده از فرمول‌های بالا به دست آمده است.

جدول ۱۰- فاصله اقلیدسی هر گزینه از جواب ایده‌آل مثبت و منفی

Table 10- Eucliden distance of each option from the positive and negative ideal answer

گزینه	S_i^+	S_i^-
سناریو ۱	۰/۴۴۵	۰/۴۰۱
سناریو ۲	۰/۵۵۷	۰/۳۴۲
سناریو ۳	۰/۴۱۹	۰/۳۴
سناریو ۴	۰/۱۳۷	۰/۶۰۳

گام ۶: محاسبه شاخص نزدیکی نسبی گزینه‌ها و رتبه بندی

در جدول ۱۱، میزان نزدیکی گزینه‌ها نسبت به جواب ایده‌آل به دست آمده و رتبه‌بندی انجام شده است.

جدول ۱۱- اولویت‌بندی سناریوها

Table 11- Prioritizing scenario

سناریوها	شاخص نزدیکی گزینه‌ها نسبت به جواب ایده‌آل	رتبه سناریو
سناریو ۱	۰/۴۷۴	۲
سناریو ۲	۰/۳۷۲	۴
سناریو ۳	۰/۴۴۸	۳
سناریو ۴	۰/۸۱۵	۱

۱-۱-۴ تحلیل حساسیت

به منظور اعتبارسنجی مدل ریاضی ارائه شده و میزان حساسیت مدل در برابر تغییر وزن هر معیار، یک تحلیل حساسیت انجام شد. برای انجام این کار، وزن معیار میزان آب مصرفی به صورت مرحله‌ای در بازه $(-۲۰\%, +۲۰\%)$ تغییر داده شد تا پایداری رتبه‌بندی سنجیده شود. این معیار به جهت شدت بیشتر تغییرات نزدیکی گزینه‌ها نسبت به جواب ایده‌آل انتخاب شده است. جدول ۱۲، نشان‌دهنده تحلیل حساسیت انجام شده است.

جدول ۱۲- تحلیل حساسیت مدل ریاضی

Table 12- Sensitivity analysis of the mathematical model

تغییر وزن معیار	وزن اولیه	وزن جدید	رتبه‌بندی اولیه	رتبه‌بندی جدید
-۱۰٪	۰,۱۶۶۶۷	۰,۱۵۰	۲<۳<۱<۴	۲<۳<۱<۴
-۲۰٪	۰,۱۶۶۶۷	۰,۱۳۳	۲<۳<۱<۴	۲<۳<۱<۴
+۱۰٪	۰,۱۶۶۶۷	۰,۱۸۳	۲<۳<۱<۴	۲<۳<۱<۴
+۲۰٪	۰,۱۶۶۶۷	۰,۲۰۰	۲<۳<۱<۴	۲<۳<۱<۴

با انجام این تحلیل حساسیت و تغییر نیافتن نتایج رتبه‌بندی، نتیجه گرفته می‌شود که مدل دارای پایداری و نتایج مطمئن است.

۲-۴ تعیین میزان اثرگذاری و اثرپذیری معیارها

در این گام به منظور دریافتن تأثیر شاخص‌ها بر یکدیگر و میزان این تأثیر، از روش دیمتل فازی استفاده شده است. در این روش یک پرسش‌نامه تهیه شده است که به پیوست در انتهای این تحقیق آمده است. با استفاده از این پرسش‌نامه، نظر خبرگان جمع‌آوری شده است. خبرگان براساس خروجی‌های مدل نسبت به پرکردن این پرسش‌نامه اقدام کرده‌اند. این روش ۵ گام دارد که به شرح ذیل است:

گام ۱: تشکیل ماتریس رابطه مستقیم فازی

به منظور شناسایی مدل روابط بین n معیار، ابتدا یک ماتریس $n \times n$ تشکیل می‌شود. برای این منظور، از متغیر زبانی در پنج مقیاس فازی استفاده می‌شود که مطابق جدول ۱۳ است.

