



Optimizing Green Supplier Selection and Order Allocation: A Fuzzy DNAP-Fuzzy TOPSIS-Bi Objective Mathematical Model Approach with Harmony Search Algorithm

Sara Amirsalami 

MSc., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khatam University, Tehran, Iran. E-mail: sara.amirsalami@gmail.com

Saeed Alaei * 

*Corresponding Author, Assistant Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khatam University, Tehran, Iran. E-mail: s.alaei@khatam.ac.ir

Abstract

Objective

In the realm of green supply chain management, the pivotal responsibilities of companies involve supplier selection and order allocation. These tasks were treated as independent challenges in prior studies. This issue holds significant importance within the context of green supply chain management, demanding the simultaneous consideration of both quantitative and qualitative criteria. These criteria, at times conflicting, necessitate an in-depth analysis of trade-offs. There is a pressing need for a comprehensive framework capable of concurrently addressing both aspects. In addition to accommodating green criteria, such a framework should enable the determination of order quantities allocated to suppliers.

Methods

The utilized approach in the present study included Fuzzy DNP, Fuzzy TOPSIS, and a Bi-objective optimization model. In the first stage, the criteria weights, encompassing both traditional and green criteria, were determined using the fuzzy DNP. Subsequently, the suppliers' scores were computed using the fuzzy TOPSIS. In the second stage, a non-linear bi-objective model was formulated, aiming to minimize the total cost and maximize the purchased value. The first objective function comprised the purchase price, suppliers' variable costs, ordering and setup costs, as well as buyer's and suppliers' inventory holding costs. Additionally, the second objective function ensured a higher allocation of orders to suppliers who had achieved a superior score in the supplier evaluation process. The model's constraints encompassed the suppliers' capacity, buyer's demand, and constraints associated with the suppliers' discounts. Acknowledging the bi-objective nature of the mathematical model, the Global Criterion method was employed

to transform the bi-objective problem into a single-objective one. According to this method, the relative deviations of the objectives from their corresponding single-objective optimal values were minimized. Furthermore, due to the non-linearity of the mathematical model, a harmony search algorithm was developed for the problem, and a repair algorithm was proposed to handle constraints in the problem.

Results

The previous studies and expert opinions were utilized to identify the criteria, encompassing both traditional and green criteria. The results of fuzzy DANP indicated that the supplier's credit holds the utmost importance, followed by quality, green purchasing, green design, green transportation, green production, on-time delivery, and distance. Furthermore, all criteria exhibit an effect on the supplier's credit. Subsequently, six suppliers underwent evaluation based on the criteria using fuzzy TOPSIS, and their final scores were employed as the suppliers' weights in the second objective function of the mathematical model. To validate the proposed approach, a case study with real data in the field of the medical equipment supply chain was examined, and the optimal solution to the problem was presented. Subsequently, by adjusting the weights of the objective functions in the single-objective problem, the Pareto solutions were identified. The proposed approach facilitates the optimal allocation to the suppliers by considering the green criteria.

Conclusion

The results showed that a decision maker can choose the best solution according to the Pareto solutions in such a way that there is a correct trade-off between the supply chain costs and purchased value.

Keywords: Bi-objective programming, Fuzzy DANP, Fuzzy TOPSIS, Green supplier selection, Meta-heuristic algorithm.

Citation: Amirsalami, Sara & Alaei, Saeed (2023). Optimizing Green Supplier Selection and Order Allocation: A Fuzzy DNAP-Fuzzy TOPSIS-Bi Objective Mathematical Model Approach with Harmony Search Algorithm. *Industrial Management Journal*, 15(4), 650-679. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2023, Vol. 15, No 4, pp. 650-679

Published by University of Tehran, Faculty of Management

<https://doi.org/10.22059/IMJ.2023.364358.1008075>

Article Type: Research Paper

© Authors

Received: August 27, 2023

Received in revised form: October 04, 2023

Accepted: November 23, 2023

Published online: January 20, 2024



رویکرد دنپ فازی – تاپسیس فازی – مدل ریاضی دوهدفه برای مسئله انتخاب تأمین کننده سبز و تخصیص سفارش و حل آن با الگوریتم جست و جوی هارمونی

سارا امیرسلامی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران. رایانامه: sara.amirsalami@gmail.com

سعید علانی *

* نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران. رایانامه: s.alaei@khatam.ac.ir

چکیده

هدف: انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش از وظایف اصلی شرکتها در مدیریت زنجیره تأمین سبز است. در اکثر مطالعات پیشین، این دو وظیفه به عنوان مسائل مستقل در نظر گرفته شده است. این مسئله، به خصوص در مدیریت زنجیره تأمین سبز اهمیت زیادی دارد و نیازمند است که معیارهای کمی و کیفی در آن لحاظ شود؛ اما گاهی این معیارها متناقض است و باید موازنه شود. ارائه چارچوبی که بتواند این دو مسئله را به صورت همزمان در نظر گیرد و علاوه بر لحاظ کردن معیارهای مدیریت زنجیره تأمین سبز، میزان سفارشهای تخصیص یافته به تأمین کنندگان را تعیین کند، ضروری است.

روش: رویکرد پیشنهادی شامل دنپ فازی، تاپسیس فازی و مدل بهینه سازی دوهدفه است. در مرحله اول با استفاده از دنپ فازی، وزن معیارها شامل معیارهای سنتی و سبز به دست آمد؛ سپس با استفاده از تاپسیس فازی، تأمین کنندگان ارزیابی شدند. برای تخصیص سفارشها، یک مدل برنامه ریزی دوهدفه با اهداف کمینه کردن هزینه کل زنجیره تأمین و بیشینه سازی ارزش خرید کل فرموله شد. تابع هدف اول، قیمت خرید، هزینه های متغیر تأمین کنندگان، هزینه های سفارش دهی و راه اندازی، نگهداری خریدار و تأمین کنندگان را شامل می شود. همچنین تابع هدف دوم، تضمین می کند که سفارش بیشتری به تأمین کنندگانی تخصیص یابد که امتیاز بیشتری در فرایند ارزیابی تأمین کنندگان کسب کرده اند. محدودیت های مدل نیز عبارتند از: ظرفیت تأمین کنندگان، تقاضای خریدار و محدودیت های مرتبط با تخفیف تأمین کنندگان. با توجه به دوهدفه بودن مدل ریاضی، از روش معیار جهانی استفاده شد تا مسئله دوهدفه، به مسئله تک هدفه تبدیل شود. مطابق با این روش، انحراف های نسبی اهداف، از مقادیر بهینه تک هدفه هر هدف کمینه سازی شد. همچنین با توجه به غیرخطی بودن مدل ریاضی الگوریتم فراابتکاری، جست و جوی هارمونی برای مسئله طراحی و برای مواجهه با محدودیت های مسئله، یک الگوریتم ترمیم پیشنهاد شد.

یافته ها: برای شناسایی معیارها از نتایج مطالعات پیشین و نظرسنجی از خبرگان استفاده شد که شامل معیارهای سنتی و سبز است. نتایج دنپ فازی نشان داد که اعتبار تأمین کننده مهم ترین معیار است و بعد از آن کیفیت، خرید سبز، طراحی سبز، حمل و نقل سبز، تولید سبز، تحویل به موقع و فاصله در رتبه های بعدی قرار دارند. همچنین، تمامی معیارها روی اعتبار تأمین کننده تأثیر گذارند. سپس شش تأمین کننده با توجه به معیارها با استفاده از تاپسیس فازی ارزیابی شدند و امتیاز نهایی آنها، به عنوان وزن های تأمین کنندگان در تابع هدف دوم مدل ریاضی استفاده شد. برای اعتبار سنجی رویکرد پیشنهادی، یک مطالعه موردی با داده های واقعی در حوزه تأمین تجهیزات پزشکی بررسی

و جواب بهینه مسئله ارائه شد. در ادامه با تغییر وزن توابع هدف در مسئله تک‌هدفه، جواب‌های پارتو مسئله شناسایی شدند. رویکرد پیشنهادی با در نظر گرفتن معیارهای سبز، تخصیص بهینه را به تأمین‌کنندگان انجام می‌دهد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به جواب‌های پارتو مسئله، بهترین جواب را طوری انتخاب کند که موازنه صحیحی بین هزینه‌های زنجیره و ارزش خرید صورت گیرد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم فراابتکاری، انتخاب تأمین‌کننده سبز، برنامه‌ریزی دوهدفه، تاپسیس فازی، دنپ فازی.

استناد: امیرسلامی، سارا و علائی، سعید (۱۴۰۲). رویکرد دنپ فازی - تاپسیس فازی - مدل ریاضی دوهدفه برای مسئله انتخاب تأمین‌کننده سبز و تخصیص سفارش و حل آن با الگوریتم جست‌وجوی هارمونی. مدیریت صنعتی، ۱۵(۴)، ۶۵۰-۶۷۹.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

doi: <https://doi.org/10.22059/IMJ.2023.364358.1008075>

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۲، دوره ۱۵، شماره ۴، صص. ۶۵۰-۶۷۹

ناشر: دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

نوع مقاله: علمی پژوهشی

© نویسندگان



مقدمه

در دنیای رقابتی امروز، انتخاب تأمین کننده یکی از مسئله‌های حیاتی برای بخش خرید در یک شرکت است. انتخاب تأمین کنندگان مناسب می‌تواند هزینه خرید را به‌طور معناداری کاهش دهد، ریسک‌ها را مدیریت کند و رقابت شرکت را بهبود بخشد. با توجه به اینکه این فرایند نقش اساسی در تعیین کیفیت، قیمت و سایر فاکتورهای محصول نهایی ایفا می‌کند، شرکت‌ها معمولاً با بیش از یک تأمین کننده همکاری می‌کنند تا هزینه‌ها، کیفیت و سایر فاکتورهای محصول را مدیریت کنند. به‌طور کلی مسئله انتخاب تأمین کننده، به‌خصوص در مدیریت زنجیره تأمین سبز، نیازمند لحاظ کردن معیارهای کمی و کیفی است؛ اما گاهی این معیارها متناقض است و نیاز به موازنه دارد که توسط مجموعه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره امکان‌پذیر است. بنابراین، انتخاب بهترین تأمین کنندگان یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره پیچیده است، به‌خصوص زمانی که پارامترها غیرقطعی باشند. از سوی دیگر، مدیریت موجودی یکی از دیگر از بخش‌های مهم مدیریت زنجیره تأمین است. تخصیص سفارش‌ها به تأمین کنندگان منتخب، امکان صرفه‌جویی در مقیاس را از طریق انتخاب صحیح مقادیر سفارش از هر تأمین کننده فراهم می‌کند. گاهی اوقات، تأمین کنندگان تخفیف‌های کمی را به‌عنوان یک انگیزه قوی برای ایجاد انگیزه در خریداران برای افزایش مقدار سفارش آن‌ها ارائه می‌دهند. در این صورت مسئله تبدیل به مسئله انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش می‌شود (علانی و خوش الحان^۱، ۲۰۱۵).

در این مقاله یک مسئله انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش مورد بررسی قرار گرفته است که خریدار تأمین کنندگان مناسب را باید انتخاب کرده و سفارش‌ها را به آن‌ها تخصیص دهد. چارچوب پیشنهادی برای حل مسئله، دارای دو مرحله است که شامل دنپ فازی^۲، تاپسیس فازی^۳ و مدل بهینه‌سازی دوهدفه است. در مرحله اول با استفاده از دنپ فازی که ترکیبی از روش‌های فرایند تحلیل شبکه‌ای و تکنیک دیمتل است، وزن معیارها تعیین شده سپس با استفاده از تاپسیس فازی، تأمین کنندگان ارزیابی می‌شوند. در ارزیابی تأمین کنندگان معیارهای سبز در نظر گرفته شده، همچنین عدم قطعیت به‌صورت متغیرهای زبانی در ارزیابی اوزان معیارها و ارزیابی تأمین کنندگان در نظر گرفته شده است. در مرحله بعدی یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه غیرخطی با اهداف کمینه کردن هزینه کل زنجیره تأمین و بیشینه‌سازی ارزش خرید کل فرموله می‌شود. برای مواجهه با مسئله دوهدفه، رویکرد سازشی برای کمینه کردن انحراف‌های نسبی از جواب ایدئال هر هدف مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت جواب‌های پارتو مسئله شناسایی می‌شوند. برای حل مسئله نیز از رویکرد دقیق و الگوریتم جست‌وجوی هارمونی^۴ استفاده می‌شود.

پیشینه نظری پژوهش**روش دنپ فازی**

در روش دنپ فازی ابتدا از روش دیمتل برای تعیین ماتریس ارتباط کامل و دیاگرام علت معلول استفاده شده سپس با به‌کارگیری روش تحلیل شبکه‌ای وزن معیارها تعیین می‌شود. ورودی اصلی این روش، مقایسات زوجی برای تعیین

1. Alaei & Khoshalhan
2. Fuzzy DANP
3. Fuzzy TOPSIS
4. Harmony Search

«تأثیر» بین معیارهاست که می‌تواند به صورت فردی یا گروهی باشد و خروجی آن وزن معیارهاست. مراحل و گام‌های اصلی این روش در ذیل آمده است (دینسر، یوکسل و مارتینز^۱، ۲۰۱۹؛ رضوی حاجی آقا، علائی، عموزاد مهدیرچی و یافتیان^۲، ۲۰۲۲):

گام ۱. طراحی مقیاس زبانی فازی مناسب. برای مقایسه‌های زوجی معیارها برای تعریف درجات مختلف تأثیر بین آن‌ها می‌توان از مقیاس زبانی مطابق جدول ۱ استفاده کرد.

جدول ۱. متغیرهای زبانی و اعداد فازی مثلثی متناظر با آن‌ها

متغیر زبانی	عدد فازی مثلثی متناظر
بدون تأثیر	(۰, ۰, ۰/۲۵)
تأثیر خیلی کم	(۰, ۰/۲۵, ۰/۵)
تأثیر کم	(۰/۲۵, ۰/۵, ۰/۷۵)
تأثیر زیاد	(۰/۵, ۰/۷۵, ۱)
تأثیر خیلی زیاد	(۰/۷۵, ۱, ۱)

منبع: دالاله و باتینه^۳ (۲۰۱۱)

گام ۲. استخراج ماتریس اولیه ارتباط مستقیم فازی. پس از اندازه‌گیری رابطه بین معیارهای F_1, F_2, \dots, F_n بر حسب متغیرهای زبانی، ماتریس اولیه ارتباط مستقیم فازی تشکیل می‌شود که در آن درایه $\tilde{F}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ عدد فازی مثلثی متناظر با رابطه بین F_j و F_i است. در صورتی که از تصمیم‌گیری گروهی استفاده شود، دیدگاه تجمعی K خبره به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن $\tilde{F}_{ij}^k = (l_{ij}^k, m_{ij}^k, u_{ij}^k)$ ارزیابی خبره k ام است.

