Industrial Management Journal
Print ISSN: 2008-5885
Online ISSN: 2423-5369

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

مدیریت صنعتی

شاپا چـــاپـــی: ۲۰۰۸-۵۸۸۵
شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۳-۵۳۶۹

رویکرد دنپ فازی ــ تاپسیس فازی ــ مدل ریاضی دوهدفه برای مسئله انتخاب تأمین‌کننده سبز و تخصیص سفارش و حل آن با الگوریتم جست‌وجوی هارمونی

سارا امیرسلامی

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

سعید علائی *

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

چکیده

هدف: انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش از وظایف اصلی شرکت‌ها در مدیریت زنجیره تأمین سبز است. در اکثر مطالعات پیشین، این دو وظیفه به‌عنوان مسائل مستقل در نظر گرفته شده است. این مسئله، به‌خصوص 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 به‌صورت هم‌زمان در نظر گیرد و علاوه بر لحاظ‌کردن معیارهای مدیریت زنجیره تأمین سبز، میزان سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان را تعیین کند، ضروری است.

روش: رویکرد پیشنهادی شامل دنپ فازی، تاپسیس فازی و مدل بهینه‌سازی دوهدفه است. در مرحله اول با استفاده از دنپ فازی، وزن معیارها شامل معیارهای سنتی و سبز به‌دست آمد؛ سپس با استفاده از تاپسیس فازی، تأمین‌کنندگان ارزیابی شدند. برای تخصیص سفارش‌ها، یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه با اهداف کمینه‌کردن هزینه کل زنجیره تأمین و بیشینه‌سازی ارزش خرید کل فرموله شد. تابع هدف اول، قیمت خرید، هزینه‌های متغیر تأمین‌کنندگان، هزینه‌های سفارش‌دهی و راه‌اندازی، نگهداری خریدار و تأمین‌کنندگان را شامل می‌شود. همچنین تابع هدف دوم، تضمین می‌کند که سفارش بیشتری به تأمین‌کنندگانی تخصیص یابد که امتیاز بیشتری در فرایند ارزیابی تأمین‌کنندگان کسب کرده‌اند. محدودیت‌های مدل نیز عبارت‌اند از: ظرفیت تأمین‌کنندگان، تقاضای خریدار و محدودیت‌های مرتبط با تخفیف تأمین‌کنندگان. با توجه به دوهدفه بودن مدل ریاضی، از روش معیار جهانی استفاده شد تا مسئله دوهدفه، به مسئله تک‌هدفه تبدیل شود. مطابق با این روش، انحراف‌های نسبی اهداف، از مقادیر بهینه تک‌هدفه هر هدف کمینه‌سازی شد. همچنین با توجه به غیرخطی بودن مدل ریاضی الگوریتم فراابتکاری، جست‌وجوی هارمونی برای مسئله طراحی و برای مواجهه با محدودیت‌های مسئله، یک الگوریتم ترمیم پیشنهاد شد.

یافته‌ها: 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 تأمین‌کننده مهم‌ترین معیار است و بعد از آن کیفیت، خرید سبز، طراحی سبز، حمل‌ونقل سبز، تولید سبز، تحویل به‌موقع و فاصله در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین، تمامی معیارها روی اعتبار تأمین‌کننده تأثیرگذارند. سپس شش تأمین‌کننده با توجه به معیارها با استفاده از تاپسیس فازی ارزیابی شدند و امتیاز نهایی آن‌ها، به‌عنوان وزن‌های تأمین‌کنندگان در تابع هدف دوم مدل ریاضی استفاده شد. برای اعتبار سنجی رویکرد پیشنهادی، یک مطالعه موردی با داده‌های 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 پارتوی 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 ـ تاپسیس فازی ـ مدل ریاضی دوهدفه برای مسئله انتخاب تأمین‌کننده سبز و تخصیص سفارش و حل آن با الگوریتم جست‌وجوی هارمونی. *مدیریت صنعتی*، ۱۵(۴)، ۶۵۰- ۶۷۹.

مدیریت صنعتی، ۱۴۰۲، دوره ۱۵، شماره ۴، صص. ۶۵۰- ۶۷۹
ناشر: دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران
نوع مقاله: علمی پژوهشی

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

© نویسندگان

مقدمه

در دنیای رقابتی امروز، انتخاب تأمین‌کننده یکی از مسئله‌های حیاتی برای بخش خرید در یک شرکت است. انتخاب تأمین‌کنندگان 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 تأمین‌کننده همکاری می‌کنند تا هزینه‌ها، کیفیت و سایر فاکتورهای محصول را مدیریت کنند. به‌طور کلی مسئله انتخاب تأمین‌کننده، به‌خصوص در مدیریت زنجیرۀ تأمین سبز، نیازمند لحاظ‌کردن 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 تأمین‌کنندگان یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره پیچیده است، به‌خصوص زمانی که پارامترها غیرقطعی باشند. از سوی دیگر، مدیریت موجودی یکی از دیگر از بخش‌های مهم مدیریت زنجیرۀ تأمین است. تخصیص سفارش‌ها به تأمین‌کنندگان منتخب، امکان صرفه‌جویی در مقیاس را از طریق انتخاب صحیح مقادیر سفارش از هر تأمین‌کننده فراهم می‌کند. گاهی اوقات، تأمین‌کنندگان 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 تأمین‌کننده و تخصیص سفارش می‌شود (علائی و خوش الحان[1]، ۲۰۱۵).