جدول ۱۳- روابط متناظر بین اعداد فازی و اصطلاحات زبانی پرسش‌نامه

Table 12- Corresponding relations between fuzzy numbers and linguistic terms of the questionnaire

اصطلاحات زبانی	اختصارات	اعداد فازی مثلثی
بدون تأثیر	NI	$(0, 0, 25)$
تأثیر بسیار کم	VL	$(0, 0, 25, 0, 5)$
تأثیر کم	L	$(0, 25, 0, 5, 0, 75)$
تأثیر زیاد	HL	$(0, 5, 0, 75, 1)$
تأثیر بسیار بالا	VH	$(0, 75, 1, 1)$

جدول ۱۴، شامل ماتریس رابطه مستقیم نظر همه خبرگان است.

جدول ۱۴- ماتریس رابطه مستقیم

Table 13- Direct relationship matrix

	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (+)	C5 (+)	C6 (+)
C1 (-)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)	(۰/۰,۰/۲۵,۰/۵)	(۰/۲۵,۰/۲۵,۰/۷۵)	(۰/۳۷۵,۰/۶۲۵,۰/۸۷۵)	(۰/۳۷۵,۰/۶۲۵,۰/۸۷۵)	(۰/۳۷۵,۰/۶۲۵,۰/۸۷۵)
C2 (-)	(۰/۳۷۵,۰/۶۲۵,۰/۸۷۵)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)	(۰/۳۷۵,۰/۶۲۵,۰/۸۷۵)	(۰/۵,۰/۷۵,۰/۸۷۵)	(۰/۵,۰/۷۵,۱)	(۰/۵,۰/۷۵,۱)
C3 (+)	(۰/۲۵,۰/۳۷۵,۰/۶۲۵)	(۰/۳۷۵,۰/۶۲۵,۰/۸۷۵)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)	(۰/۵,۰/۷۵,۱)	(۰/۵,۰/۷۵,۱)	(۰/۵,۰/۷۵,۱)
C4 (+)	(۰/۶۲۵,۰/۸۷۵,۱)	(۰/۵,۰/۷۵,۱)	(۰/۳۷۵,۰/۶۲۵,۰/۸۷۵)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)	(۰/۳۷۵,۰/۶۲۵,۰/۸۷۵)	(۰/۳۷۵,۰/۶۲۵,۰/۸۷۵)
C5 (+)	(۰/۶۲۵,۰/۸۷۵,۱)	(۰/۵,۰/۷۵,۱)	(۰/۵,۰/۷۵,۱)	(۰/۰,۰/۱۲۵,۰/۳۷۵)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)	(۰/۷۵,۱,۱)
C6 (+)	(۰/۵,۰/۷۵,۱)	(۰/۲۵,۰/۵,۰/۷۵)	(۰/۳۷۵,۰/۶۲۵,۰/۸۷۵)	(۰/۵,۰/۷۵,۰/۸۷۵)	(۰/۵,۰/۷۵,۰/۸۷۵)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)

گام ۲: نرمال سازی ماتریس رابطه مستقیم

در جدول ۱۵، ماتریس رابطه مستقیم را نرمال سازی می کنیم. ماتریس نرمال رابطه مستقیم از طریق تقسیم تمام درایه های ماتریس مستقیم، جمع بزرگ ترین حد بالای هر سطر و هر ستون به دست آمده است. این مقدار برای این ماتریس رابطه مستقیم ۴/۷۵ است.