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \tilde{F}_{ij}^k = \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K l_{ij}^k, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K m_{ij}^k, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K u_{ij}^k \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن \tilde{d}_{ij} درایه ماتریس اولیه ارتباط مستقیم فازی $\tilde{D} = [\tilde{d}_{ij}]_{n \times n}$ است.

گام ۳. نرمال کردن ماتریس. ماتریس نرمال ارتباط مستقیم به صورت $\tilde{N} = [\tilde{n}_{ij}]_{n \times n}$ تعریف می‌شود که در آن هر درایه به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

گام ۴. محاسبه ماتریس ارتباط کامل فازی به صورت رابطه ۳

$$\tilde{n}_{ij} = \tilde{d}_{ij} / \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n u_{ij} \quad \text{رابطه ۲}$$

1. Dinçer, Yüksel, & Martínez

2. Razavi Hajiagha, Alaei, Amoozad Mahdiraji & Yaftiyan

3. Dalalah, & Bataineh

$$\tilde{T} = [\tilde{t}_{ij}]_{n \times n} = \lim_{p \rightarrow \infty} (\tilde{N} + \tilde{N}^2 + \dots + \tilde{N}^p) \quad \text{رابطه ۳}$$

گام ۵. دیفازی کردن ماتریس ارتباط کامل فازی. برای دیفازی کردن ماتریس فازی \tilde{T} از روش چهار مرحله‌ای اوپریکوچ و تزنگ^۱ (۲۰۰۳) استفاده می‌شود:

الف) نرمال کردن. با فرض اینکه هر درایه ماتریس \tilde{T} به صورت $(l_{ij}^t, m_{ij}^t, u_{ij}^t) = \tilde{t}_{ij}$ باشد، مقدار نرمال شده \tilde{x}_{ij} در ماتریس به صورت رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

ب) محاسبه مقادیر نرمال چپ و راست. با فرض اینکه هر درایه ماتریس \tilde{X} به صورت $(l_{ij}^x, m_{ij}^x, u_{ij}^x) = \tilde{x}_{ij}$ باشد، مقادیر چپ و راست به صورت روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شود.

ج) محاسبه مقادیر نرمال دیفازی شده به صورت رابطه ۷:

د) محاسبه مقادیر نهایی دیفازی شده به صورت رابطه ۸.

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{\tilde{t}_{ij} - \min_i l_{ij}^t}{\max_i u_{ij}^t - \min_i l_{ij}^t} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$l_{ij}^b = \frac{m_{ij}^x}{1 + m_{ij}^x - l_{ij}^x} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$r_{ij}^b = \frac{u_{ij}^x}{1 + u_{ij}^x - m_{ij}^x} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$c_{ij} = \frac{l_{ij}^b (1 - l_{ij}^b) + r_{ij}^b \times r_{ij}^b}{1 - l_{ij}^b + r_{ij}^b} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$z_{ij} = \min_i l_{ij}^t + c_{ij} \times (\max_i u_{ij}^t - \min_i l_{ij}^t) \quad \text{رابطه ۸}$$

گام ۶. تشکیل نمودار علت و معلولی با استفاده از $(R_i + C_j)$ به عنوان محور افقی و $(R_i - C_j)$ به عنوان محور عمودی. با توجه به ماتریس نهایی دیفازی شده $Z = [Z_{ij}]_{n \times n}$ ، ابتدا پارامترهای مجموع مقادیر سطر i (R_i) و مجموع مقادیر ستون j (C_j) به ازای تمامی سطرها و ستون‌ها محاسبه می‌شوند. $R_i + C_j$ درجه اهمیت عوامل و $R_i - C_j$ رابطه علی و معلولی بین عوامل را نشان می‌دهد. مقدار مثبت / منفی برای یک عامل به معنای قرار گرفتن عامل در گروه علت / معلول است.

گام ۷. تشکیل سوپرماتریس وزنی. بر اساس ماتریس ارتباط کامل دیفازی شده $Z = [Z_{ij}]_{n \times n}$ که از گام ۵ حاصل شده است، ماتریس نرمال $N = [n_{ij}]_{n \times n}$ به صورت رابطه ۹ محاسبه می‌شود که در آن مجموع سطر i ام است. سپس، سوپرماتریس وزنی W مطابق رابطه ۱۰ به صورت ترانهاده ماتریس نرمال شده به دست می‌آید.

$$N = \begin{bmatrix} z_{11}/d_1 & \cdots & z_{1j}/d_1 & \cdots & z_{1n}/d_1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{i1}/d_i & \cdots & z_{ij}/d_i & \cdots & z_{in}/d_i \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{n1}/d_n & \cdots & z_{nj}/d_n & \cdots & z_{nn}/d_n \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$W = [w_{ij}]_{n \times n} = (N)' \quad \text{رابطه ۱۰}$$

گام ۸. محاسبه حد سوپرماتریس وزنی. در نهایت با ضرب کردن ماتریس W در خودش به صورت مکرر، درایه‌های سوپرماتریس به مقادیر ثابتی هم‌گرا شده که اوزان معیارها هستند.

روش تاپسیس فازی

روش تاپسیس فازی توسط چن^۱ (۲۰۰۰) توسعه داده شده است و شامل مراحل زیر است.

گام ۱: تشکیل ماتریس تصمیم فازی. پس از تعیین متغیرهای زبانی و اعداد فازی مثلثی متناظر آن‌ها با استفاده از جدول ۲ ماتریس تصمیم $\tilde{X} = [\tilde{x}_{ij}]_{m \times n}$ تشکیل می‌شود که شامل ارزیابی m گزینه نسبت به n معیار است. ارزیابی گزینه i در معیار j به صورت اعداد فازی مثلثی $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ تعریف می‌شود. در صورت استفاده از تصمیم‌گیری گروهی مشابه رابطه ۱ دیدگاه خبرگان تجمیع می‌شود.

جدول ۲. متغیرهای زبانی و اعداد فازی مثلثی متناظر با آن‌ها برای ارزیابی گزینه‌ها

متغیر زبانی	عدد فازی مثلثی متناظر
خیلی ضعیف (VP)	(۰, ۰, ۱)
ضعیف (P)	(۰, ۱, ۳)
نسبتاً ضعیف (MP)	(۱, ۳, ۵)
متوسط (F)	(۳, ۵, ۷)
نسبتاً خوب (MG)	(۵, ۷, ۹)
خوب (G)	(۷, ۹, ۱۰)
خیلی خوب (VG)	(۹, ۱۰, ۱۰)

منبع: چن (۲۰۰۰)

گام ۲: نرمال کردن ماتریس تصمیم فازی. ماتریس نرمال فازی به صورت $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n}$ تعریف می‌شود. با فرض اینکه B و C به ترتیب مجموعه معیارهای از جنس سود و هزینه باشند، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right); \quad c_j^* = \max_i c_{ij} \quad j \in B \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right); \quad a_j^- = \min_i a_{ij} \quad j \in C$$

گام ۳: ماتریس نرمال وزنی. حاصلضرب بردار وزن معیارها در ماتریس نرمال به صورت $\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}$ که در آن $\tilde{v}_{ij} = W_j \cdot \tilde{r}_{ij}$ تعریف می‌شود.

گام ۴: تعیین راه‌حل ایدئال مثبت و منفی. با توجه به اینکه اعداد فازی مثلثی در بازه صفر و یک هستند. ایدئال مثبت و منفی به ترتیب به صورت $\tilde{v}_j^+ = (1, 1, 1)$ و $\tilde{v}_j^- = (0, 0, 0)$ برای هر معیار تعریف می‌شود.

گام ۵: محاسبه فاصله هر گزینه از ایدئال مثبت و منفی مطابق روابط (۱۲) و (۱۳).

$$d_i^+ = \sum_j d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+); \quad \forall i \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$d_i^- = \sum_j d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-); \quad \forall i$$

$$d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) = \sqrt{\frac{1}{3} \left[(a_{ij} - 1)^2 + (b_{ij} - 1)^2 + (c_{ij} - 1)^2 \right]} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) = \sqrt{\frac{1}{3} \left[(a_{ij} - 0)^2 + (b_{ij} - 0)^2 + (c_{ij} - 0)^2 \right]}$$

گام ۶: محاسبه درجه نزدیکی به صورت رابطه زیر و هر گزینه‌ای که بیشترین مقدار را داشته باشد، به عنوان بهترین گزینه انتخاب می‌شود.

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

پیشینه تجربی پژوهش

مسئله انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش از جمله مسائلی است که از ترکیبی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و چندهدفه برای حل مسئله استفاده می‌کند. در ادامه مطالعات پیشین در رابطه با مسئله انتخاب تأمین کننده و مسئله انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش به طور مختصر و با تأکید بر مطالعات سال‌های اخیر مورد بررسی قرار می‌گیرند. روش‌های چندمعیاره متعددی برای مسئله انتخاب تأمین کننده توسعه داده شده‌اند که اغلب به صورت ترکیبی از چند روش هستند که در مرحله تعیین وزن معیارها و مرحله ارزیابی تأمین کنندگان استفاده شده‌اند، از جمله: فرایند تحلیل شبکه‌ای و ویکور با معیارهای سبز (کو، سو و لی، ۲۰۱۵)، دیمتل، فرایند تحلیل شبکه‌ای و تحلیل پوششی داده‌ها

(رضایی سرای، ابراهیم نژاد و خلیلی^۱، ۲۰۱۶)، دیمتل، گسترش تابع کیفیت و کوپراس با معیارهای سبز (یزدانی، ترکایش و چترجی^۲، ۲۰۱۷)، پرومتی (عبدالله، چان و افشاری^۳، ۲۰۱۹)، تحلیل سلسله‌مراتبی، آراس و برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای (فو^۴، ۲۰۱۹)، بهترین - بدترین، دیمتل و ایداس (یزدانی و همکاران، ۲۰۲۰)، تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس در محیط فازی (جین، سینگ و آپادیای^۵، ۲۰۲۰)، مجموع وزنی ساده و فوکام در محیط عدم قطعیت (دورمیچت^۶ و همکاران، ۲۰۲۱)، تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط فازی با معیارهای سبز (اسر^۷، ۲۰۲۲)، پرومتی ۲ (تانگ، ونگ و پو^۸، ۲۰۲۲)، بهترین - بدترین، واسپاس و کوپراس با معیارهای سبز (معصومی^۹ و همکاران، ۲۰۲۲)، بهترین - بدترین، مولتی مورا و آنتروپی شانون در محیط فازی (سنگ^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۲)، تحلیل سلسله‌مراتبی، واسپاس و تحلیل پوششی داده‌ها در محیط فازی (نگوین^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۲)، بهترین - بدترین و تودیم در محیط فازی (رحمان^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۲)، بهترین - بدترین، تاپسیس و فوکام در محیط فازی (افراسیابی، توانا و دیکاپریو^{۱۳}، ۲۰۲۲)، تحلیل پوششی داده‌ها و شبکه عصبی مصنوعی (نظری شیرکوهی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۳) و ایداس در محیط فازی (گونری و دوسی^{۱۵}، ۲۰۲۳). در ارتباط با مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش، اگرچه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مسائل انتخاب تأمین‌کننده می‌توانند به‌عنوان یک رویکرد قابل اعتماد هستند؛ اما شرایط واقعی نیازمند رویکردهایی است که هم‌زمان تأمین‌کنندگان را ارزیابی کرده سپس سفارش‌ها را به هر تأمین‌کننده تخصیص دهند که این تخصیص با توجه به اهداف اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و غیره صورت می‌گیرد. در این زمینه کانان^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۳) از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس برای ارزیابی و امتیازدهی به تأمین‌کنندگان با توجه به معیارهای سبز استفاده کرده، سپس از یک مدل بهینه‌سازی با توجه به محدودیت‌های سفارش و کیفیت سفارش‌ها را تخصیص داده‌اند. همدان و چیاتو^{۱۷} (۲۰۱۷) با در نظر گرفتن شاخص‌های زیست‌محیطی نیز از یک رویکرد ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس فازی برای ارزیابی تأمین‌کنندگان و از یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه برای تخصیص سفارش‌ها استفاده کرده‌اند. بابار و امین^{۱۸} (۲۰۱۸) این مسئله را با هدف بیشینه کردن اهداف زیست‌محیطی از یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه مبتنی بر گسترش تابع کیفیت فازی مطالعه کرده‌اند. محمد، هریس و گویندان^{۱۹} (۲۰۱۹) یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر تحلیل