در این مقاله یک مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش مورد بررسی قرار گرفته است که خریدار تأمین‌کنندگان 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[2]، تاپسیس فازی[3] و مدل بهینه‌سازی دوهدفه است. در مرحله اول با استفاده از دنپ فازی که ترکیبی از روش های فرایند تحلیل شبکه‌ای و تکنیک دیمتل است، وزن معیارها تعیین شده سپس با استفاده از تاپسیس فازی، تأمین‌کنندگان ارزیابی می‌شوند. در ارزیابی تأمین‌کنندگان معیارهای سبز در نظر گرفته شده، همچنین عدم قطعیت به‌صورت متغیرهای زبانی در ارزیابی اوزان معیارها و ارزیابی تأمین‌کنندگان در نظر گرفته شده است. در مرحله بعدی یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه غیرخطی با اهداف کمینه کردن هزینه کل زنجیرۀ تأمین و بیشینه‌سازی ارزش خرید کل فرموله می‌شود. برای مواجهه با مسئله دوهدفه، رویکرد سازشی برای کمینه‌کردن 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[4] 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 به‌صورت فردی یا گروهی باشد و خروجی آن وزن معیارهاست. مراحل و گام‌های اصلی این روش در ذیل آمده است (دینسر، یوکسل و مارتینز[1]، ۲۰۱۹؛ رضوی حاجی آقا، علائی، عموزاد مهدیرجی و یافتیان[2]، 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[3] (۲۰۱۱)

گام ۲. استخراج ماتریس اولیه ارتباط مستقیم فازی. پس از اندازه‌گیری رابطه بین معیارهای F_1، F_2، ...، 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_i و F_j است. در صورتی که از تصمیم‌گیری گروهی استفاده شود، دیدگاه تجمیعی K خبره به‌صورت 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.

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\tilde{F}_{ij}^{k} = \left(\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} l_{ij}^{k}, \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} m_{ij}^{k}, \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} u_{ij}^{k}\right)$$ رابطۀ 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 به‌صورت $\tilde{N} = [\tilde{n}_{ij}]_{n\times n}$ تعریف می‌شود که در آن هر درایه به‌صورت رابطۀ ۲ محاسبه می‌شود.

گام ٤. محاسبه ماتریس ارتباط کامل فازی به‌صورت رابطۀ ۳

$$\tilde{n}_{ij} = \tilde{d}_{ij} / \max_{1\le i\le n}\sum_{j=1}^{n} u_{ij}$$ رابطۀ ۲)

---

[1] Dinçer, Yüksel, & Martínez

[2] Razavi Hajiagha, Alaei, Amoozad Mahdiraji & Yaftiyan

[3] Dalalah, & Bataineh

رابطۀ ۳)

$$\tilde{T} = \left[\tilde{t}_{ij}\right]_{n\times n} = \lim_{p\to\infty}\left(\tilde{N} + \tilde{N}^{2} + \ldots + \tilde{N}^{p}\right)$$

گام ۵. دیفازی کردن ماتریس ارتباط کامل فازی. برای دیفازی کردن ماتریس فازی $\tilde{T}$ از روش چهار مرحله‌ای اوپریکویچ و تزنگ[1] (۲۰۰۳) استفاده می‌شود:

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

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

ج) محاسبه مقادیر نرمال دیفازی شده به‌صورت رابطۀ ۷؛

د) محاسبه مقادیر نهایی دیفازی شده به‌صورت رابطۀ ۸.

رابطۀ ۴)

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{\tilde{t}_{ij} - \min_{i} l_{ij}^{t}}{\max_{i} u_{ij}^{t} - \min_{i} l_{ij}^{t}}$$

رابطۀ ۵)

$$l_{ij}^{b} = \frac{m_{ij}^{x}}{1 + m_{ij}^{x} - l_{ij}^{x}}$$

رابطۀ ۶)

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

رابطۀ ۷)

$$c_{ij} = \frac{l_{ij}^{b}\left(1 - l_{ij}^{b}\right) + r_{ij}^{b} \times r_{ij}^{b}}{1 - l_{ij}^{b} + r_{ij}^{b}}$$

رابطۀ ۸)

$$z_{ij} = \min_{i} l_{ij}^{t} + c_{ij} \times \left(\max_{i} u_{ij}^{t} - \min_{i} l_{ij}^{t}\right)$$

گام ٦. تشکیل نمودار علت و معلولی با استفاده از $(R_i + C_j)$ به‌عنوان محور افقی و $(R_i - C_j)$ به‌عنوان محور عمودی. با توجه به ماتریس نهایی دیفازی شده $Z = \left[Z_{ij}\right]_{n\times n}$، 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 $R_i - C_j$ رابطۀ علّی 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 $Z = \left[z_{ij}\right]_{n\times n}$ که از گام ۵ حاصل شده است، ماتریس نرمال $N = \left[n_{ij}\right]_{n\times n}$ به‌صورت رابطۀ ۹ محاسبه می‌شود که در آن d_i مجموع سطر i ام است. سپس، سوپرماتریس وزنی W مطابق رابطۀ ۱۰ به‌صورت ترانهاده ماتریس نرمال شده به‌دست می‌آید.