جدول ۱۵- ماتریس نرمال رابطه مستقیم

Table 14- Normal direct correlation matrix

	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (+)	C5 (+)	C6 (+)
C1 (-)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)	(۰/۰,۰/۰۵۳,۰/۱۰۵)	(۰/۰۵۳,۰/۰۵۳,۰/۱۶)	(۰/۰۷۹,۰/۱۳,۰/۱۸)	(۰/۰۷۹,۰/۱۳,۰/۱۸)	(۰/۰۷۹,۰/۱۳,۰/۱۸)
C2 (-)	(۰/۰۷۹,۰/۱۳,۰/۱۸)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)	(۰/۰۷۹,۰/۱۳,۰/۱۸)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۱۸)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۲۱)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۲۱)
C3 (+)	(۰/۰۵,۰/۰۷۹,۰/۱۳)	(۰/۰۷۹,۰/۱۳,۰/۱۸)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۲۱)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۲۱)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۲۱)
C4 (+)	(۰/۱۳,۰/۱۸,۰/۲۱)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۲۱)	(۰/۰۷۹,۰/۱۳,۰/۱۸)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)	(۰/۰۷۹,۰/۱۳,۰/۱۸)	(۰/۰۷۹,۰/۱۳,۰/۱۸)
C5 (+)	(۰/۱۳,۰/۱۸,۰/۲۱)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۲۱)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۲۱)	(۰/۰,۰/۰۲۶,۰/۰۷۹)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)	(۰/۱۶,۰/۲۱,۰/۲۱)
C6 (+)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۲۱)	(۰/۰۵,۰/۱,۰/۱۶)	(۰/۰۷۹,۰/۱۳,۰/۱۸)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۱۸)	(۰/۱,۰/۱۶,۰/۱۸)	(۰/۰,۰/۰,۰/۰)

گام ۳: محاسبه ماتریس کل رابطه فازی

در جدول ۱۶، ماتریس نرمال شده از ماتریس همانی کم و سپس حاصل آن معکوس می شود. در نهایت ماتریس حاصل در ماتریس نرمال ضرب شده و ماتریس ذیل به دست آمده است.

جدول ۱۶- ماتریس کل رابطه فازی

Table 15- Total fuzzy relation matrix

	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (+)	C5 (+)	C6 (+)
C1 (-)	(۰/۰۳۱,۰/۱۵۶,۱/۳۵۷)	(۰/۰۲۱,۰/۱۸۳,۱/۳۴۵)	(۰/۰۷۹,۰/۱۸۶,۱/۵۱۹)	(۰/۱۱۲,۰/۲۹۲,۱/۳۶۹)	(۰/۱۲۱,۰/۳۲۲,۱/۶۲۶)	(۰/۱۲۱,۰/۳۳۴,۱/۶۶۵)
C2 (-)	(۰/۱۳۴,۰/۳۸۱,۱/۸۱۵)	(۰/۰۳۵,۰/۲۰۱,۱/۴۷۶)	(۰/۱۲۴,۰/۳۳۹,۱/۸۰۸)	(۰/۱۵۵,۰/۴۱۱,۱/۶۱۹)	(۰/۱۶۸,۰/۴۶۲,۱/۹۶۶)	(۰/۱۶۱,۰/۴۴۴,۱/۹۴۹)
C3 (+)	(۰/۰۹۸,۰/۳۰۱,۱/۶۵۵)	(۰/۱۰۹,۰/۳۰۷,۱/۵۶۶)	(۰/۰۴۲,۰/۱۸۷,۱/۵۲۶)	(۰/۱۲۷,۰/۳۵۲,۱/۵۴)	(۰/۱۵۴,۰/۴۰۹,۱/۸۲۲)	(۰/۱۶۱,۰/۴۲۶,۱/۸۵۳)
C4 (+)	(۰/۲۱۱,۰/۴۶۱,۱/۸۸۲)	(۰/۱۴۲,۰/۳۷۸,۱/۷۱۹)	(۰/۱۳۸,۰/۳۷۴,۱/۸۶۲)	(۰/۰۴۲,۰/۲۳۳,۱/۴۱۵)	(۰/۱۴۱,۰/۴۰۹,۱/۸۹۴)	(۰/۱۴۲,۰/۴۱۵,۱/۹۱۶)
C5 (+)	(۰/۱۹۶,۰/۴۴۵,۱/۷۸۳)	(۰/۱۴۴,۰/۳۸۶,۱/۶۶۹)	(۰/۱۵۹,۰/۳۹۱,۱/۷۸۹)	(۰/۰۴۷,۰/۲۴۵,۱/۴۰۷)	(۰/۰۶,۰/۲۶۷,۱/۶۰۹)	(۰/۲۲۴,۰/۴۸۷,۱/۸۴۹)
C6 (+)	(۰/۱۶۵,۰/۴۴۴,۱/۸۴۷)	(۰/۰۹۲,۰/۳۲۱,۱/۶۲۵)	(۰/۱۲۷,۰/۳۵۹,۱/۷۷۴)	(۰/۱۴۹,۰/۴۰۱,۱/۵۵۵)	(۰/۱۶۲,۰/۴۵۱,۱/۸۴۸)	(۰/۰۶,۰/۲۸۸,۱/۶۷۷)