1. Rezaeisaray, Ebrahimnejad & Khalili-Damghan

2. Yazdani, Torkayesh & Chatterjee

3. Abdullah, Chan & Afshari

4. Fu

5. Jain, Singh & Upadhyay

6. Durmićet

7. Ecer

8. Tong, Wang & Pu

9. Masoomi

10. Shang

11. Nguyen

12. Rahman

13. Afrasiabi, Tavana & Di Caprio

14. Nazari-Shirkouhi

15. Güneri & Deveci

16. Kannan

17. Hamdan & Cheaitou

18. Babbar & Amin

19. Mohammad, Harris & Govindan

سلسله‌مراتبی فازی، تاپسیس فازی و برنامه‌ریزی چندهدفه فازی را بررسی کرده‌اند. آن‌ها از روش محدودیت افسیلون برای شناسایی جواب‌های پارتو و در نهایت از روش تاپسیس برای انتخاب بهترین جواب استفاده کرده‌اند. هاشم‌زاهی^۱ و همکاران (۲۰۲۰) این مسئله را در دو مرحله تحت تقاضای تصادفی مورد بررسی قرار داده است. در مرحله اول، یک فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی برای وزن و انتخاب تأمین‌کنندگان از نظر معیارهای اقتصادی و زیست محیطی اعمال می‌شود. در مرحله دوم، یک برنامه‌ریزی غیرخطی چند هدفه با الگوریتم ژنتیک برای هدف تخصیص سفارش توسعه و حل شده است. خلیلی نصر^۲ و همکاران (۲۰۲۱) برای این مسئله یک رویکرد دو مرحله‌ای توسعه داده‌اند که در مرحله اول از بهترین - بدترین فازی برای ارزیابی تأمین‌کنندگان با توجه به معیارهای اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی استفاده کرده و در مرحله دوم از یک مدل چندهدفه برای تخصیص سفارش‌ها استفاده می‌کند. حسینی، فلاپر و پیرایش^۳ (۲۰۲۲) این مسئله را در محیط عدم قطعیت مورد بررسی قرار داده‌اند و از یک رویکرد ترکیبی برای ارزیابی تأمین‌کنندگان استفاده کرده‌اند. در این رویکرد از روش بهترین-بدترین برای تعیین وزن معیارهای پایداری و استدلال شهودی برای ارزیابی تأمین‌کنندگان در شرایط عدم قطعیت استفاده می‌شود. بر اساس محدودیت‌های مربوط به تقاضا، ظرفیت، موجودی و کمبودهای مجاز در فاز بعدی، یک مدل ریاضی دوهدفه ارائه شده است تا بین پایداری و هزینه تعادل ایجاد کند. تقاضا به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود و عدم قطعیت در دسترس بودن تأمین‌کنندگان در دوره‌های مختلف وجود دارد. ترکیب این دو عدم قطعیت از طریق مجموعه‌ای از سناریوها مورد مطالعه قرار گرفته و یک راه حل یکپارچه جدید مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی و برنامه‌ریزی پویا برای حل مدل دو هدفه تحت عدم قطعیت ارائه شده است. آودنی و اوچی^۴ (۲۰۲۲) نیز یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر بهترین - بدترین، تاپسیس و برنامه‌ریزی خطی توسعه داده‌اند. رویکرد بهترین - بدترین برای وزن‌دهی معیارها و تاپسیس برای رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان استفاده شده است. در نهایت از یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه خطی برای تخصیص سفارش‌ها بهره‌برده‌اند که سفارش‌ها را به صورت عادلانه با توجه به شاخص بخصوصی به تأمین‌کنندگان تخصیص دهد. گای^۵ و همکاران (۲۰۲۳) یک رویکرد دو مرحله‌ای یکپارچه شامل تحلیل‌های کمی و کیفی برای این مسئله پیشنهاد داده‌اند که در مرحله اول، یک روش مولتی‌مورا مبتنی بر اعداد Z زبانی برای رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان سبز تحت معیارهای کیفی چنگانه استفاده می‌شود؛ در مرحله دوم، نتیجه رتبه‌بندی به عنوان ورودی به یک مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح غیرخطی دو هدفه داده می‌شود. شائو، بارنس و وو^۶ (۲۰۲۳) این مسئله را با در نظر گرفتن اختلال عرضه در دوران کوید ۱۹ بررسی کرده است و شامل رویکرد ترکیبی آنروپی، تاپسیس و مدل بهینه‌سازی چندهدفه است که برای حل آن نیز الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب استفاده کرده است.

خلاصه مقالات در جدول ۳ نشان داده شده است. مشخصات تحقیق جاری در ردیف آخر جدول نشان داده شده است. با توجه به جدول، مجموعه تکنیک‌های مورد استفاده در چارچوب پیشنهادی برای مسئله انتخاب تأمین‌کننده و

1. Hashemzahi
2. Khalili Nasr
3. Hoseini, Flapper & Pirayesh
4. Aouadni and Euch
5. Gai
6. Shau, Barnes & Wu

تخصیص سفارش در تحقیق دیگری مورد استفاده قرار نگرفته است. چارچوب پیشنهادی شامل سه مرحله با استفاده از روش‌های دنپ فازی، تاپسیس فازی و بهینه‌سازی چندهدفه است. برای حل مسئله نیز علاوه بر رویکرد دقیق در گمز، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی طراحی می‌شود.

جدول ۳. خلاصه مقالات در زمینه مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش

نویسندگان	معیارها	ارزیابی معیارها	ارزیابی تأمین‌کنندگان	مدل	اهداف تخصیص سفارش	روش حل
بابار و امین (۲۰۱۸)	سنتی و سبز	-	گسترش تابع کیفیت فازی	چندهدفه خطی	هزینه، ارزش خرید، نرخ معیوب بودن، تحویل بموقع، انتشارات کربن	مجموع وزنی، فاصله، محدودیت اپسیلون (گمز)
محمد و همکاران (۲۰۱۹)	سنتی و سبز	تحلیل سلسله‌مراتبی	تاپسیس فازی	چندهدفه خطی فازی	هزینه، ارزش خرید، تأثیر اجتماعی، انتشارات کربن	محدودیت اپسیلون (گمز)
هاشم زاهی و همکاران (۲۰۲۰)	سنتی و سبز	-	تحلیل سلسله‌مراتبی فازی	چندهدفه غیرخطی	هزینه، ارزش خرید، انعطاف پذیری تأمین‌کنندگان	الگوریتم ژنتیک
خلیلی نصر و همکاران (۲۰۲۱)	سنتی و سبز	-	بهترین-بدترین فازی	چندهدفه خطی فازی	هزینه، ارزش خرید، اثرات زیست محیطی، اثرات اجتماعی، فروش از دست رفته	برنامه‌ریزی آرمانی (گمز)
حسینی و همکاران (۲۰۲۲)	سنتی و سبز	بهترین - بدترین	استدلال شهودی	چندهدفه تصادفی	هزینه، ارزش خرید	فاصله تا ایدئال (گمز)
آودنی و اوچی (۲۰۲۲)	سنتی	بهترین - بدترین	تاپسیس	چندهدفه خطی	هزینه، انحراف معیار توزیع سفارش	محدودیت اپسیلون (سیپلکس)
گای و همکاران (۲۰۲۳)	سنتی و سبز	-	مولتی‌مورا	چندهدفه غیرخطی	هزینه، ارزش خرید	نامشخص
شائو و همکاران (۲۰۲۳)	سنتی	آنتروپی	تاپسیس	چندهدفه غیرخطی	فاصله، تاب آوری، ریسک اختلال، پایداری	ژنتیک مرتب سازی نامغلوب
تحقیق جاری	سنتی و سبز	دنپ فازی	تاپسیس فازی	چندهدفه غیرخطی	هزینه، ارزش خرید	رویکرد سازشی (رویکرد دقیق و جست‌وجوی هارمونی)

روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق شامل چندین مرحله است. ابتدا معیارهای انتخاب تأمین‌کنندگان شناسایی شده، وزن معیارها با استفاده از روش دنپ فازی تعیین می‌شود، سپس وزن نهایی تأمین‌کنندگان با روش تاپسیس فازی محاسبه شده و در ادامه مسئله

انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش به صورت یک مسئله دوهدفه مدل سازی می شود. با توجه به غیرخطی بودن مدل، الگوریتم جست و جوی هارمونی برای حل مسئله طراحی شده و از رویکرد سازشی برای تبدیل مدل به حالت تک هدفه استفاده می شود تا انحرافات نسبی از جواب ایدئال هر هدف کمینه شود. در انتها نیز مسئله حل شده و نتایج تحلیل حساسیت ارائه می شود. شکل ۱ گام های اصلی تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۱. گام های اصلی پژوهش

مدل دوهدفه انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش

مفروضات اصلی مسئله شامل موارد ذیل است:

- مسئله به صورت تک محصولی در نظر گرفته شده است.
- خریدار می تواند مقدار مورد نیاز را از تأمین کنندگان متعدد خریداری نماید.
- هر یک از تأمین کنندگان تخفیف مقداری برای مقادیر خرید پیشنهاد داده اند.
- تقاضای سالانه در طول زمان مشخص و ثابت است.
- کمبود موجودی برای خریدار و تأمین کنندگان مجاز نیست.

اندیس ها

I اندیس تأمین کنندگان (از ۱ تا n)

K اندیس بازه های تخفیف تأمین کننده i (از ۱ تا K_i)

پارامترها

u_{ik}	مشخص کننده مقادیر ابتدایی / انتهایی بازه تخفیف k ام تأمین کننده i
c_{ik}	قیمت واحد تخفیفی فاصله تخفیف k ارائه شده توسط تأمین کننده i
D	نرخ تقاضای سالانه خریدار
A_i	هزینه سفارش برای تأمین کننده i
S_i	هزینه راه اندازی تولید برای تأمین کننده i
P_i	نرخ تولید سالانه تأمین کننده i
z_i	هزینه متغیر تولید هر محصول برای تأمین کننده i (شامل هزینه نیروی انسانی، هزینه مواد و سربار)
h_i	هزینه نگهداری موجودی تأمین کننده i در واحد زمان
h_b	هزینه نگهداری موجودی خریدار i واحد زمان
w_i	وزن نهایی تأمین کننده i حاصل از رویکرد ترکیبی دنپ فازی و تاپسیس فازی

متغیرهای تصمیم

q_{ik}	مقدار خریداری شده در هر دوره از تأمین کننده i در فاصله تخفیف k
y_{ik}	متغیر باینری برابر ۱ است اگر مقدار خرید در بازه تخفیف k ام تأمین کننده i قرار بگیرد، در غیر این صورت صفر.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} q_{ik} \quad \text{مقدار مجموع سفارش ها هر دوره از همه تأمین کنندگان}$$

در ادامه مدل ریاضی انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش به صورت یک مدل دوهدفه شامل کمینه سازی هزینه های سالانه زنجیره تأمین و بیشینه سازی ارزش سالانه خرید ارائه می شود. مدل ریاضی مشابهی توسط کمالی، قمی و جولای^۱ (۲۰۱۱) و علائی و خوش الحان^۲ (۲۰۱۵) به صورت چهارهدفه ارائه شده است. مدل ریاضی دوهدفه مسئله به صورت زیر است.

$$\min Z_1 = \frac{D}{Q} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} (z_i + c_{ik}) q_{ik} + \frac{D}{Q} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} (A_i + S_i) y_{ik} + \frac{D}{Q} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2} \left(\frac{h_b}{D} + \frac{h_i}{P_i} \right) \left(\sum_{k=1}^{K_i} q_{ik} \right)^2 \right] \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$\max Z_2 = \frac{D}{Q} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} w_i q_{ik} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$\frac{D}{Q} \sum_{k=1}^{k_i} q_{ik} \leq P_i, \quad \forall i \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{k_i} q_{ik} = Q \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$\sum_{k=1}^{K_i} y_{ik} \leq 1, \quad \forall i \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} y_{ik} \geq 1 \quad \text{رابطه ۲۰}$$

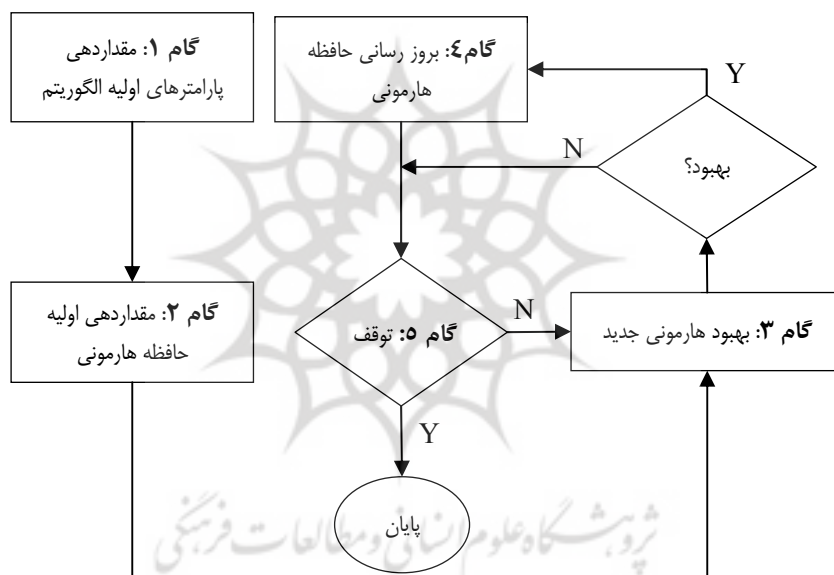
$$u_{i,k-1} y_{ik} \leq q_{ik} \leq u_{ik} y_{ik}, \quad \forall i, k \quad \text{رابطه ۲۱}$$

$$\begin{aligned} Q &\geq 0 \\ q_{ik} &\geq 0, \quad \forall i, k \\ y_{ik} &\in \{0, 1\}, \quad \forall i, k \end{aligned} \quad \text{رابطه ۲۲}$$

رابطه ۱۵ هزینه‌های سالانه کل زنجیره تأمین (تأمین کنندگان و خریدار) را کمینه می‌کند. این تابع هدف شامل سه بخش است که بخش اول مرتبط با هزینه‌های متغیر تأمین کنندگان و قیمت خرید خریدار؛ بخش دوم مرتبط با هزینه‌های سفارش‌دهی خریدار و راه‌اندازی تأمین کنندگان؛ و بخش سوم مرتبط با هزینه‌های نگهداری خریدار و تأمین کنندگان است. رابطه ۱۶ ارزش سالانه خرید را بیشینه می‌کند. با توجه به اینکه w_i امتیاز نهایی تأمین کننده i در فرایند ارزیابی تأمین کنندگان است، بیشینه کردن حاصل ضرب w_i در مقدار سفارش از هر تأمین کننده تضمین می‌کند که سفارش بیشتری به تأمین کنندگانی تخصیص یابد که امتیاز بالاتری کسب کرده‌اند. رابطه ۱۷ محدودیت ظرفیت تأمین کنندگان را نشان می‌دهد. عبارت D/Q معادل تعداد سفارش‌هایی است که سالانه به هر تأمین کننده منتخب صادر می‌شود. حاصل ضرب تعداد سفارش‌ها در مقدار سفارش باید کمتر از ظرفیت سالانه آن تأمین کننده باشد. رابطه ۱۸ نیز محدودیت تقاضای خریدار را نشان می‌دهد که باید مجموع خرید از تأمین کنندگان برابر مقدار سفارش هر دوره باشد. روابط ۱۹ و ۲۰ نیز محدودیت‌های مرتبط با تخفیف را اعمال می‌کنند. رابطه ۱۹ تضمین می‌کند که سفارش به هر تأمین کننده می‌تواند حداکثر در یکی از بازه‌های تخفیف قرار گیرد. همچنین با توجه به رابطه ۲۰ مقدار سفارش کل (Q) غیرصفر خواهد شد و محدودیت تقاضا برآورده می‌شود. رابطه ۲۱ نیز قرارگیری مقدار خرید از هر تأمین کننده را در داخل بازه تخفیف تضمین می‌کند. رابطه ۲۲ نیز نوع متغیرها را تعریف می‌کند.