---

[1] Opricovic, & Tzeng

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

رابطهٔ ۹)

$$W=\left[w_{ij}\right]_{n\times n}=\left(N\right)'$$

رابطهٔ ۱۰)

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

روش تاپسیس فازی

روش تاپسیس فازی توسط چن[1] (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 $\tilde{X}=\left[\tilde{x}_{ij}\right]_{m\times n}$ تشکیل می‌شود که شامل ارزیابی m گزینه نسبت به n معیار است. ارزیابی گزینه i در معیار j به‌صورت اعداد فازی مثلثی $\tilde{x}_{ij}=\left(a_{ij}\,,b_{ij},c_{ij}\right)$ تعریف می‌شود. در صورت استفاده از تصمیم‌گیری گروهی مشابه رابطهٔ 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)
نسبتا ضعیف (MP)	(۱, ۳, ۵)
متوسط (F)	(۳, ۵, ۷)
نسبتا 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 به‌صورت $\tilde{R}=\left[\tilde{r}_{ij}\right]_{m\times n}$ تعریف می‌شود. با فرض اینکه B و C به‌ترتیب مجموعه معیارهای از جنس سود و هزینه باشند، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

---

[1] Chen

رابطهٔ (۱۱)

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

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

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

گام ٤: تعیین راه‌حل ایدئال مثبت و منفی. با توجه به اینکه اعداد فازی مثلثی در بازه صفر و یک هستند. ایدئال مثبت و منفی به‌ترتیب به‌صورت $\tilde{v}_j^+ =$ (۱، ۱، ۱) و $\tilde{v}_j^- =$ (۰، ۰، ۰) برای هر معیار تعریف می‌شود.

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

رابطهٔ (۱۲)

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

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

رابطهٔ (۱۳)

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

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

گام ٦: محاسبه درجه نزدیکی به‌صورت رابطهٔ زیر و هر گزینه‌ای که بیشترین مقدار را داشته باشد، به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب می‌شود.

رابطهٔ (۱۴)

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}$$

پیشینهٔ تجربی پژوهش

مسئله انتخاب تأمین‌کننده 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 تأمین‌کننده و مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش به‌طور مختصر و با تأکید بر مطالعات سال‌های اخیر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

روش‌های چندمعیاره متعددی برای مسئله انتخاب تأمین‌کننده توسعه داده شده‌اند که اغلب به‌صورت ترکیبی از چند روش هستند که در مرحله تعیین وزن معیارها و مرحله ارزیابی تأمین‌کنندگان استفاده شده‌اند، از جمله: فرایند تحلیل شبکه‌ای و ویکور با معیارهای سبز (کو، سو و لی[1]، ۲۰۱۵)، دیمتل، فرایند تحلیل شبکه‌ای و تحلیل پوششی داده‌ها