گام ۴: تشکیل ماتریس مقدار آستانه

در جدول ۱۷ برای محاسبه مقدار آستانه مقادیر فازی مثلثی، فازی زدایی و سپس از مقادیر ماتریس دفاژی میانگین گرفته شده است؛ پس از آن، هر درایه ماتریس کل رابطه قطعی بزرگتر یا بزرگتر مساوی مقدار آستانه بود و برابر با خودش و در صورت کوچکتر بودن از عدد آستانه، آن درایه برابر با صفر شده است.

جدول ۱۷- ماتریس کل رابطه قطعی

Table 16- The total deterministic relation matrix

	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (+)	C5 (+)	C6 (+)
C1 (-)	۰/۵۱۵	۰/۵۱۶	۰/۵۹۵	۰/۷۲۹	۰/۶۹	۰/۷۰۷
C2 (-)	۰/۷۷۷	۰/۵۷۱۱	۰/۷۵۸	۰/۷۲۹	۰/۸۶۶	۰/۸۵۱
C3 (+)	۰/۶۸۳	۰/۶۶۱	۰/۵۸۶	۰/۶۷۳	۰/۷۹۵	۰/۸۱۴
C4 (+)	۰/۸۴۸	۰/۷۴۷	۰/۷۹۲	۰/۵۶۶	۰/۸۱۴	۰/۸۲۵
C5 (+)	۰/۸۰۸	۰/۷۳۳	۰/۷۷۸	۰/۵۶۷	۰/۶۴۶	۰/۸۵۴
C6 (+)	۰/۸۱۹	۰/۶۷۹	۰/۷۵۴	۰/۷۰۲	۰/۸۲۱	۰/۶۷۶

عدد آستانه در این ماتریس برابر با ۰/۷۱۷ شده است؛ پس در جدول ۱۸ اعداد کمتر از ۰/۷۱۷ برابر صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱۸- ماتریس مقدار آستانه

Table 17- Threshold value matrix

	C1 (-)	C2 (-)	C3 (+)	C4 (+)	C5 (+)	C6 (+)
C1 (-)	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C2 (-)	۰/۷۷۷	۰	۰/۷۵۸	۰/۷۲۹	۰/۸۶۶	۰/۸۵۱
C3 (+)	۰	۰	۰	۰	۰/۷۹۵	۰/۸۱۴
C4 (+)	۰/۸۴۸	۰/۷۴۷	۰/۷۹۲	۰	۰/۸۱۴	۰/۸۲۵
C5 (+)	۰/۸۰۸	۰/۷۳۳	۰/۷۷۸	۰	۰	۰/۸۵۴
C6 (+)	۰/۸۱۹	۰	۰/۷۵۴	۰	۰/۸۲۱	۰

مقادیر صفر به معنای نبود رابطه بین معیارها و عدد غیر صفر به معنای وجود رابطه بین معیارهاست.