طراحی روش جست‌وجوی هارمونی برای حل مسئله

روش جست‌وجوی هارمونی در سال ۲۰۰۱ توسط گیم، کیم و لوگانتان^۱ (۲۰۰۱) به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری معرفی شد که بر اساس تقلید رفتار نوازنده است؛ یک نوازنده با بداهه‌سرایی و ترکیب نت‌های خاصی بدنبال یافتن هارمونی و ایحاد یک آهنگ دلنشین است. در این الگوریتم به هر متغیر تصمیم‌گیری ابتدا یک مقدار در بازه مجاز خود اختصاص داده می‌شود سپس در طی تکرارهای الگوریتم با تغییر هر متغیر مطابق با مکانیزم الگوریتم، حرکت به سمت جواب ایدئال انجام می‌شود. الگوریتم شامل یک حافظه هارمونی است که بهترین جواب‌ها در آن نگهداری می‌شوند و در صورتی که در هر تکرار جواب بهتری یافت شود، با بدترین جواب موجود در حافظه جایگزین می‌شود. گام‌های اصلی این روش در شکل ۲ نشان داده شده است. در ادامه الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برای مسئله طراحی می‌شود.



شکل ۲ گام‌های اصلی روش جست‌وجوی هارمونی

نمایش جواب و تولید جواب اولیه

حافظه هارمونی مطابق رابطه (۲۳) یک ماتریس با HMS سطر و n ستون است که در آن n تعداد تأمین‌کنندگان مسئله است و در اینجا مقدار خرید از هر تأمین‌کننده i یا $Q_i = \sum_{k=1}^{K_i} q_{ik}$ در حافظه هارمونی درج می‌شود. برای تولید جواب اولیه و مقداردهی اولیه حافظه هارمونی که در گام ۲ الگوریتم انجام می‌شود، نیز رویه‌ای به‌صورت ذیل طی می‌شود: برای هر تأمین‌کننده با احتمال ۵۰ درصد مقدار سفارش $Q_i = 0$ و با احتمال ۵۰ درصد عددی تصادفی در بازه صفر تا ظرفیت آن (P_i) تعیین می‌شود. به زبان ریاضی، با فرض اینکه LB_i و UB_i به‌ترتیب کران پایین و بالای متغیر Q_i باشند.

ابتدا برای هر تأمین کننده مقداری تصادفی در بازه صفر و ۱ انتخاب می شود و در صورت کوچکتر بودن آن عدد از ۰/۵ مقدار خرید از آن تأمین کننده برابر $Q_i = 0$ قرار داده می شود و در غیر این صورت مقدار خرید از آن تأمین کننده برابر $Q_i = LB_i + (UB_i - LB_i) * R$ تعیین می شود. در این مسئله کران پایین هر تأمین کننده برابر صفر و کران بالای آن برابر ظرفیت آن تأمین کننده یا P_i است. بنابراین $Q_i = P_i * R$ که در آن R عددی تصادفی در بازه صفر و ۱ است.

$$HM = \begin{bmatrix} Q_1^1 & Q_2^1 & \dots & Q_n^1 \\ Q_1^2 & Q_2^2 & \dots & Q_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_1^{HMS} & Q_2^{HMS} & \dots & Q_n^{HMS} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۲۳}$$

تابع برازش الگوریتم و بروز رسانی حافظه

با توجه به دوهدفه بودن مدل ریاضی، از روش معیار جهانی استفاده می شود تا مسئله دوهدفه به مسئله تک هدفه تبدیل شود. مطابق با این روش، فاصله نسبی وزنی اهداف از نقاط مرجع باید کمینه سازی شود. در اینجا نقاط مرجع همان مقدار بهینه مسئله تک هدفه متناظر با هر یک از اهداف هستند. تابع برازش مسئله به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Min } Z = \lambda \times \left(\frac{Z_1 - Z_1^*}{Z_1^*} \right) + (1 - \lambda) \times \left(\frac{Z_2 - Z_2^*}{Z_2^*} \right) \quad \text{رابطه ۲۴}$$

که در آن Z_1^* و Z_2^* به ترتیب مقادیر کمینه تابع هدف اول و بیشینه تابع هدف دوم در مسائل متناظر تک هدفه هستند و λ در بازه صفر تا ۱، وزن تابع هدف اول است که با تغییر مقدار آن می توان جواب های پارتو را برای مسئله شناسایی کرد. شایان ذکر است که برای اجرای الگوریتم ابتدا باید تابع برازش تک هدفه در مسئله در نظر گرفته شود تا مقادیر Z_1^* و Z_2^* به دست آید. در هر یک از تکرارهای الگوریتم در صورتی که جواب جدید، مقدار تابع هدف بهتری نسبت به بدترین جواب ذخیره شده در حافظه هارمونی داشته باشد، به روزرسانی حافظه مطابق گام ۴ انجام شده و جواب جدید جایگزین آن جواب خواهد شد.

تولید هارمونی / جواب جدید

برای ایجاد یک هارمونی یا راه حل جدید در گام ۳ الگوریتم، سه عملگر شامل انتخاب از حافظه، تولید تصادفی و تنظیم گام استفاده می شود. روابط زیر نحوه تعیین جواب جدید را نشان می دهند.

$$Q_i' \leftarrow \begin{cases} Q_i' \in \{Q_i^1, Q_i^2, \dots, Q_i^{HMS}\} & w.p. HMCR \\ Q_i' = P_i \times rand & w.p. (1 - HMCR) \end{cases} \quad \text{رابطه ۲۵}$$

$$\text{Pitch adjusting for } Q_i' \leftarrow \begin{cases} Yes & w.p. PAR \\ No & w.p. (1 - PAR) \end{cases} \quad \text{رابطه ۲۶}$$

$$Q_i' \leftarrow Q_i' \pm rand * bw$$

که در آن نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی (HMCR)، نرخ تنظیم گام (PAR)، پهنای باند فاصله (bw) پارامترهای الگوریتم هستند. مقدار جدید سفارش از هر تأمین کننده i با احتمال HMCR از مقادیر موجود آن متغیر در حافظه به ارث برده می‌شود و با احتمال 1-HMCR به صورت تصادفی تولید می‌شود. سپس با احتمال PAR، تنظیم گام برای آن متغیر اعمال می‌شود به این صورت که مقداری تصادفی در بازه $(-bw, bw)$ به آن متغیر افزوده می‌شود.

مدیریت محدودیت‌های مسئله

الگوریتم طراحی شده در طی تولید جواب اولیه یا تولید جواب‌های جدید ممکن است جواب‌های نشدنی تولید کند که می‌توان با روش‌های ترمیم یا جریمه آن‌ها را مدیریت کرد. با توجه به محدودیت‌های مدل ریاضی ارائه شده تنها محدودیتی که ممکن است باعث نشدنی شدن یک جواب شود، رابطه ۱۷ یا محدودیت ظرفیت تأمین کنندگان است. شایان ذکر است که سایر محدودیت‌های مسئله با توجه به نمایش جواب‌ها برقرار می‌شوند. در اینجا یک الگوریتم ترمیم برای مسئله طراحی می‌شود که روش بهتری نسبت به روش تابع جریمه است. با توجه به بخش نمایش جواب در رابطه با متغیر Q_i رابطه ۱۷ را می‌توان به صورت $DQ_i/Q \leq P_i$ بازنویسی کرد. در یک جواب نشدنی ۳ گروه تأمین کننده می‌تواند وجود داشته باشد، گروه ۱ یا تأمین کننده‌های غیرمنتخب که هیچ سفارشی به آن‌ها تخصیص داده نشده است؛ گروه ۲ که سفارش سالانه تخصیص یافته به آن‌ها از ظرفیت آن‌ها تجاوز کرده است؛ و گروه ۳ که مقدار سفارش به آن‌ها تخصیص یافته ولی هنوز ظرفیت برای تخصیص دارند. در رویه تبدیل جواب نشدنی به جواب شدنی فقط مقدار اضافی که باعث نقض محدودیت ظرفیت گروه ۲ شده است، به گروه ۳ تخصیص داده می‌شود و این تخصیص به نسبت ظرفیت باقی‌مانده آن‌ها صورت می‌گیرد. همچنین مقدار سفارش گروه ۲ طوری تغییر پیدا می‌کند که سفارش سالانه آن‌ها معادل ظرفیت سالانه آن‌ها باشد. گفتنی است که تأمین کنندگان گروه ۱ که قبلاً انتخاب نشده بودند، همچنان مقدار سفارش آن‌ها برابر صفر خواهد بود. برای این منظور ابتدا مقدار باقی‌مانده ظرفیت صرفاً برای تأمین کنندگان فعال به صورت $S_i = P_i - DQ_i/Q$ محاسبه می‌شود. در این صورت مقدار S_i برای تأمین کنندگان گروه ۲ و ۳ به ترتیب منفی و مثبت خواهد شد. در صورتی تغییرات منجر به جواب شدنی خواهد شد که داشته باشیم مجموع S_i ‌ها برای گروه ۳ بزرگ‌تر مساوی مجموع قدر مطلق S_i ‌ها برای گروه ۲ باشد. برای روشن شدن این رویه مثالی با ۴ تأمین کننده در نظر بگیرید که ظرفیت و تقاضای سالانه هر یک برابر ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ است. یک جواب نشدنی به صورت $(0, 100, 300, 300)$ که $(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) = (600, 2000, 2000, 2000)$ تولید شده است. با محاسبه مقدار ظرفیت باقی‌مانده داریم $S_i = (0, 400, 800, -200)$ که نشان می‌دهد ظرفیت تأمین کننده ۱ نقض شده است و تأمین کنندگان ۲ و ۳ ظرفیت اضافی دارند. حال کافی است مقدار سفارش تأمین کننده ۱ به صورت $Q_1 = Q P_1/D = 1000 \times 1000/2000 = 500$ قرار داده شود. همچنین مقدار ۲۰۰ واحد اضافی به نسبت ظرفیت باقی‌مانده تأمین کنندگان ۲ و ۳ به آن‌ها تخصیص یابد؛ یعنی ۶۶ واحد به تأمین کننده ۲ و ۱۳۴ واحد به تأمین کننده ۳. در نهایت مقادیر سفارش تأمین کننده برابر $Q_2 = 300 + 66 = 366$ و $Q_3 = 100 + 134 = 234$ خواهد شد و بردار جواب شدنی به صورت $(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) = (500, 366, 234, 0)$ حاصل می‌شود. در آخر با توجه به تغییر مقادیر سفارش و مجموع سفارش (Q) ممکن است در برخی حالات همچنان جواب نشدنی باشد، به همین دلیل الگوریتم ترمیم به صورت مکرر تا شدنی شدن جواب انجام می‌شود.

شروع و پایان الگوریتم

برای شروع کار الگوریتم در گام ۱ لازم است پارامترهای الگوریتم مقداردهی شوند: اندازه حافظه هارمونی، نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی، نرخ تنظیم گام، پهنای باند فاصله و تعداد بداهه‌ها یا تعداد نسل‌ها. شرط توقف الگوریتم در گام ۵، معمولاً به صورت تعداد هارمونی‌های ایجاد شده تعریف می‌شود. تغییر نکردن بهترین هارمونی موجود در ماتریس حافظه هارمونی نیز می‌تواند شرط توقف دیگری باشد. با تکرار پنج گام اصلی، الگوریتم به مرور به مقادیر بهینه نزدیک‌تر شده و جواب‌های مسئله بهبود می‌یابند.

یافته‌های پژوهش

در این بخش نتایج رویکرد پیشنهادی برای داده‌های یک شرکت در حوزه تأمین تجهیزات پزشکی ارائه می‌شود که محصولات متنوعی را تولید می‌کند. یکی از اجزای اصلی و حیاتی محصولات این شرکت توسط ۶ تأمین‌کننده تولید می‌شود که مدیریت قصد دارد برای انتخاب آن‌ها و تخصیص سفارش به آن‌ها از یک چارچوب مشخصی استفاده کند، به این صورت که تأمین‌کننده‌ها با توجه به معیارهای مشخصی ارزیابی شده و تخصیص سفارش طوری انجام گیرد که هم‌زمان هزینه‌های سالانه شرکت و ارزش سالانه خرید بهینه‌سازی شوند. رویکرد ترکیبی پیشنهادی شامل ارزیابی تأمین‌کنندگان با دنی فازی و تاپسیس فازی برای داده‌های این شرکت اجرا می‌شود، سپس برای تعیین میزان سفارش به هر تأمین‌کننده از مدل ریاضی پیشنهادی استفاده شده و با الگوریتم جست‌وجوی هارمونی طراحی شده حل می‌شود.