---

1. Kuo, Hsu & Li

(رضایی سرای، ابراهیم نژاد و خلیلی[1]، ۲۰۱۶)، دیمتل، گسترش تابع کیفیت و کوپراس با معیارهای سبز (یزدانی، ترکایش و چترجی[2]، ۲۰۱۷)، پرومتی (عبدالله، چان و افشاری[3]، ۲۰۱۹)، تحلیل سلسله‌مراتبی، آراس و برنامه‌ریزی آرمانی چندگزینه‌ای (فو[4]، ۲۰۱۹)، بهترین ـ بدترین، دیمتل و ایداس (یزدانی و همکاران، ۲۰۲۰)، تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس در محیط فازی (جین، سینگ و آپادیای[5]، ۲۰۲۰)، مجموع وزنی ساده و فوکام در محیط عدم قطعیت (دورمیچت[6] و همکاران، ۲۰۲۱)، تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط فازی با معیارهای سبز (اسر[7]، ۲۰۲۲)، پرومتی ۲ (تانگ، ونگ و پو[8]، ۲۰۲۲)، بهترین ـ بدترین، واسپاس و کوپراس با معیارهای سبز (معصومی[9] و همکاران، ۲۰۲۲)، بهترین ـ بدترین، مولتی مورا و آنتروپی شانون در محیط فازی (شنگ[10] و همکاران، ۲۰۲۲)، تحلیل سلسله‌مراتبی، واسپاس و تحلیل پوششی داده‌ها در محیط فازی (نگوین[11] و همکاران، ۲۰۲۲)، بهترین ـ بدترین و تودیم در محیط فازی (رحمان[12] و همکاران، ۲۰۲۲)، بهترین ـ بدترین، تاپسیس و فوکام در محیط فازی (افراسیابی، توانا و دیکاپریو[13]، ۲۰۲۲)، تحلیل پوششی داده‌ها و شبکه عصبی مصنوعی (نظری شیرکوهی[14] و همکاران، ۲۰۲۳) و ایداس در محیط فازی (گونری و دوسی[15]، 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[16] 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[17] (۲۰۱۷) با در نظر گرفتن شاخص‌های زیست محیطی نیز از یک رویکرد ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس فاری برای ارزیابی تأمین‌کنندگان و از یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه برای تخصیص سفارش‌ها استفاده کرده‌اند. بابار و امین[18] (۲۰۱۸) این مسئله را با هدف بیشینه کردن اهداف زیست محیطی از یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه مبتنی بر گسترش تابع کیفیت فازی مطالعه کرده‌اند. محمد، هریس و گویندان[19] (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 اپسیلون برای شناسایی جواب‌های پارتو و در نهایت از روش تاپسیس برای انتخاب بهترین جواب استفاده کرده‌اند. هاشم زاهی[1] 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 تأمین کنندگان 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[2] و همکاران (۲۰۲۱) برای این مسئله یک رویکرد دو مرحله‌ای توسعه داده‌اند که در مرحله اول از بهترین ـ 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[3] (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 به‌صورت 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[4] (۲۰۲۲) نیز یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر بهترین ـ بدترین، تاپسیس و برنامه‌ریزی خطی توسعه داده‌اند. رویکرد بهترین ـ بدترین برای وزن‌دهی معیارها و تاپسیس برای رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان استفاده شده است. در نهایت از یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه خطی برای تخصیص سفارش‌ها بهره برده‌اند که سفارش‌ها را به‌صورت عادلانه با توجه به شاخص بخصوصی به تأمین‌کنندگان تخصیص دهد. گای[5] و همکاران (۲۰۲۳) یک رویکرد دو مرحله‌ای یکپارچه شامل تحلیل‌های کمی و کیفی برای این مسئله پیشنهاد داده‌اند که در مرحله اول، یک روش مولتی مورا مبتنی بر اعداد Z زبانی برای رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان سبز تحت معیارهای کیفی چندگانه استفاده می‌شود؛ در مرحله دوم، نتیجه رتبه‌بندی به‌عنوان ورودی به یک مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح غیرخطی دو هدفه داده می‌شود. شائو، بارنس و وو[6] (۲۰۲۳) این مسئله را با در نظر گرفتن اختلال عرضه در دوران کوید ۱۹ بررسی کرده است و شامل رویکرد ترکیبی آنتروپی، 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 Euchi
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.

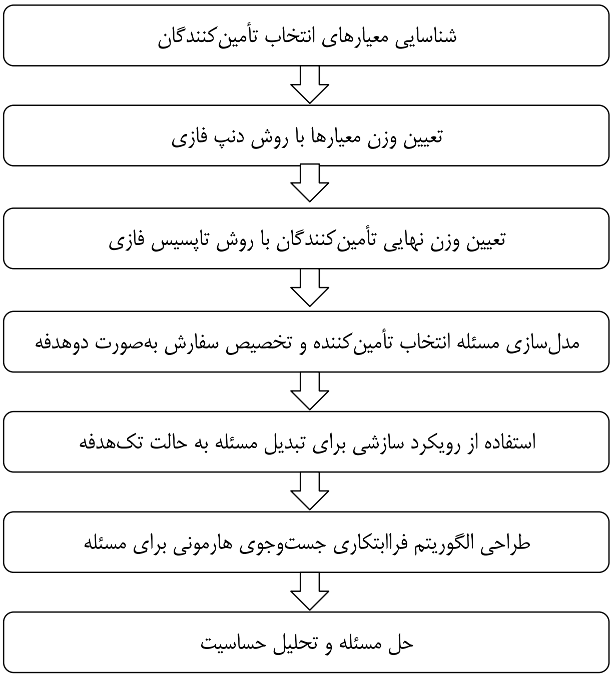
جدول ۳. خلاصه مقالات در زمینه مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش

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	–	مولتی مورا	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 تأمین‌کننده و تخصیص سفارش به‌صورت یک مسئله دوهدفه مدل‌سازی می‌شود. با توجه به غیرخطی بودن مدل، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برای حل مسئله طراحی شده و از رویکرد سازشی برای تبدیل مدل به حالت تک‌هدفه استفاده می‌شود تا انحرافات نسبی از جواب ایدئال هر هدف کمینه شود. در انتها نیز مسئله حل شده و نتایج تحلیل حساسیت ارائه می‌شود. شکل ۱ گام‌های اصلی تحقیق را نشان می‌دهد.


شناسایی معیارهای انتخاب تأمین‌کنندگان
تعیین وزن معیارها با روش دنپ فازی
تعیین وزن نهایی تأمین‌کنندگان با روش تاپسیس فازی
مدل‌سازی مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش به‌صورت دوهدفه
استفاده از رویکرد سازشی برای تبدیل مسئله به حالت تک‌هدفه
طراحی الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی هارمونی برای مسئله
حل مسئله و تحلیل حساسیت

شکل ۱. گام‌های اصلی پژوهش

مدل دوهدفه انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش

مفروضات اصلی مسئله شامل موارد ذیل است:

- مسئله به‌صورت تک‌محصولی در نظر گرفته شده است.
- خریدار می‌تواند مقدار موردنیاز را از تأمین‌کنندگان متعدد خریداری نماید.
- هر یک از تأمین کنندگان تخفیف مقداری برای مقادیر خرید پیشنهاد داده‌اند.
- تقاضای سالانه در طول زمان مشخص و ثابت است.
- کمبود موجودی برای خریدار و تأمین‌کنندگان مجاز نیست.