گام ۵: تشکیل نمودار علت و معلول

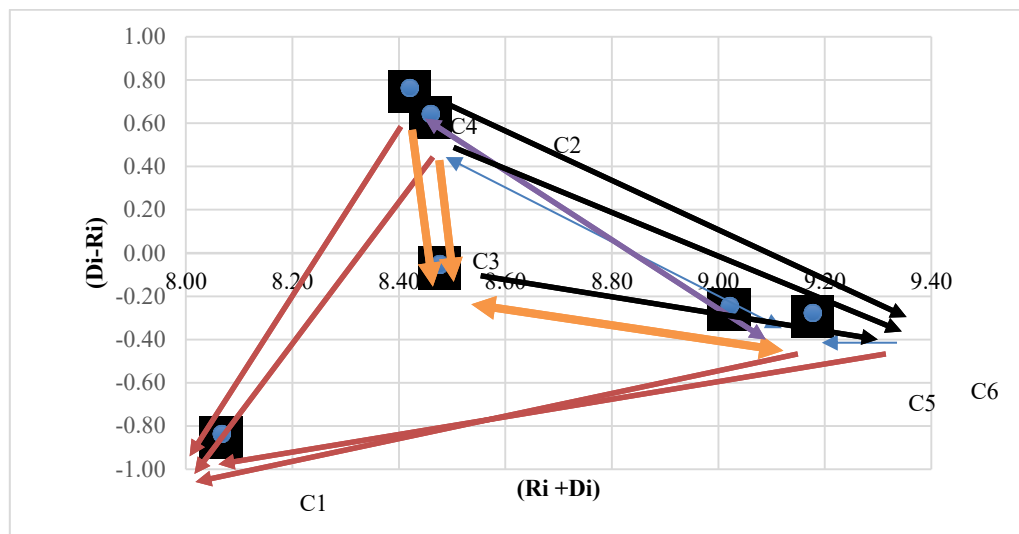
در جدول ۱۹ ابتدا جمع سطر D_i و ستونهای R_i ماتریس کل رابط فازی و سپس مقادیر $D_i + R_i$ و $D_i - R_i$ و مقادیر دفاژی آنها محاسبه شده است. در این تحقیق برای فازی زدایی از روش مرکز ثقل استفاده شده است. در این روش، برای فازی زدایی از سه عدد فازی مثلثی میانگین گرفته می شود.

جدول ۱۹- مقادیر R_i و D_i

Table 18- Values D_i, R_i

	D_i	R_i	D_i defuzzy	R_i defuzzy	$R_i + D_i$	$R_i - D_i$
C1 (-)	(۰/۴۸۸, ۱/۴۷۵, ۸/۸۸۱)	(۰/۸۲۵, ۲/۱۸۵, ۱۰/۳۴۲)	۳/۶۲	۴/۴۵	۸/۰۷	-۰/۸۳
C2 (-)	(۰/۷۷۸, ۲/۲۴۱, ۱۰/۶۴۳)	(۰/۵۴۲, ۱/۷۷۹, ۹/۴۰۱)	۴/۵۵	۳/۹۱	۸/۴۶	۰/۶۴
C3 (+)	(۰/۶۹۳, ۱/۹۷۹, ۹/۹۷۴)	(۰/۶۷۳, ۱/۸۴۱, ۱۰/۲۸۲)	۴/۲۱	۴/۲۶	۸/۴۸	-۰/۵/۰
C4 (+)	(۰/۸۱۳, ۲/۲۷۲, ۱۰/۶۹۱)	(۰/۶۴۱, ۱/۹۳۶, ۸/۹۱۲)	۴/۵۹	۳/۸۳	۸/۴۲	۰/۷۶
C5 (+)	(۰/۸۳۱, ۲/۲۲۴, ۱۰/۱۱۲)	(۰/۸۰۷, ۲/۳۲۱, ۱۰/۷۷۲)	۴/۳۹	۴/۶۳	۹/۲	-۰/۲۴
C6 (+)	(۰/۷۵۸, ۲/۲۶۵, ۱۰/۳۳۱)	(۰/۸۷۲, ۲/۳۹۵, ۱۰/۹۱۲)	۴/۴۵	۴/۷۳	۹/۱۸	-۰/۲۸

شکل ۳، شامل ارتباط و تأثیرگذاری و تأثیرپذیری معیارهای مختلف با یکدیگر است؛ این شکل نتیجه جدول ۱۹ است.