شناسایی معیارهای انتخاب تأمین‌کنندگان

برای تهیه فهرست معیارها از نتایج مطالعات پیشین استفاده شده سپس فهرست نهایی معیارها با استفاده از نظرسنجی از خبرگان با توجه به استراتژی و سیاست‌های سازمان انتخاب شده است. در این مسئله علاوه بر معیارهای مرسوم، معیارهای انتخاب تأمین‌کننده سبز شامل طراحی سبز، خرید سبز، تولید سبز و حمل‌ونقل سبز نیز در نظر گرفته شده است: طراحی سبز، مرتبط با طراحی محصول با هدف کاهش اثرات نامطلوب زیست محیطی در طول عمر محصول است (توزکایا^۱، ۲۰۱۳؛ گویندان، خداوردی و وفادار نیکجو^۲، ۲۰۱۵؛ شرما، چندنا و بهارواج^۳، ۲۰۱۷)؛ خرید سبز، مرتبط با تناسب مواد با محیط زیست شامل قابلیت بازیافت و کاهش مواد خطرناک است (شرما، چندنا و بهارواج، ۲۰۱۷؛ گوش^۴، ۲۰۱۷)؛ و انال^۵ و همکاران، ۲۰۱۷)؛ تولید سبز، مرتبط با کاهش مواد اولیه خطرناک، تسهیل بازیافت، کاهش زباله و کاهش مصرف انرژی است (چین، تات و سلیمان^۶، ۲۰۱۵؛ شرما، چندنا و بهارواج، ۲۰۱۷؛ گوش، ۲۰۱۷) و حمل‌ونقل سبز با نحوه حمل‌ونقل محصول، به خصوص با روش‌هایی که آلاینده‌گی کمتری ایجاد کنند، مرتبط می‌شود (چین، تات و سلیمان، ۲۰۱۵؛ شرما، چندنا و بهارواج، ۲۰۱۷؛ گوش، ۲۰۱۷). معیارهای نهایی شامل تحویل به موقع (C₁)، کیفیت (C₂)، فاصله (C₃)، اعتبار تأمین‌کننده (C₄)، طراحی سبز (C₅)، خرید سبز (C₆)، تولید سبز (C₇) و حمل‌ونقل سبز (C₈) است.

1. Tuzkaya
2. Govindan, Khodaverdi & Vafadarnikjoo
3. Sharma, Chandna & Bhardwaj
4. Ghosh
5. Vanalle
6. Chin, Tat & Sulaiman

دنب فازی برای تعیین وزن معیارها

ابتدا نتیجه ارزیابی گروهی شامل سه خبره برای معیارها استخراج شد، سپس با استفاده از متغیر زبانی و اعداد فازی مثلثی مربوط به آن‌ها در جدول ۱، ماتریس اولیه ارتباط مستقیم فازی مطابق جدول ۴ به دست آمد. در مراحل بعدی، ماتریس ارتباط مستقیم نرمال و ماتریس ارتباط کامل فازی به ترتیب در جداول ۵ و ۶ محاسبه شده‌اند.

جدول ۴. ماتریس اولیه ارتباط مستقیم فازی (× ۱۰۰)

C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
(۵۰,۷۵,۹۲)	(۰,۸,۳۳)	(۰,۸,۳۳)	(۰,۰,۲۵)	(۶۷,۹۲,۱۰۰)	(۰,۰,۲۵)	(۰,۰,۲۵)	(۰,۰,۰)	C1
(۱۷,۴۲,۶۷)	(۸,۳۳,۵۸)	(۳۳,۵۸,۸۳)	(۳۳,۵۸,۸۳)	(۷۵,۱۰۰,۱۰۰)	(۰,۰,۲۵)	(۰,۰,۰)	(۰,۸,۳۳)	C2
(۵۸,۸۳,۱۰۰)	(۰,۰,۲۵)	(۰,۸,۳۳)	(۰,۸,۳۳)	(۰,۸,۳۳)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۲۵)	(۵۸,۸۳,۱۰۰)	C3
(۰,۰,۲۵)	(۰,۸,۳۳)	(۰,۲۵,۵۰)	(۰,۲۵,۵۰)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۲۵)	(۴۲,۶۷,۹۲)	(۴۲,۶۷,۹۲)	C4
(۳۳,۵۸,۸۳)	(۵۸,۸۳,۱۰۰)	(۴۲,۶۷,۹۲)	(۰,۰,۰)	(۵۰,۷۵,۹۲)	(۰,۰,۲۵)	(۵۸,۸۳,۱۰۰)	(۰,۸,۳۳)	C5
(۱۷,۴۲,۶۷)	(۵۰,۷۵,۱۰۰)	(۰,۰,۰)	(۴۲,۶۷,۹۲)	(۴۲,۶۷,۹۲)	(۰,۰,۲۵)	(۵۰,۷۵,۱۰۰)	(۰,۸,۳۳)	C6
(۲۵,۵۰,۷۵)	(۰,۰,۰)	(۵۰,۷۵,۹۲)	(۴۲,۶۷,۹۲)	(۵۰,۷۵,۱۰۰)	(۰,۰,۲۵)	(۶۷,۹۲,۱۰۰)	(۰,۸,۳۳)	C7
(۰,۰,۰)	(۳۳,۵۸,۸۳)	(۳۳,۵۸,۸۳)	(۴۲,۶۷,۹۲)	(۶۷,۹۲,۱۰۰)	(۰,۱۷,۴۲)	(۸,۳۳,۵۸)	(۶۷,۹۲,۱۰۰)	C8

جدول ۵. ماتریس نرمال ارتباط مستقیم فازی (× ۱۰۰)

C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
(۹,۱۳,۱۶)	(۰,۱,۶)	(۰,۱,۶)	(۰,۰,۴)	(۱۲,۱۶,۱۸)	(۰,۰,۴)	(۰,۰,۴)	(۰,۰,۰)	C1
(۳,۷,۱۲)	(۱,۶,۱۰)	(۶,۱۰,۱۵)	(۶,۱۰,۱۵)	(۱۳,۱۸,۱۸)	(۰,۰,۴)	(۰,۰,۰)	(۰,۱,۶)	C2
(۱۰,۱۵,۱۸)	(۰,۰,۴)	(۰,۱,۶)	(۰,۱,۶)	(۰,۱,۶)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۴)	(۱۰,۱۵,۱۸)	C3
(۰,۰,۴)	(۰,۱,۶)	(۰,۴,۹)	(۰,۴,۹)	(۰,۰,۰)	(۰,۰,۴)	(۷,۱۲,۱۶)	(۷,۱۲,۱۶)	C4
(۶,۱۰,۱۵)	(۱۰,۱۵,۱۸)	(۷,۱۲,۱۶)	(۰,۰,۰)	(۹,۱۳,۱۶)	(۰,۰,۴)	(۱۰,۱۵,۱۸)	(۰,۱,۶)	C5
(۳,۷,۱۲)	(۹,۱۳,۱۸)	(۰,۰,۰)	(۷,۱۲,۱۶)	(۷,۱۲,۱۶)	(۰,۰,۴)	(۹,۱۳,۱۸)	(۰,۱,۶)	C6
(۴,۹,۱۳)	(۰,۰,۰)	(۹,۱۳,۱۶)	(۷,۱۲,۱۶)	(۹,۱۳,۱۸)	(۰,۰,۴)	(۱۲,۱۶,۱۸)	(۰,۱,۶)	C7
(۰,۰,۰)	(۶,۱۰,۱۵)	(۶,۱۰,۱۵)	(۷,۱۲,۱۶)	(۱۲,۱۶,۱۸)	(۰,۳,۷)	(۱,۶,۱۰)	(۱۲,۱۶,۱۸)	C8

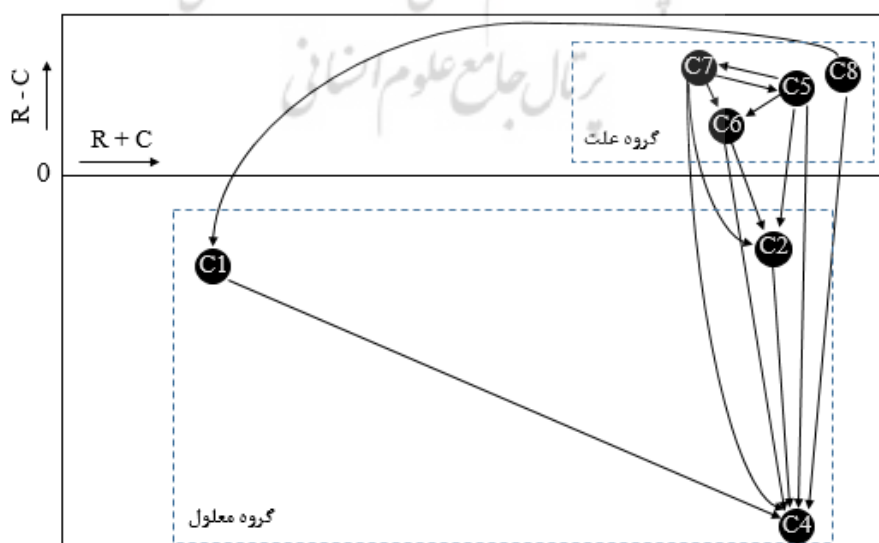
جدول ۶. ماتریس ارتباط کامل فازی (× ۱۰۰)

C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
(۹,۱۵,۴۷)	(۱,۴,۳۷)	(۱,۵,۳۹)	(۱,۴,۳۷)	(۱۴,۲۲,۵۹)	(۰,۰,۱۷)	(۱,۶,۴۱)	(۲,۵,۳۲)	C1
(۴,۱۳,۵۸)	(۳,۱۳,۵۵)	(۷,۱۷,۶۲)	(۷,۱۸,۶۲)	(۱۵,۲۹,۷۹)	(۰,۰,۲۳)	(۳,۱۱,۵۴)	(۲,۶,۵۴)	C2
(۱۱,۱۸,۵۲)	(۱,۴,۳۸)	(۱,۵,۴۲)	(۱,۵,۴۱)	(۳,۹,۵۳)	(۰,۱,۱۴)	(۱,۴,۴۲)	(۱۲,۱۴,۵۲)	C3
(۱,۵,۴۰)	(۰,۵,۴۰)	(۱,۸,۴۵)	(۱,۸,۴۴)	(۲,۹,۴۸)	(۰,۰,۱۸)	(۷,۱۶,۵۴)	(۷,۱۴,۴۸)	C4
(۸,۱۸,۶۶)	(۱۲,۲۳,۶۸)	(۱۰,۲۲,۷۰)	(۳,۱۲,۵۵)	(۱۴,۲۹,۸۵)	(۰,۱,۲۵)	(۱۴,۲۸,۷۶)	(۲,۸,۵۶)	C5
(۵,۱۴,۶۲)	(۱۱,۲۱,۶۶)	(۳,۱۰,۵۴)	(۹,۲۱,۶۷)	(۱۱,۲۷,۸۳)	(۰,۰,۲۴)	(۱۲,۲۵,۷۴)	(۱,۷,۵۴)	C6
(۶,۱۷,۶۳)	(۲,۱۰,۵۱)	(۱۱,۲۳,۶۸)	(۹,۲۲,۶۸)	(۱۴,۲۹,۸۵)	(۰,۱,۲۴)	(۱۵,۲۸,۷۵)	(۲,۸,۵۴)	C7
(۲,۱۰,۵۵)	(۸,۱۸,۶۵)	(۸,۱۹,۶۹)	(۹,۲۱,۶۹)	(۱۷,۲۲,۸۸)	(۰,۳,۲۸)	(۵,۱۹,۷۰)	(۱۳,۲۲,۶۷)	C8

در مرحله بعدی، ماتریس ارتباط کامل دیفازی شده در جدول ۷ نشان داده شده است. برای تعیین مقدار آستانه برای فیلتر کردن روابط ناچیز دو رویکرد وجود دارد: میانگین ماتریس ارتباط کامل و استفاده از نظر خبرگان. مقدار میانگین ماتریس برابر $0/196$ است و اگر به عنوان مقدار آستانه استفاده شود، 50% درصد ارتباطات در نظر گرفته شده و 50% درصد فیلتر می‌شوند. برای این منظور خبرگان مقدار آستانه را طوری تنظیم کردند که حدود 20% درصد کل روابط انتخاب شده و باقی فیلتر شوند، بنابراین مقدار آستانه برابر $0/28$ انتخاب شد. با استفاده از مجموعه داده $R + C$ و $R - C$ ارائه شده در جدول ۷ نیز می‌توان نمودار علی معلولی را مطابق شکل ۳ ترسیم کرد. با توجه به شکل ۳ مشخص است که معیارهای طراحی سبز (C_5)، خرید سبز (C_6)، تولید سبز (C_7) و حمل و نقل سبز (C_8) با مقادیر مثبت ($R - C$) معیارهای علت هستند و تحویل به موقع (C_1)، کیفیت (C_2)، و اعتبار تأمین کننده (C_4) با مقادیر منفی ($R - C$) معیارهای معلول هستند. همچنین تمامی معیارها روی اعتبار تأمین کننده (C_4) تأثیرگذار هستند.

جدول ۷. ماتریس ارتباط کامل دیفازی شده

$R_i - C_i$	$R_i + C_i$	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
$-0/36$	$2/47$	$0/207$	$-0/101$	$0/111$	$-0/101$	$-0/284$	$0/033$	$-0/117$	$-0/099$	C1
$-0/28$	$3/54$	$0/203$	$-0/200$	$0/245$	$-0/245$	$-0/365$	$0/042$	$-0/185$	$-0/144$	C2
$-0/72$	$1/42$	$0/240$	$-0/096$	$0/112$	$-0/113$	$-0/164$	$0/029$	$-0/107$	$-0/212$	C3
$-1/34$	$3/58$	$0/110$	$-0/111$	$0/145$	$-0/143$	$-0/154$	$0/032$	$-0/226$	$-0/198$	C4
$-0/33$	$3/59$	$0/254$	$-0/297$	$0/290$	$-0/190$	$-0/374$	$0/047$	$-0/344$	$-0/162$	C5
$-0/18$	$3/46$	$0/221$	$-0/276$	$0/177$	$-0/278$	$-0/349$	$0/045$	$-0/321$	$-0/152$	C6
$-0/40$	$3/41$	$0/239$	$-0/169$	$0/293$	$-0/284$	$-0/370$	$0/046$	$-0/347$	$-0/158$	C7
$-0/36$	$3/65$	$0/174$	$-0/255$	$0/268$	$-0/279$	$-0/397$	$0/074$	$-0/266$	$-0/291$	C8



شکل ۳. نمودار علی معلولی معیارها

در گام بعدی سوپر ماتریس وزنی مطابق جدول ۸ به دست می‌آید و در نهایت با ضرب این ماتریس در خودش به صورت مکرر، وزن نهایی معیارها مطابق جدول ۹ حاصل می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود، اعتبار تأمین کننده مهم‌ترین معیار با وزن ۰/۱۹۵ است و بعد از آن کیفیت، خرید سبز، طراحی سبز، حمل و نقل سبز، تولید سبز، تحویل به موقع و فاصله در رتبه‌های بعدی هستند.