اندیس‌ها

I	اندیس تأمین‌کنندگان (از ۱ تا n)
K	اندیس بازه‌های تخفیف تأمین‌کننده i (از ۱ تا K_i)

پارامترها

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

متغیرهای تصمیم

q_{ik}	مقدار خریداری‌شده در هر دوره از تأمین‌کننده i در فاصله تخفیف k
y_{ik}	متغیر باینری برابر ۱ است اگر مقدار خرید در بازه تخفیف k ام تأمین‌کننده i قرار بگیرد، در غیر این صورت صفر.
Q	مقدار مجموع سفارش‌ها هر دوره از همه تأمین‌کنندگان $(Q = \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{K_i} q_{ik})$

در ادامه مدل ریاضی انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش به‌صورت یک مدل دوهدفه شامل کمینه‌سازی هزینه‌های سالانه زنجیرۀ تأمین و بیشینه‌سازی ارزش سالانه خرید ارائه می‌شود. مدل ریاضی مشابهی توسط کمالی، قمی و جولای[1] (۲۰۱۱) و علائی و خوش‌الحان[2] (۲۰۱۵) به‌صورت چهارهدفه ارائه شده است. مدل ریاضی دوهدفه مسئله به‌صورت زیر است.

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

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

---

[1] Kamali, Ghomi & Jolai

[2] Alaei & Khoshalhan

رابطهٔ ۱۷)
$$\frac{D}{Q}\sum_{k=1}^{k_i} q_{ik} \le P_i, \quad \forall i$$

رابطهٔ ۱۸)
$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{k_i} q_{ik} = Q$$

رابطهٔ ۱۹)
$$\sum_{k=1}^{K_i} y_{ik} \le 1, \quad \forall i$$

رابطهٔ ۲۰)
$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{K_i} y_{ik} \ge 1$$

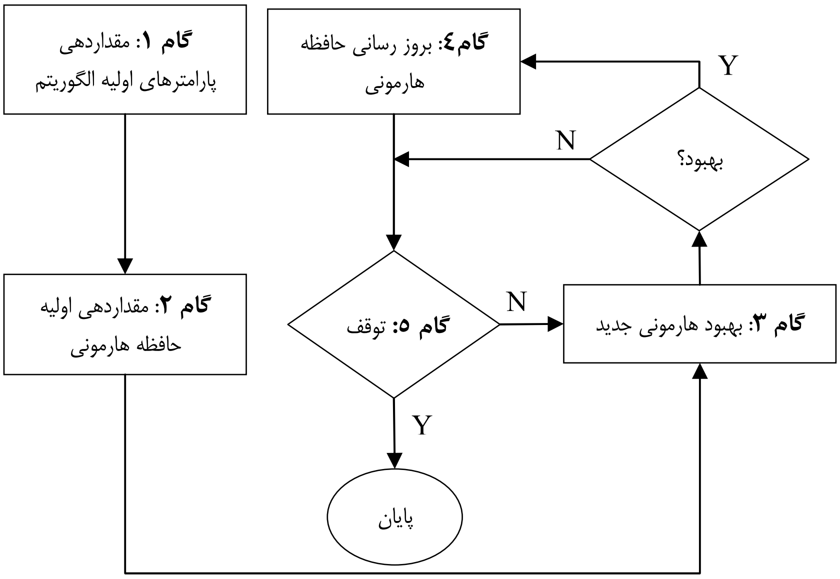
رابطهٔ ۲۱)
$$u_{i,k-1} y_{ik} \le q_{ik} \le u_{ik} y_{ik}, \quad \forall i,k$$

رابطهٔ ۲۲)
$$\begin{aligned} &Q \ge 0 \\ &q_{ik} \ge 0, \quad \forall i,k \\ &y_{ik} \in \{0,1\}, \quad \forall i,k \end{aligned}$$