شکل ۳- ارتباط و تأثیرگذاری و تأثیرپذیری معیارهای مختلف با یکدیگر
 Fig 3- The relationship and effectiveness of different criteria with each other

۵- بحث

۵-۱ تفسیر یافته‌ها

مطابق نتایج به دست آمده از جدول ۱۹ و شکل ۳، معیارهای میزان گاز گلخانه‌ای تولیدشده و میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی معیارهای اثرگذار و بقیه معیارها تأثیرپذیرند. همچنین معیارهای میزان خودکفایی در تولید پروتئین حیوانی و میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ حیوانی نیز، بیشترین تعامل را با دیگر معیارها دارند. معیار میزان گازهای گلخانه‌ای تولیدشده نیز، کمترین تعامل را با دیگر معیارها دارد.

سناریو ۱

با توجه به نتایج حاصل شده از مدل، مشاهده می‌شود که با تمرکز بر افزایش تولید و خودکفایی، مصرف آب و تولید گازهای گلخانه‌ای افزایش یافته‌اند که این موضوع به بعد محیط‌زیست آسیب وارد می‌کند. از طرفی با توجه به اختصاص منابع برای کشت سویا، کلزا، علوفه و خوراک دام و طیور منابع به‌جهت تولید و صادرات مواد غذایی صادراتی نظیر پسته و زعفران اختصاص داده نمی‌شود و میزان تراز تجاری حوزه کشاورزی و خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ حیوانی، مقداری با افت مواجه می‌شود.

سناریو ۲

در این سناریو به‌علت محدودیت در مصرف آب و تولید نشدن برخی مواد غذایی، شاخص‌های خودکفایی به‌شدت افت پیدا کرده‌اند. همچنین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای نیز در اثر کاهش تولید مواد غذایی کاهش یافته است. از طرفی به دلیل واردات مواد غذایی، تراز تجاری نیز با کاهش محسوسی مواجه شده است. این سناریو نشان‌دهنده این است که اگر در حال حاضر زیرساخت‌های حوزه کشاورزی به‌جهت کاهش مصرف آب اصلاح

نشود، در آینده دچار مشکلات بسیار زیادی در خودکفایی خواهیم شد و باید منابع زیادی را برای واردات مواد غذایی اختصاص دهیم.

سناریو ۳

در این سناریو با توجه به لزوم تأمین حداقل ۵۰٪ از مواد غذایی از طریق واردات و همچنین تولید نیمی از مواد غذایی استراتژیک در داخل کشور، شاخص‌های میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و میزان مصرف آب به‌جهت تولید نیمی از تمامی مواد غذایی استراتژیک در داخل کشور بدتر شده است. از طرفی میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی بهتر شده است. همچنین به‌جهت واردات نیمی از مواد غذایی، شاخص تراز تجاری کشور دچار افت شده است.

سناریو ۴

در این سناریو با توجه به لزوم رسیدن تراز تجاری حوزه کشاورزی به ۱۵ میلیارد دلار در سال، منابع به تولید مواد غذایی با ارزش افزوده بالا برای صادرات اختصاص داده شده است. این محصولات شامل پسته و زعفران‌اند. به‌دلیل تولید این مواد غذایی در میزان کم، در مقایسه با محصولاتی که تناژ بالایی از آنها مورد نیاز است، خودکفایی مواد غذایی با منشأ گیاهی کاهش یافته است.