جدول ۸. سوپر ماتریس وزنی معیارها

C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
۰/۲۰۷	۰/۱۰۱	۰/۱۱۱	۰/۱۰۱	۰/۲۸۴	۰/۰۳۳	۰/۱۱۷	۰/۰۹۹	C1
۰/۲۰۳	۰/۲۰۰	۰/۲۴۵	۰/۲۴۵	۰/۳۶۵	۰/۰۴۲	۰/۱۸۵	۰/۱۴۴	C2
۰/۲۴۰	۰/۰۹۶	۰/۱۱۲	۰/۱۱۳	۰/۱۶۴	۰/۰۲۹	۰/۱۰۷	۰/۲۱۲	C3
۰/۱۱۰	۰/۱۱۱	۰/۱۴۵	۰/۱۴۳	۰/۱۵۴	۰/۰۳۲	۰/۲۲۶	۰/۱۹۸	C4
۰/۲۵۴	۰/۲۹۷	۰/۲۹۰	۰/۱۹۰	۰/۳۷۴	۰/۰۴۷	۰/۳۴۴	۰/۱۶۲	C5
۰/۲۲۱	۰/۲۷۶	۰/۱۷۷	۰/۲۷۸	۰/۳۴۹	۰/۰۴۵	۰/۳۲۱	۰/۱۵۲	C6
۰/۲۳۹	۰/۱۶۹	۰/۲۹۳	۰/۲۸۴	۰/۳۷۰	۰/۰۴۶	۰/۳۴۷	۰/۱۵۸	C7
۰/۱۷۴	۰/۲۵۵	۰/۲۶۸	۰/۲۷۹	۰/۳۹۷	۰/۰۷۴	۰/۲۶۶	۰/۲۹۱	C8

جدول ۹. وزن نهایی معیارها

وزن نهایی	معیار
۰/۱۱۴	تحویل به موقع (C ₁)
۰/۱۵۷	کیفیت (C ₂)
۰/۰۲۸	فاصله (C ₃)
۰/۱۹۵	اعتبار تأمین کننده (C ₄)
۰/۱۳۰	طراحی سبز (C ₅)
۰/۱۳۱	خرید سبز (C ₆)
۰/۱۱۸	تولید سبز (C ₇)
۰/۱۲۶	حمل و نقل سبز (C ₈)

تاپسیس فازی برای تعیین امتیاز تأمین کنندگان

ابتدا نتیجه ارزیابی گروهی شامل سه خبره برای تأمین کنندگان استخراج شد، سپس با استفاده از متغیر زبانی و اعداد فازی مثلثی مربوط به آن‌ها در جدول ۲، ماتریس تصمیم فازی مطابق جدول ۱۰ به دست آمد. در مراحل بعدی، ماتریس تصمیم نرمال شده و ماتریس تصمیم نرمال وزنی به ترتیب در جداول ۱۱ و ۱۲ محاسبه شده‌اند. با توجه به گام‌های ۴ تا ۶ روش تاپسیس فازی، فاصله از ایدئال و غیرایدئال و همچنین درجه نزدیکی مطابق جدول ۱۳ محاسبه می‌شود. همان طور که مشخص است گزینه A1 به عنوان بهترین گزینه است و گزینه‌های A6، A5، A3، A4 و A2 به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

جدول ۱۰. ماتریس تصمیم فازی ارزیابی تأمین کنندگان در معیارها (۱۰ ×)

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
A1	(۱۰,۳۰,۵۰)	(۱۷,۳۷,۵۷)	(۲۰,۳۷,۵۷)	(۱۰,۳۰,۵۰)	(۵۷,۷۷,۹۳)	(۳۰,۵۰,۷۰)	(۶۳,۸۳,۹۷)	(۴۳,۶۳,۸۳)	
A2	(۱۷,۳۷,۵۷)	(۱۳,۳۰,۵۰)	(۷,۲۳,۴۳)	(۳,۱۷,۳۷)	(۳۷,۵۷,۷۷)	(۵۰,۷۰,۸۷)	(۳۷,۵۷,۷۷)	(۳,۱۷,۳۷)	
A3	(۳۰,۵۰,۷۰)	(۱۷,۳۷,۵۷)	(۱۰,۲۰,۳۷)	(۳,۱۳,۳۰)	(۳۰,۵۰,۷۰)	(۵۰,۷۰,۸۷)	(۵۰,۷۰,۸۷)	(۳۷,۵۷,۷۷)	
A4	(۱۷,۳۷,۵۷)	(۳۰,۵۰,۷۰)	(۰,۳,۱۷)	(۰,۳,۱۷)	(۵۷,۷۷,۹۳)	(۴۳,۶۳,۸۳)	(۱۳,۳۰,۵۰)	(۵۷,۷۷,۹۳)	
A5	(۳۷,۵۷,۷۷)	(۷,۲۳,۴۳)	(۳,۱۳,۳۰)	(۳,۱۳,۳۰)	(۵۷,۷۷,۹۳)	(۳۷,۵۷,۷۷)	(۳۰,۵۰,۷۰)	(۷۰,۸۷,۹۷)	
A6	(۷,۲۳,۴۳)	(۱۷,۳۷,۵۷)	(۱۷,۳۷,۵۷)	(۳,۱۷,۳۷)	(۶۳,۸۰,۹۳)	(۲۳,۴۳,۶۳)	(۳۷,۵۷,۷۷)	(۸۳,۹۷,۱۰۰)	

جدول ۱۱. ماتریس تصمیم نرمال (۱۰۰ ×)

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
A1	(۱۳,۳۹,۶۵)	(۲۴,۵۲,۸۱)	(۳۵,۶۵,۱۰۰)	(۲۰,۶۰,۱۰۰)	(۶۱,۸۲,۱۰۰)	(۳۵,۵۸,۸۱)	(۶۶,۸۶,۱۰۰)	(۴۳,۶۳,۸۳)	
A2	(۲۲,۴۸,۷۴)	(۱۹,۴۳,۷۱)	(۱۲,۴۱,۷۶)	(۷,۳۳,۷۳)	(۳۹,۶۱,۸۲)	(۵۸,۸۱,۱۰۰)	(۳۸,۵۹,۷۹)	(۳,۱۷,۳۷)	
A3	(۳۹,۶۵,۹۱)	(۲۴,۵۲,۸۱)	(۱۸,۳۵,۶۵)	(۷,۲۷,۶۰)	(۳۲,۵۴,۷۵)	(۵۸,۸۱,۱۰۰)	(۵۲,۷۲,۹۰)	(۳۷,۵۷,۷۷)	
A4	(۲۲,۴۸,۷۴)	(۴۳,۷۱,۱۰۰)	(۰,۶,۲۹)	(۰,۷,۳۳)	(۶۱,۸۲,۱۰۰)	(۵۰,۷۳,۹۶)	(۱۴,۳۱,۵۲)	(۵۷,۷۷,۹۳)	
A5	(۴۸,۷۴,۱۰۰)	(۱۰,۳۳,۶۲)	(۶,۲۴,۵۳)	(۷,۲۷,۶۰)	(۶۱,۸۲,۱۰۰)	(۴۲,۶۵,۸۸)	(۳۱,۵۲,۷۲)	(۷۰,۸۷,۹۷)	
A6	(۹,۳۰,۵۷)	(۲۴,۵۲,۸۱)	(۲۹,۶۵,۱۰۰)	(۷,۳۳,۷۳)	(۶۸,۸۶,۱۰۰)	(۲۷,۵۰,۷۳)	(۳۸,۵۹,۷۹)	(۸۳,۹۷,۱۰۰)	

جدول ۱۲. ماتریس تصمیم نرمال وزنی (۱۰۰ ×)

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
A1	(۲,۵,۸)	(۳,۶,۱۰)	(۵,۸,۱۳)	(۳,۸,۱۳)	(۱۲,۱۶,۲۰)	(۱,۲,۲)	(۱۰,۱۴,۱۶)	(۵,۷,۱۰)	
A2	(۳,۶,۹)	(۲,۵,۸)	(۲,۵,۱۰)	(۱,۴,۱۰)	(۸,۱۲,۱۶)	(۲,۲,۳)	(۶,۹,۱۲)	(۰,۲,۴)	
A3	(۵,۸,۱۲)	(۳,۶,۱۰)	(۲,۵,۸)	(۱,۳,۸)	(۶,۱۰,۱۵)	(۲,۲,۳)	(۸,۱۱,۱۴)	(۴,۶,۹)	
A4	(۳,۶,۹)	(۵,۸,۱۲)	(۰,۱,۴)	(۰,۱,۴)	(۱۲,۱۶,۲۰)	(۱,۲,۲)	(۲,۵,۸)	(۶,۹,۱۱)	
A5	(۶,۹,۱۳)	(۱,۴,۷)	(۱,۳,۷)	(۱,۳,۸)	(۱۲,۱۶,۲۰)	(۱,۲,۲)	(۵,۸,۱۱)	(۸,۱۰,۱۱)	
A6	(۱,۴,۷)	(۳,۶,۱۰)	(۴,۸,۱۳)	(۱,۴,۱۰)	(۱۳,۱۷,۲۰)	(۱,۱,۲)	(۶,۹,۱۲)	(۱۰,۱۱,۱۱)	

جدول ۱۳. فاصله از ایدئال و غیر ایدئال و درجه نزدیکی گزینه‌ها

گزینه	d ⁺	d ⁻	CI
A1	۷/۳۵	۰/۶۹	۰/۰۸۶۲
A2	۷/۵۳	۰/۵۲	۰/۰۶۴۶
A3	۷/۴۶	۰/۵۸	۰/۰۷۱۶
A4	۷/۵۱	۰/۵۳	۰/۰۶۵۹
A5	۷/۴۴	۰/۶۰	۰/۰۷۴۹
A6	۷/۳۹	۰/۶۵	۰/۰۸۱۲

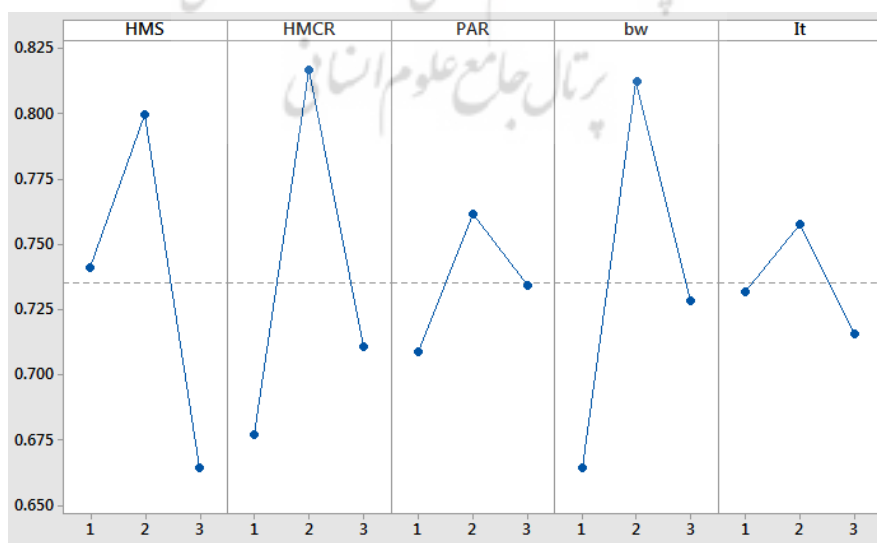
تنظیم پارامترهای الگوریتم جست و جوی هارمونی

برای تنظیم پارامترهای الگوریتم از روش تاگوچی استفاده شده است. پارامترهای الگوریتم به همراه سطوح آن‌ها در جدول ۱۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به وجود ۵ پارامتر در ۳ سطح، از آرایه اورتوگونال L^{27} برای طراحی آزمایش استفاده شده است. همچنین با توجه به دهدفه بودن مسئله، شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی جواب‌ها در ادبیات پیشنهاد شده‌اند که در اینجا از شاخص‌های تعداد جواب‌های پارتو، فاصله از ایدئال (میانگین فاصله نقاط پارتو از جواب ایدئال) و گوناگونی استفاده می‌شود. برای ۲۷ آزمایش ممکن، شاخص‌های فوق محاسبه شد. سپس برای تجمیع آن‌ها از روش مجموع وزن ساده استفاده شد و امتیاز نهایی برای هر آزمایش با در نظر گرفتن وزن یکسان برای هر ۳ شاخص محاسبه شد.

جدول ۱۴. سطوح پارامترهای الگوریتم

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
اندازه حافظه هارمونی (HMS)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی (HMCR)	۰/۴	۰/۵	۰/۶
نرخ تنظیم گام (PAR)	۰/۳	۰/۵	۰/۷
پهنای باند فاصله (bw)	۱۰	۵۰	۱۰۰
تعداد تکرارها (It)	۱۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۵۰۰۰۰

مقادیر میانگین نسبت S/N برای پارامترهای الگوریتم در شکل ۴ نشان داده شده است و مقدار بهینه پارامترها به صورت زیر مقداردهی می‌شوند: اندازه حافظه هارمونی (۱۰۰)، نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی (۰/۵)، نرخ تنظیم گام (۰/۵)، پهنای باند فاصله (۵۰) و تعداد تکرارها (۳۰۰۰۰).