رابطهٔ ۱۵ هزینه‌های سالانه کل زنجیرهٔ تأمین (تأمین‌کنندگان و خریدار) را کمینه می‌کند. این تابع هدف شامل سه بخش است که بخش اول مرتبط با هزینه‌های متغیر تأمین‌کنندگان و قیمت خرید خریدار؛ بخش دوم مرتبط با هزینه‌های سفارش‌دهی خریدار و راه‌اندازی تأمین‌کنندگان؛ و بخش سوم مرتبط با هزینه‌های نگهداری خریدار و تأمین‌کنندگان است. رابطهٔ ۱۶ ارزش سالانه خرید را بیشینه می‌کند. با توجه به اینکه w_i امتیاز نهایی تأمین‌کننده i در فرایند ارزیابی تأمین‌کنندگان است، بیشینه‌کردن حاصل‌ضرب w_i در مقدار سفارش از هر تأمین‌کننده تضمین می‌کند که سفارش بیشتری به تأمین‌کنندگانی تخصیص یابد که امتیاز بالاتری کسب کرده‌اند. رابطهٔ ۱۷ محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان را نشان می‌دهد. عبارت D/Q معادل تعداد سفارش‌هایی است که سالانه به هر تأمین‌کننده منتخب صادر می‌شود. حاصل‌ضرب تعداد سفارش‌ها در مقدار سفارش باید کمتر از ظرفیت سالانه آن تأمین‌کننده باشد. رابطهٔ ۱۸ نیز محدودیت تقاضای خریدار را نشان می‌دهد که باید مجموع خرید از تأمین‌کنندگان برابر مقدار سفارش هر دوره باشد. روابط ۱۹ و ۲۰ نیز محدودیت‌های مرتبط با تخفیف را اعمال می‌کنند. رابطهٔ ۱۹ تضمین می‌کند که سفارش به هر تأمین‌کننده می‌تواند حداکثر در یکی از بازه‌های تخفیف قرار گیرد. همچنین با توجه به رابطهٔ ۲۰ مقدار سفارش کل (Q) غیرصفر خواهد شد و محدودیت تقاضا برآورده می‌شود. رابطهٔ ۲۱ نیز قرارگیری مقدار خرید از هر تأمین‌کننده را در داخل بازه تخفیف تضمین می‌کند. رابطهٔ 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[1] (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 حافظهٔ 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.


گام ۱: مقداردهی پارامترهای اولیه الگوریتم
گام٤: بروز رسانی حافظه هارمونی
Y
N
بهبود؟
گام ۲: مقداردهی اولیه حافظه هارمونی
N
گام ۵: توقف
گام ۳: بهبود هارمونی جدید
Y
پایان

شکل ۲ گام‌های اصلی روش جست‌وجوی هارمونی

نمایش جواب و تولید جواب اولیه

حافظهٔ هارمونی مطابق رابطهٔ (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 حافظهٔ هارمونی درج می‌شود. برای تولید جواب اولیه و مقداردهی اولیه حافظهٔ هارمونی که در گام ۲ الگوریتم انجام می‌شود، نیز رویه‌ای به‌صورت ذیل طی می‌شود: برای هر تأمین‌کننده با احتمال ۵۰ درصد مقدار سفارش $Q_i =$ ۰ 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.

---

[1] Geem, Kim & Loganathan

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

رابطهٔ ۲۳)

$$HM = \begin{bmatrix} Q_1^1 & Q_2^1 & \cdots & Q_n^1 \\ Q_1^2 & Q_2^2 & \cdots & Q_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_1^{HMS} & Q_2^{HMS} & \cdots & Q_n^{HMS} \end{bmatrix}$$

تابع برازش الگوریتم و بروز رسانی حافظه

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

رابطهٔ ۲۴)

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

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

تولید هارمونی / جواب جدید

برای ایجاد یک هارمونی یا راه‌حل جدید در گام ۳ الگوریتم، سه عملگر شامل انتخاب از حافظه، تولید تصادفی و تنظیم گام استفاده می‌شود. روابط زیر نحوه تعیین جواب جدید را نشان می‌دهند.

رابطهٔ ۲۵)

$$Q_i' \leftarrow \begin{cases} Q_i' \in \left\{ Q_i^1, Q_i^2, \ldots, Q_i^{HMS} \right\} & w.p.\ HMCR \\ Q_i' = P_i \times rand & w.p.\ (1 - HMCR) \end{cases}$$

رابطهٔ ۲۶)