نتیجه مشترک این تحقیق با دیگر تحقیقات مشابه، توجه به کاهش مصرف آب برای حفظ پایداری زنجیره تأمین مواد غذایی است که این موضوع نشان‌دهنده لزوم توسعه و به‌روزرکردن زیرساخت‌های کشاورزی برای استفاده بهتر و با استفاده از بهره‌وری بالاتر از منابعی نظیر آب است. درنهایت با ادامه وضعیت فعلی کشاورزی در ایران و مصرف آب بسیار زیاد برای تولید مواد غذایی، پایداری در تولید مواد غذایی وجود نخواهد داشت و با ادامه این روند، منابع آبی در ایران از بین خواهند رفت. این موضوع آسیب‌های بسیار زیادی از جمله کاهش خودکفایی، پرداخت هزینه‌های زیاد برای واردات مواد غذایی و آسیب‌های دیگری را در پی دارد. بهترین راه برون‌رفت از این بحران، انجام تغییر و تحولات گسترده در زیرساخت‌های کشاورزی در ایران، نظیر گسترش شیوه‌های کشاورزی کم‌آبخواه، به‌روزرکردن تجهیزات کشاورزی و استفاده از روش‌های نوین کشاورزی برای افزایش برداشت محصولات است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، سناریوهای تعریف‌شده براساس ۶ شاخص پایداری و کشف روابط میان شاخص‌ها اولویت‌بندی شده است. درنهایت سناریوی ۴، سناریوی برتر انتخاب شد. در این سناریو علاوه بر توجه به جنبه اقتصادی و بهبود شاخص تراز تجاری، شاخص‌های بعد زیست‌محیطی نیز بهبود یافته‌اند و با مصرف آب کمتر و تولید کمتر گازهای گلخانه‌ای، به افزایش خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی رسیده‌ایم. این نتیجه نشان‌دهنده آن است که با اختصاص بهینه منابع، به کشت و تولید مواد غذایی مصرف آب و تولید گازهای گلخانه‌ای کاهش و هم‌زمان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی افزایش می‌یابد. در این تحقیق معیارهای میزان گازهای گلخانه‌ای تولیدشده و میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی معیار اثرگذار و علی و مابقی معیارها اثرپذیرند. معیار میزان خودکفایی در تولید مواد غذایی با منشأ گیاهی، میزان اثرگذاری بیشتری بر دیگر عوامل دارد. این

تحقیق، خروجی متفاوتی با دیگر تحقیق‌ها دارد؛ برای مثال، عامل کاهش و بهینه‌سازی مصرف آب دارای بیشترین تأثیر بر دیگر عوامل است. از نتایج این تحقیق، در حل مشکلات موجود در زنجیره تأمین مواد غذایی شامل تولیدنشدن برخی مواد غذایی در داخل، افزایش قیمت ناگهانی برخی مواد غذایی و دیگر مشکلات موجود استفاده شد. همچنین محدودیت‌های انجام این تحقیق، وجود تنوع بسیار زیاد محصولات و ناتوانی این مدل برای تعیین میزان تولید محصولات ثانویه، نظیر پنیر و ماست اشاره می‌شود. برای تحقیقات آینده، شاخصی به جهت میزان تولید دیگر درشت‌مغذی‌ها نظیر چربی و کربوهیدرات‌ها و همچنین شاخص‌هایی نظیر میزان اشتغال‌زایی نیز به شاخص‌ها اضافه می‌شود.

References

- Amiri, A., Zare Mehrjerdi, Y., Jalalimanesh, A., & Sadegheih, A. (2020). A System Dynamics Analysis of Factors Affecting the Sustainability of Wheat Production System. *Research in Production and Operations Management*, 11(2), 1-26. <https://doi.org/10.22108/jpom.2020.119784.1225>
- Asadi, S., Noorivandi, A. N., Ommani, A. R., & Sabouri, M. S. (2025). Challenges of sustainable food security in Iran. *Discover Sustainability*, 6(1), 694. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01656-1>
- Drofenik, J., Pahor, B., Kravanja, Z., & Pintarič, Z. N. (2023). Multi-objective scenario optimization of the food supply chain – Slovenian case study. *Computers & Chemical Engineering*, 172, 108197. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108197>
- Ehtesham Rasi, R., & Sohanian, M. (2021). A multi-objective optimization model for sustainable supply chain network with using genetic algorithm. *Journal of Modelling in Management*, 16(2), 714-727. <https://doi.org/10.1108/JM2-06-2020-0150>
- Gholizadeh, H., Jahani, H., Abareshi, A., & Goh, M. (2021). Sustainable closed-loop supply chain for dairy industry with robust and heuristic optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 157, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107324>
- Jindal, A., Sharma, S. K., Sangwan, K. S., & Gupta, G. (2021). Modelling Supply Chain Agility Antecedents Using Fuzzy DEMATEL. *Procedia CIRP*, 98, 436-441. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108197>
- Kumar, R., & Kumar, D. (2023). Blockchain-based smart dairy supply chain: catching the momentum for digital transformation. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*, 15. <https://doi.org/10.1108/JADEE-07-2022-0141>
- Kuzu, A. C. (2021). Risk analysis of break-in-two accident of ships using fuzzy DEMATEL method. *Ocean Engineering*, 235, 109410. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109410>
- Maghrebi, M., Noori, R., Bhattarai, R., Yaseen, Z., Tang, Q., Al-Ansari, N., Danandeh Mehr, A., Karbassi, A. R., Omidvar, J., Farnoush, H., Torabi Haghghi, A., Klöve, B., & Madani, K. (2020). Iran's Agriculture in the Anthropocene. *Earth's Future*, 8. <https://doi.org/10.1029/2020EF001547>
- Mohseni, S., Baghizadeh, K., & Pahl, J. (2022). Evaluating Barriers and Drivers to Sustainable Food Supply Chains. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 4486132. <https://doi.org/10.1155/2022/4486132>
- Ogbolumani, O. A., & Nwulu, N. I. (2021). Multi-objective optimisation of constrained food-energy-water-nexus systems for sustainable resource allocation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 100967. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100967>
- Ortiz Barrios, M., Miranda De la Hoz, C., López Meza, P., Petrillo, A., & De Felice, F. (2019). A case of food supply chain management with AHP, DEMATEL, and TOPSIS. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 27. <https://doi.org/10.1002/mcda.1693>
- Rezaei, A., Zare Mehrjardi, Y., Olya, M., & Khademi Zare, H. (2023). Identifying and prioritizing ecosystem management indicators using fuzzy Delphi and fuzzy Dimtel approaches. *Research in Production and Operations Management*, 14(2), 5182.