شکل ۴. خروجی نرم افزار MiniTab برای تنظیم پارامترها

حل مسئله دو هدفه انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش

در این بخش ابتدا داده‌های مسئله معرفی شده سپس مدل ریاضی دوهدفه با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی حل می‌شود. در مسئله نمونه تقاضای سالیانه ۱۰۰۰۰ واحد بوده که شرکت می‌تواند این مقدار را از ۶ تأمین کننده خریداری کند. وزن‌های تأمین کنندگان در تابع هدف ارزش خرید سالانه با توجه به ارزیابی تأمین کنندگان در مراحل قبلی به دست آمده‌اند و خروجی روش تاپسیس فازی هستند. اطلاعات تأمین کنندگان در جداول ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۱۵. اطلاعات تأمین کنندگان

تأمین کننده						پارامتر
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱۶۰۰۰	۱۸۰۰۰	۱۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۷۰۰۰	۱۹۰۰۰	S_i
۱۹۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۳۰۰۰	۱۷۰۰۰	۱۸۰۰۰	۲۰۰۰۰	A_i
۳۲۰	۲۹۰	۳۰۰	۲۹۰	۲۹۵	۳۲۵	Z_i
۱۳۰	۱۰۰	۸۰	۹۰	۱۱۰	۱۲۰	h_i
۲۸۰۰	۳۲۰۰	۲۵۰۰	۳۰۰۰	۴۱۰۰	۳۵۰۰	P_i
۰/۰۸۱۲	۰/۰۷۴۹	۰/۰۶۵۹	۰/۰۷۱۶	۰/۰۶۴۶	۰/۰۸۶۲	w_i

جدول ۱۶. تخفیف قیمت پیشنهادی از طرف تأمین کنندگان

تأمین کننده	بازه خرید	قیمت	تأمین کننده	بازه خرید	قیمت
۱	(۰, ۶۰۰)	۵۷۰	۴	(۰, ۵۰۰)	۵۳۰
	[۶۰۰, ۱۲۰۰)	۵۵۰		[۵۰۰, ۱۰۰۰)	۵۰۰
	[۱۲۰۰, ۲۰۰۰)	۵۴۰		[۱۰۰۰, ۱۵۰۰)	۴۶۰
	[۲۰۰۰, ۲۸۰۰)	۵۳۰		[۱۵۰۰, ۲۰۰۰)	۴۳۰
	[۲۸۰۰, ۳۵۰۰]	۵۲۰		[۲۰۰۰, ۲۵۰۰]	۴۱۰
۲	(۰, ۱۰۰۰)	۵۲۰	۵	(۰, ۵۰۰)	۵۵۵
	[۱۰۰۰, ۲۰۰۰)	۴۹۰		[۵۰۰, ۱۱۰۰)	۵۴۵
	[۲۰۰۰, ۳۰۰۰)	۴۶۰		[۱۱۰۰, ۱۹۰۰)	۵۳۵
	[۳۰۰۰, ۴۱۰۰]	۴۱۰		[۱۹۰۰, ۲۶۰۰)	۵۰۰
				[۲۶۰۰, ۳۲۰۰]	۴۹۰
۳	(۰, ۶۰۰)	۵۷۰	۶	(۰, ۴۰۰)	۵۸۰
	[۶۰۰, ۱۴۰۰)	۵۵۰		[۴۰۰, ۹۰۰)	۵۷۰
	[۱۴۰۰, ۲۴۰۰)	۵۴۰		[۹۰۰, ۱۵۰۰)	۵۵۵
	[۲۴۰۰, ۳۰۰۰]	۵۳۰		[۱۵۰۰, ۲۱۰۰)	۵۳۰
				[۲۱۰۰, ۲۸۰۰]	۵۱۵

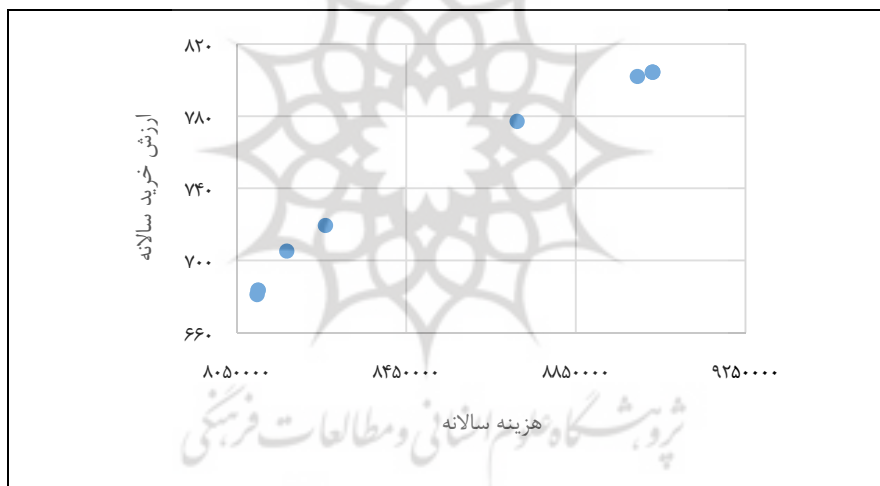
الگوریتم جست‌وجوی هارمونی در نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۷ پیاده‌سازی شد و پارامترهای آن مطابق با خروجی نرم افزار مینی‌تب مقداردهی شدند. همچنین، ابتدا مقادیر توابع بهینه هر یک از اهداف محاسبه شدند: مقدار بهینه تابع هدف هزینه کل سالانه معادل $Z_1^* = ۸۰۹۸۴۳۰$ به‌دست آمد که در آن مقادیر سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان ۱ تا ۶ به‌ترتیب برابر ۰، ۳۲۸۲، ۷۶۵، ۲۰۰۲، ۱۹۵۹ و ۰ است؛ همچنین مقدار بهینه تابع هدف ارزش خرید سالانه معادل $Z_2^* = ۸۰۴/۵۴$ به‌دست آمد که در آن مقادیر سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان ۱ تا ۶ به‌ترتیب برابر ۰، ۳۵۰۰، ۵۰۰، ۰، ۳۲۰۰ و ۲۸۰۰ است. در ادامه با توجه به نظر تصمیم‌گیرنده، وزن تابع هدف هزینه برابر $۰/۷$ و وزن تابع هدف ارزش خرید برابر $۰/۳$ در نظر گرفته شد. با حل دوباره مدل با تابع هدف کمینه‌سازی انحرافات نسبی توابع هدف از مقادیر بهینه آن‌ها، مقدار تابع هدف برابر $۰/۰۴۳۰۳$ به‌دست آمد و مقادیر تابع هدف هزینه و ارزش خرید به‌ترتیب برابر ۸۱۶۸۱۰۰ و $۷۰۵/۲۸$ هستند. مقادیر سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان ۱ تا ۶ نیز در جواب بهینه برابر ۱۲۰۱، ۳۰۰۳، ۰، ۲۰۱۶، ۱۹۰۲ و ۰ به‌دست آمد.

تحلیل حساسیت

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، با تغییر اوزان توابع هدف می‌توان جواب‌های پارتوی مسئله را شناسایی کرد. در بخش قبلی جواب مسئله به ازای $\lambda = ۱$ ، $\lambda = ۰$ و $\lambda = ۰/۷$ به‌دست آمد که به‌ترتیب معادل بهینه‌سازی تک‌هدفه تابع هدف هزینه (Z_1^*) ، بهینه‌سازی تک‌هدفه تابع هدف ارزش خرید (Z_2^*) و جواب مسئله دوهدفه در بخش قبلی هستند. جدول ۱۷ جواب‌های حاصل شده به ازای مقادیر مختلف λ را نشان می‌دهد که به ازای هر مقدار از λ ، مقدار تابع برآزش، مقادیر توابع هدف و سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان مشخص شده است. با توجه به ردیف اول جدول ۱۷ که معادل با $\lambda = ۰$ بوده و اهمیت تابع هدف ارزش خرید در بیشترین مقدار ممکن است، سفارش‌ها به تأمین‌کنندگانی تخصیص پیدا کرده که وزن بالاتری دارند. تأمین‌کننده ۱ بالاترین وزن ($۰/۰۸۶۲$) را کسب کرده است و مقدار سفارش تخصیص یافته به آن در بیشترین مقدار ممکن (۳۵۰۰) است که معادل با ظرفیت سالانه آن تأمین‌کننده است؛ پس از آن تأمین‌کنندگان ۶ و ۵ وزن $۰/۰۸۱۲$ و $۰/۰۷۴۹$ کسب کرده است و به آن‌ها نیز مقدار سفارشی برابر با ظرفیت سالانه آن‌ها به‌ترتیب ۲۸۰۰ و ۳۲۰۰ تخصیص یافته است. مجموع سفارش تخصیص یافته به این سه تأمین‌کننده برابر ۹۵۰۰ واحد است و ۵۰۰ واحد باقی‌مانده به تأمین‌کننده ۳ تخصیص یافته است که به لحاظ رتبه ۴ را در ارزیابی تأمین‌کنندگان با وزن $۰/۰۷۱۶$ کسب کرده است. با افزایش مقدار λ (کاهش وزن تابع هدف ارزش خرید سالانه)، سفارش‌ها به تأمین‌کنندگانی تخصیص پیدا می‌کند که قیمت‌های پیشنهادی پایین‌تری دارند؛ به‌خصوص اینکه تأمین‌کنندگان ۱ و ۶ که وزن بالایی داشتند، با توجه به قیمت‌های بالای آن‌ها در بازه‌های تخفیف، رفته رفته از مقدار سفارش آن‌ها کاسته شده و در نهایت به صفر می‌رسد. شکل ۵ نیز موازنه تابع هدف هزینه سالانه و ارزش خرید سالانه را به تصویر می‌کشد که همان‌طور که از شکل مشخص است، جواب‌های حاصل شده مرز پارتوی مسئله را نشان می‌دهد. تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به این منحنی، بهترین جواب را طوری انتخاب کند که موازنه صحیحی بین اهداف صورت گیرد.

جدول ۱۷. جواب‌های تولید شده به ازای مقادیر مختلف λ

Q_6	Q_5	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1	Z_2	Z_1	Z	λ
۲۸۰۰	۳۲۰۰	۰	۵۰۰	۰	۳۵۰۰	۸۰۴/۵۴	۹۱۴۰۳۱۰	۰	۰
۲۲۸۱	۲۶۰۶	۰	۴۰۹	۰	۲۸۵۱	۸۰۴/۵۲	۹۰۳۱۳۰۰	-/۰۱۱۵	-/۱
۲۲۷۷	۲۶۰۴	۰	۴۱۰	۰	۲۸۴۹	۸۰۴/۵۱	۹۰۳۰۹۰۰	-/۰۲۳۰	-/۲
۲۲۷۵	۲۶۰۱	۰	۴۰۸	۰	۲۸۴۴	۸۰۴/۵۱	۹۰۳۰۳۰۰	-/۰۳۴۵	-/۳
۲۲۷۷	۲۶۰۱	۰	۴۱۰	۰	۲۸۴۶	۸۰۲/۱۲	۸۹۹۵۳۰۰	-/۰۴۶۱	-/۴
۱۵۰۱	۱۹۰۸	۲۰۰۲	۰	۰	۲۸۰۳	۷۷۷/۱۳	۸۷۱۱۳۰۰	-/۰۵۴۹	-/۵
۰	۱۹۰۵	۲۰۰۵	۰	۳۰۰۱	۲۰۱۳	۷۱۹/۵۲	۸۲۵۹۷۰۰	-/۰۵۴۲	-/۶
۰	۱۹۰۲	۲۰۱۶	۰	۳۰۰۳	۱۲۰۱	۷۰۵/۲۹	۸۱۶۸۱۰۰	-/۰۴۳۰	-/۷
۰	۲۶۰۱	۲۰۳۲	۱۶۵	۳۳۳۲	۰	۶۸۳/۶۲	۸۱۰۰۵۳۸	-/۰۳۰۲	-/۸
۰	۲۶۰۱	۲۰۳۲	۱۶۵	۳۳۳۲	۰	۶۸۳/۶۲	۸۱۰۰۵۳۸	-/۰۱۵۳	-/۹
۰	۱۹۵۹	۲۰۰۲	۷۶۵	۳۲۸۲	۰	۶۸۱/۱۳	۸۰۹۸۴۳۰	۰	۱



شکل ۵. مرز پارتوی حاصل از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی

مقایسه جواب‌های الگوریتم فراابتکاری با رویکرد دقیق

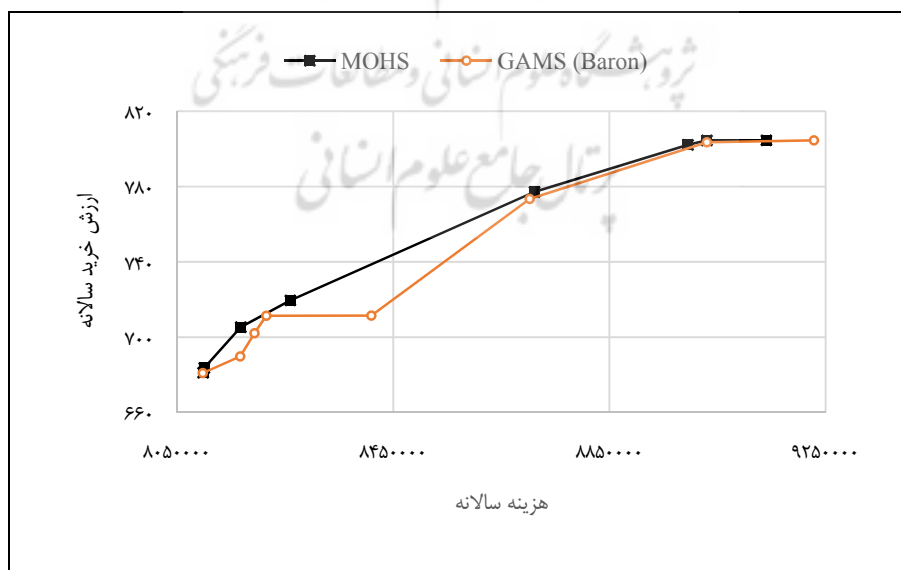
برای مقایسه جواب‌های حاصل از الگوریتم پیشنهادی، مدل غیرخطی دوهدفه در نرم افزار گمز کدنویسی شده و با تنظیم خطای نسبی برابر صفر، از حل‌کننده بارون^۱ استفاده شده است. مشابه با الگوریتم پیشنهادی، از رویکرد معیار جهانی مطابق با رابطه (۲۴) استفاده شده و جواب‌های مسئله به ازای مقادیر مختلف λ به دست آمدند. جدول ۱۸ نتایج مقایسه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج مشخص است، الگوریتم فراابتکاری به ازای تمامی مقادیر λ مجموع انحرافات نسبی (Z) بهتری را حاصل کرده است.