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

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

که در آن نرخ در نظر گرفتن حافظهٔ هارمونی (HMCR)، نرخ تنظیم گام (PAR)، پهنای باند فاصله (bw) پارامترهای الگوریتم هستند. مقدار جدید سفارش از هر تأمین‌کننده i، با احتمال HMCR از مقادیر موجود آن متغیر در حافظه به ارث برده می‌شود و با احتمال 1-HMCR به‌صورت 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، رابطهٔ ۱۷ یا محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان 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 رابطهٔ ۱۷ را می‌توان به‌صورت $\mathrm{DQ_i/Q} \leq \mathrm{P_i}$ بازنویسی کرد. در یک جواب نشدنی ۳ گروه تأمین‌کننده می‌تواند وجود داشته باشد، گروه ۱ یا تأمین‌کننده‌های غیرمنتخب که هیچ سفارشی به آن‌ها تخصیص داده نشده است؛ گروه ۲ که سفارش سالیانه 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 تأمین‌کنندگان گروه ۱ که قبلاً انتخاب نشده بودند، همچنان مقدار سفارش آن‌ها برابر صفر خواهد بود. برای این منظور ابتدا مقدار باقی‌مانده ظرفیت صرفاً برای تأمین‌کنندگان فعال به‌صورت $S_i = P_i - DQ_i/Q$ محاسبه می‌شود. در این صورت مقدار S_i برای تأمین‌کنندگان گروه ۲ و ۳ به‌ترتیب 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 به‌صورت (۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰) = (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) تولید شده است. با محاسبه مقدار ظرفیت باقی‌مانده داریم (۰، ۸۰۰، ۴۰۰، −۲۰۰) = S_i که نشان می‌دهد ظرفیت تأمین‌کننده ۱ نقض شده است و تأمین‌کنندگان ۲ و ۳ ظرفیت اضافی دارند. حال کافی است مقدار سفارش تأمین‌کننده ۱ به‌صورت $Q_1 = Q\,P_1/D$ = ۱۰۰۰×۱۰۰۰/۲۰۰۰ = ۵۰۰ قرار داده شود. همچنین مقدار ۲۰۰ واحد اضافی به نسبت ظرفیت باقی‌مانده تأمین‌کنندگان ۲ و ۳ به آن‌ها تخصیص یابد؛ یعنی ۶۶ واحد به تأمین‌کننده ۲ و ۱۳۴ واحد به تأمین‌کننده ۳. در نهایت مقادیر سفارش تأمین‌کننده برابر ۳۶۶ = ۶۶ + ۳۰۰ = Q_2 و ۲۳۴ = ۱۳۴ + ۱۰۰ = Q_3 خواهد شد و بردار جواب شدنی به‌صورت (۰، ۲۳۴، ۳۶۶، ۵۰۰) = (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) 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 به‌صورت 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 حافظهٔ هارمونی، نرخ در نظر گرفتن حافظهٔ هارمونی، نرخ تنظیم گام، پهنای باند فاصله و تعداد بداهه‌ها یا تعداد نسل‌ها. شرط توقف الگوریتم در گام ۵، معمولاً به‌صورت تعداد هارمونی‌های ایجاد شده تعریف می‌شود. تغییرنکردن بهترین هارمونی موجود در ماتریس حافظهٔ هارمونی نیز می‌تواند شرط توقف دیگری باشد. با تکرار پنج گام اصلی، الگوریتم به‌مرور 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 دنپ 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[1]، ۲۰۱۳؛ گویندان، خداوردی و وفادار نیکجو[2]، ۲۰۱۵؛ شرما، چندنا و بهارواج[3]، ۲۰۱۷)؛ خرید سبز، مرتبط با تناسب مواد با محیط زیست شامل قابلیت بازیافت و کاهش مواد خطرناک است (شرما، چندنا و بهارواج، ۲۰۱۷؛ گوش[4]، ۲۰۱۷؛ وانال[5] و همکاران، ۲۰۱۷)؛ تولید سبز، مرتبط با کاهش مواد اولیه خطرناک، تسهیل بازیافت، کاهش زباله و کاهش مصرف انرژی است (چین، تات و سلیمان[6]، ۲۰۱۵؛ شرما، چندنا و بهارواج، ۲۰۱۷؛ گوش، ۲۰۱۷) و حمل‌ونقل سبز با نحوه حمل‌ونقل محصول، به‌خصوص با روش‌هایی که آلایندگی کمتری ایجاد کنند، مرتبط می‌شود (چین، تات و سلیمان، ۲۰۱۵؛ شرما، چندنا و بهارواج، ۲۰۱۷؛ گوش، ۲۰۱۷). معیارهای نهایی شامل تحویل به‌موقع (C_1)، کیفیت (C_2)، فاصله (C_3)، اعتبار تأمین‌کننده (C_4)، طراحی سبز (C_5)، خرید سبز (C_6)، تولید سبز (C_7) و حمل‌ونقل سبز (C_8) است.

---

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

دنپ 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 به‌دست آمد. در مراحل بعدی، ماتریس ارتباط مستقیم نرمال و ماتریس ارتباط کامل فازی به‌ترتیب در جداول ۵ و ۶ محاسبه شده‌اند.

جدول ٤. ماتریس اولیه ارتباط مستقیم فازی (۱۰۰ ×)

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

جدول ٥. ماتریس نرمال ارتباط مستقیم فازی (۱۰۰ ×)

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

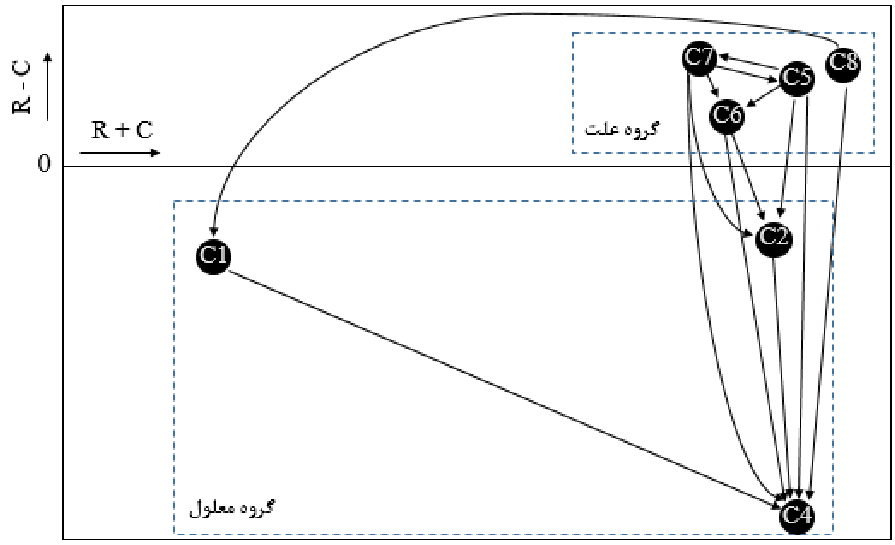
جدول ٦. ماتریس ارتباط کامل فازی (۱۰۰ ×)