- <https://doi.org/10.22108/pom.2023.134879.1462>
- Rostami, O., Tavakoli, M., Tajally, A & .GhanavatiNejad, M. (2022). A goal programming-based fuzzy best–worst method for the viable supplier selection problem: a case study. *Soft Computing*, 27, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07572-0>.
- Soltani, A., Alimagham, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Vadez, V., van Loon, M. P., & van Ittersum, M. K. (2020). Future food self-sufficiency in Iran: A model-based analysis. *Global Food Security*, 24, 100351. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100351>
- Shahabadi, M., & Zare Mehrjardi, Y. (2022). Designing a dynamic model to evaluate the rice production system considering resilience and sustainability. In: *Iranduc*
- Taheri, M. ., Sadegh Amalnick, M., Allah Taleizadeh, A., & Mardan, E. (2023). A fuzzy programming model for optimizing the inventory management problem considering financial issues: A case study of the dairy industry. *Expert Systems with Applications*, 221, 119766. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119766>
- Taher, F. M. (2019). Designing wheat flour supply chain network under uncertainty conditions.
- Tirkolae, E., Dashtian, Z., Weber, G.-W., Tomášková, H., Soltani, M., & Mousavi, N. S. (2021). An Integrated Decision-Making Approach for Green Supplier Selection in an Agri-Food Supply Chain: Threshold of Robustness Worthiness. *Mathematics*, 9, 1304. <https://doi.org/10.3390/math9111304>
- Zhang, Z.-X., Wang, L., Wang, Y.-M., & Martínez, L. (2023). A novel alpha-level sets based fuzzy DEMATEL method considering experts' hesitant information. *Expert Systems with Applications*, 213, 118-925. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118925>

¹ Mohseni et al.

² Fuzzy Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory

³ Shahabadi & Zare Mehrjardi

⁴ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

⁵ Rezaei et al.

⁶ Amiri et al.

⁷ Ortiz Barrios et al.

⁸ Analytical Hierarchy process

⁹ Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory

¹⁰ Tirkolae et al.

¹¹ Robust Goal Programming

¹² Asadi et al.

¹³ Kumar & Kumar

¹⁴ Soltani et al.

¹⁵ Taher

¹⁶ Gholizadeh et al.

¹⁷ Drogenik et al.

¹⁸ در این تحقیق منظور از خودکفایی، رسیدن به تولید ۸۰٪ از محصولات مورد نیاز در کشور است.

¹⁹ Goal Programming