1. Baron

جدول ۱۸. مقایسه جواب‌های الگوریتم فراابتکاری با جواب گمز به ازای مقادیر مختلف λ

جواب گمز (سالور Baron)			جواب الگوریتم فراابتکاری			λ
Z_2	Z_1	Z	Z_2	Z_1	Z	
۸۰۴/۵۴	۱۳۳۲۲۳۱۰	۰	۸۰۴/۵۴	۹۱۴۰۳۱۰	۰	۰
۷۶۵/۵۲	۸۸۷۹۷۰۶	۰/۰۵۳۲	۸۰۴/۵۲	۹۰۳۱۳۰۰	۰/۰۱۱۵	۰/۱
۸۰۳/۴۵	۹۰۳۰۱۴۱	۰/۰۲۴۱	۸۰۴/۵۱	۹۰۳۰۹۰۰	۰/۰۲۳۰	۰/۲
۸۰۴/۵۴	۹۲۲۸۲۵۰	۰/۰۴۱۸	۸۰۴/۵۱	۹۰۳۰۳۰۰	۰/۰۳۴۵	۰/۳
۸۰۲/۹۳	۹۰۵۸۵۴۸	۰/۰۴۸۶	۸۰۲/۱۲	۸۹۹۵۳۰۰	۰/۰۴۴۱	۰/۴
۷۷۳/۴۲	۸۷۰۲۵۱۹	۰/۰۵۶۶	۷۷۷/۱۳	۸۷۱۱۳۰۰	۰/۰۵۴۹	۰/۵
۷۱۱/۳۱	۸۲۱۵۴۲۳	۰/۰۵۵۰	۷۱۹/۵۲	۸۲۵۹۷۰۰	۰/۰۵۴۲	۰/۶
۷۰۲/۰۳	۸۱۹۳۳۲۱	۰/۰۴۶۴	۷۰۵/۲۹	۸۱۶۸۱۰۰	۰/۰۴۳۰	۰/۷
۶۸۹/۷۵	۸۱۶۷۱۶۶	۰/۰۳۵۳	۶۸۳/۶۲	۸۱۰۰۵۳۸	۰/۰۳۰۲	۰/۸
۷۱۱/۴۱	۸۴۰۹۶۹۱	۰/۰۴۶۲	۶۸۳/۶۲	۸۱۰۰۵۳۸	۰/۰۱۵۳	۰/۹
۶۸۰/۸۹	۸۰۹۷۸۷۱	۰	۶۸۱/۱۳	۸۰۹۸۴۳۰	۰	۱

همچنین شکل ۶ مرز پارتوی حاصل از دو روش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، الگوریتم فراابتکاری مرز پارتوی بهتری را شناسایی کرده است. اگرچه خروجی هر دو روش ۸ جواب پارتو است، اما در صورتی که این جواب‌ها ترکیب شوند، ۳ جواب از جواب‌های گمز مغلوب می‌شوند و با توجه به شاخص کیفیت جواب‌های پارتو، سهم الگوریتم فراابتکاری و گمز به ترتیب ۸ و ۵ جواب از ۱۳ جواب پارتو خواهد بود.



شکل ۶. مقایسه مرز پارتوی حاصل از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و گمز

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، از یک رویکرد پیشنهادی شامل دنیای فازی، تاپسیس فازی و مدل بهینه‌سازی دوهدفه برای مسئله انتخاب تأمین‌کننده سبز و تخصیص سفارش استفاده شد که می‌تواند همه تأمین‌کنندگان را ارزیابی کرده و مقدار بهینه خرید را تعیین کند. برای ارزیابی و اعتبارسنجی، رویکرد پیشنهادی روی یک مطالعه موردی با داده‌های واقعی در حوزه تأمین تجهیزات پزشکی بررسی شد. ابتدا برای تهیه فهرست معیارها از نتایج مطالعات پیشین استفاده شده سپس فهرست نهایی معیارها با استفاده از نظرسنجی از خبرگان با توجه به استراتژی و سیاست‌های سازمان انتخاب شد. برای تعیین تأثیر معیارها روی همدیگر و همچنین ارزیابی تأمین‌کنندگان در هر معیار از متغیرهای زبانی و اعداد فازی مثلثی متناظر با آن‌ها استفاده شد. نتایج دنیای فازی نشان داد که اعتبار تأمین‌کننده مهمترین معیار است و بعد از آن کیفیت، خرید سبز، طراحی سبز، حمل‌ونقل سبز، تولید سبز، تحویل به‌موقع و فاصله در رتبه‌های بعدی هستند. همچنین تمامی معیارها روی اعتبار تأمین‌کننده تأثیرگذار هستند. در ادامه تاپسیس فازی برای محاسبه امتیاز هر تأمین‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. امتیاز تأمین‌کنندگان به‌عنوان ورودی به مدل ریاضی دوهدفه داده شد که در تابع هدف دوم یا ارزش خرید سالانه به‌عنوان ضرایب مقادیر سفارش تأمین‌کنندگان هستند. تابع هدف اول نیز هزینه‌های کل زنجیره را کمینه می‌کند. با توجه به دوهدفه بودن مدل ریاضی از رویکرد سازشی استفاده شد که مدل دوهدفه را تبدیل به یک مدل تک‌هدفه می‌کند به نحوی که انحرافات نسبی توابع هدف از مقادیر ایدئال آن‌ها کمینه شود. همچنین با توجه به غیرخطی بودن مدل ریاضی الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی هارمونی برای مسئله طراحی شد و برای مواجهه با محدودیت‌های مسئله یک الگوریتم ترمیم پیشنهاد شد. رویکرد پیشنهادی با در نظر گرفتن معیارهای سبز، تخصیص بهینه را به تأمین‌کنندگان انجام می‌دهد و تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به جواب‌های پارتوی مسئله، بهترین جواب را طوری انتخاب کند که موازنه صحیحی بین هزینه‌های زنجیره و ارزش خرید صورت گیرد. از جمله محدودیت‌های تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مدل به‌صورت تک‌کالایی ارائه شده است؛ کمبود در مدل غیرمجاز است؛ همچنین فرض شده است تأمین‌کنندگان به موقع محصول را به دست خریدار می‌رسانند. برای توسعه تحقیق می‌توان این رویکرد را برای مسائل مشابه در دنیای واقعی استفاده کرد. همچنین روش‌های پیشنهادی صرفاً برای حل یک مسئله استفاده شدند. برای مقایسه دو روش می‌توان مسائلی با ابعاد مختلف تولید کرده و با توجه به شاخص‌های چندهدفه، عملکرد دو روش را با آزمون‌های آماری مورد مقایسه قرار داد. برای مقایسه همچنین الگوریتم‌های فراابتکاری دیگری را می‌توان برای حل مسئله طراحی کرد و نتایج آن را با نتایج این روش مقایسه کرد.

References

- Abdullah, L., Chan, W., & Afshari, A. (2019). Application of PROMETHEE method for green supplier selection: a comparative result based on preference functions. *Journal of Industrial Engineering International*, 15, 271-285.

- Afrasiabi, A., Tavana, M. & Di Caprio, D. (2022). An extended hybrid fuzzy multi-criteria decision model for sustainable and resilient supplier selection. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 37291-37314.
- Alaei, S., & Khoshalhan, F. (2015). A Hybrid Cultural-Harmony Algorithm for Multi-Objective Supply Chain Coordination. *Scientia Iranica*, 22(3), 1227-1241.
- Aouadni, S., & Euchti, J. (2022). Using integrated MMD-TOPSIS to solve the supplier selection and fair order allocation problem: a Tunisian case study. *Logistics*, 6(1), 8.
- Babbar, C., & Amin, S. H. (2018). A multi-objective mathematical model integrating environmental concerns for supplier selection and order allocation based on fuzzy QFD in beverages industry. *Expert Systems with Applications*, 92, 27-38.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9.
- Chin, T. A., Tat, H. H., & Sulaiman, Z. (2015). Green supply chain management, environmental collaboration and sustainability performance. *Procedia Cirp*, 26, 695-699.
- Dalalah, D., & Bataineh, O. (2009). A fuzzy logic approach to the selection of the best silicon crystal slicing technology. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 3712-3719.
- Dinçer, H., Yüksel, S., & Martínez, L. (2019). Interval type 2-based hybrid fuzzy evaluation of financial services in E7 economies with DEMATEL-ANP and MOORA methods. *Applied Soft Computing*, 79, 186-202.
- Durmić, E., Stević, Ž., Chatterjee, P., Vasiljević, M., & Tomašević, M. (2020). Sustainable supplier selection using combined FUCOM–Rough SAW model. *Reports in mechanical engineering*, 1(1), 34-43.
- Ecer, F. (2022). Multi-criteria decision making for green supplier selection using interval type-2 fuzzy AHP: a case study of a home appliance manufacturer. *Operational Research*, 22(1), 199-233.
- Fu, Y. K. (2019). An integrated approach to catering supplier selection using AHP-ARAS-MCGP methodology. *Journal of Air Transport Management*, 75, 164-169.
- Gai, L., Liu, H. C., Wang, Y., & Xing, Y. (2023). Green supplier selection and order allocation using linguistic Z-numbers MULTIMOORA method and bi-objective non-linear programming. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 22(2), 267-288.
- Geem, Z. W., Kim, J. H., & Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation*, 76(2), 60-68.
- Ghosh, S. K. (2017). Green supply chain management in production sectors and its impact on firm reputation. *Journal of new theory*, (18), 53-63.
- Govindan, K., Khodaverdi, R., & Vafadarnikjoo, A. (2015). Intuitionistic fuzzy based DEMATEL method for developing green practices and performances in a green supply chain. *Expert Systems with Applications*, 42(20), 7207-7220.
- Güneri, B., & Deveci, M. (2023). Evaluation of supplier selection in the defense industry using q-rung orthopair fuzzy set based EDAS approach. *Expert Systems with Applications*, 222, 119846.

- Hamdan, S., & Cheaitou, A. (2017). Supplier selection and order allocation with green criteria: An MCDM and multi-objective optimization approach. *Computers & Operations Research*, 81, 282-304.
- Hashemzahi, P., Azadnia, A., Galankashi, M. R., Helmi, S. A., & Rafiei, F. M. (2020). Green supplier selection and order allocation: a nonlinear stochastic model. *International Journal of Value Chain Management*, 11(2), 111-138.
- Hosseini, Z. S., Flapper, S. D., & Pirayesh, M. (2022). Sustainable supplier selection and order allocation under demand, supplier availability and supplier grading uncertainties. *Computers & industrial engineering*, 165, 107811.
- Jain, N., Singh, A. R., & Upadhyay, R. K. (2020). Sustainable supplier selection under attractive criteria through FIS and integrated fuzzy MCDM techniques. *International Journal of Sustainable Engineering*, 13(6), 441-462.
- Kamali, A., Ghomi, S. F., & Jolai, F. (2011). A multi-objective quantity discount and joint optimization model for coordination of a single-buyer multi-vendor supply chain. *Computers & Mathematics with Applications*, 62(8), 3251-3269.
- Kannan, D., Khodaverdi, R., Olfat, L., Jafarian, A., & Diabat, A. (2013). Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multi-objective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain. *Journal of Cleaner production*, 47, 355-367.
- Khalili Nasr, A., Tavana, M., Alavi, B., & Mina, H. (2021). A novel fuzzy multi-objective circular supplier selection and order allocation model for sustainable closed-loop supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 287, 124994.
- Kuo, T. C., Hsu, C. W., & Li, J. Y. (2015). Developing a green supplier selection model by using the DANP with VIKOR. *Sustainability*, 7(2), 1661-1689.
- Masoomi, B., Sahebi, I. G., Fathi, M., Yıldırım, F., & Ghorbani, S. (2022). Strategic supplier selection for renewable energy supply chain under green capabilities (fuzzy BWM-WASPAS-COPRAS approach). *Energy Strategy Reviews*, 40, 100815.
- Mohammed, A., Harris, I., & Govindan, K. (2019). A hybrid MCDM-FMOO approach for sustainable supplier selection and order allocation. *International Journal of Production Economics*, 217, 171-184.
- Nazari-Shirkouhi, S., Tavakoli, M., Govindan, K., & Mousakhani, S. (2023). A hybrid approach using Z-number DEA model and Artificial Neural Network for Resilient supplier Selection. *Expert Systems with Applications*, 222, 119746.
- Nguyen, T.-L., Nguyen, P.-H., Pham, H.-A., Nguyen, T.-G., Nguyen, D.-T., Tran, T.-H., Le, H.-C., & Phung, H.-T. (2022). A novel integrating data envelopment analysis and spherical fuzzy MCDM approach for sustainable supplier selection in steel industry. *Mathematics*, 10, 1897.
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2003). Defuzzification within a multicriteria decision model. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 11(05), 635-652.

- Rahman, M. M., Bari, A. M., Ali, S. M., & Taghipour, A. (2022). Sustainable supplier selection in the textile dyeing industry: An integrated multi-criteria decision analytics approach. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15, 200117.
- Razavi Hajiagha, S. H., Alaei, S., Amoozad Mahdiraji, H., & Yaftiyan, F. (2022). International collaboration formation in entrepreneurial food industry: evidence of an emerging economy. *British Food Journal*, 124(7), 2012-2038.
- Rezaeisaray, M., Ebrahimnejad, S., & Khalili-Damghani, K. (2016). A novel hybrid MCDM approach for outsourcing supplier selection. *Journal of Modelling in Management*, 11(2), 536-559.
- Shang, Z., Yang, X., Barnes, D., & Wu, C. (2022). Supplier selection in sustainable supply chains: Using the integrated BWM, fuzzy Shannon entropy, and fuzzy MULTIMOORA methods. *Expert Systems with Applications*, 195, 116567.
- Shao, Y., Barnes, D., & Wu, C. (2023). Sustainable supplier selection and order allocation for multinational enterprises considering supply disruption in COVID-19 era. *Australian Journal of Management*, 48(2), 284-322.
- Sharma, V. K., Chandna, P., & Bhardwaj, A. (2017). Green supply chain management related performance indicators in agro industry: A review. *Journal of Cleaner Production*, 141, 1194-1208.
- Tong, L. Z., Wang, J., & Pu, Z. (2022). Sustainable supplier selection for SMEs based on an extended PROMETHEE II approach. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129830.
- Tuzkaya, G. (2013). An intuitionistic fuzzy Choquet integral operator based methodology for environmental criteria integrated supplier evaluation process. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10, 423-432.
- Vanalle, R. M., Ganga, G. M. D., Godinho Filho, M., & Lucato, W. C. (2017). Green supply chain management: An investigation of pressures, practices, and performance within the Brazilian automotive supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 151, 250-259.
- Yazdani, M., Torkayesh, A. E., & Chatterjee, P. (2020). An integrated decision-making model for supplier evaluation in public healthcare system: the case study of a Spanish hospital. *Journal of Enterprise Information Management*, 33(5), 965-989.