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

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 ۰/۱۹۶ است و اگر به‌عنوان مقدار آستانه استفاده شود، ۵۰ درصد ارتباطات در نظر گرفته شده و ۵۰ درصد فیلتر می‌شوند. برای این منظور خبرگان مقدار آستانه را طوری تنظیم کردند که حدود ۲۰ درصد کل روابط انتخاب شده و باقی فیلتر شوند، بنابراین مقدار آستانه برابر ۰/۲۸ 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 حمل‌ونقل سبز (C_8) با مقادیر مثبت (R – C) معیارهای علت هستند و تحویل به‌موقع (C_1)، کیفیت (C_2)، و اعتبار تأمین‌کننده (C_4) با مقادیر منفی (R – C) معیارهای معلول هستند. همچنین تمامی معیارها روی اعتبار تأمین‌کننده (C_4) تأثیرگذار هستند.

جدول ۷. ماتریس ارتباط کامل دیفازی شده

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	R_i+C_i	R_i-C_i
C1	۰/۰۹۹	۰/۱۱۷	۰/۰۳۳	۰/۲۸۴	۰/۱۰۱	۰/۱۱۱	۰/۱۰۱	۰/۲۰۷	۲/۴۷	−۰/۳۶
C2	۰/۱۴۴	۰/۱۸۵	۰/۰۴۲	۰/۳۶۵	۰/۲۴۵	۰/۲۴۵	۰/۲۰۰	۰/۲۰۳	۳/۵۴	−۰/۲۸
C3	۰/۲۱۲	۰/۱۰۷	۰/۰۲۹	۰/۱۶۴	۰/۱۱۳	۰/۱۱۲	۰/۰۹۶	۰/۲۴۰	۱/۴۲	۰/۷۲
C4	۰/۱۹۸	۰/۲۲۶	۰/۰۳۲	۰/۱۵۴	۰/۱۴۳	۰/۱۴۵	۰/۱۱۱	۰/۱۱۰	۳/۵۸	−۱/۳۴
C5	۰/۱۶۲	۰/۳۴۴	۰/۰۴۷	۰/۳۷۴	۰/۱۹۰	۰/۲۹۰	۰/۲۹۷	۰/۲۵۴	۳/۵۹	۰/۳۳
C6	۰/۱۵۲	۰/۳۲۱	۰/۰۴۵	۰/۳۴۹	۰/۲۷۸	۰/۱۷۷	۰/۲۷۶	۰/۲۲۱	۳/۴۶	۰/۱۸
C7	۰/۱۵۸	۰/۳۴۷	۰/۰۴۶	۰/۳۷۰	۰/۲۸۴	۰/۲۹۳	۰/۱۶۹	۰/۲۳۹	۳/۴۱	۰/۴۰
C8	۰/۲۹۱	۰/۲۶۶	۰/۰۷۴	۰/۳۹۷	۰/۲۷۹	۰/۲۶۸	۰/۲۵۵	۰/۱۷۴	۳/۶۵	۰/۳۶



شکل ۳. نمودار علی معلولی معیارها

در گام بعدی سوپرماتریس وزنی مطابق جدول ۸ به‌دست می‌آید و در نهایت با ضرب این ماتریس در خودش به‌صورت مکرر، وزن نهایی معیارها مطابق جدول ۹ حاصل می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود، اعتبار تأمین‌کننده مهم‌ترین معیار با وزن ۰/۱۹۵ است و بعد از آن کیفیت، خرید سبز، طراحی سبز، حمل‌ونقل سبز، تولید سبز، تحویل به‌موقع و فاصله در رتبه‌های بعدی هستند.

جدول ۸. سوپرماتریس وزنی معیارها

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

جدول ۹. وزن نهایی معیارها

معیار	وزن نهایی
تحویل به‌موقع (C_1)	۰/۱۱۴
کیفیت (C_2)	۰/۱۵۷
فاصله (C_3)	۰/۰۲۸
اعتبار تأمین‌کننده (C_4)	۰/۱۹۵
طراحی سبز (C_5)	۰/۱۳۰
خرید سبز (C_6)	۰/۱۳۱
تولید سبز (C_7)	۰/۱۱۸
حمل‌ونقل سبز (C_8)	۰/۱۲۶

تاپسیس فازی برای تعیین امتیاز تأمین‌کنندگان

ابتدا نتیجه ارزیابی گروهی شامل سه خبره برای تأمین‌کنندگان استخراج شد، سپس با استفاده از متغیر زبانی و اعداد فازی مثلثی مربوط به آن‌ها در جدول ۲، ماتریس تصمیم فازی مطابق جدول ۱۰ به‌دست آمد. در مراحل بعدی، ماتریس تصمیم نرمال شده و ماتریس تصمیم نرمال وزنی به‌ترتیب 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 به‌عنوان بهترین گزینه است و گزینه‌های A6، A5، A3، A4 و A2 به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

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

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

جدول ۱۱. ماتریس تصمیم نرمال (۱۰۰ ×)

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

جدول ۱۲. ماتریس تصمیم نرمال وزنی (۱۰۰ ×)

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

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

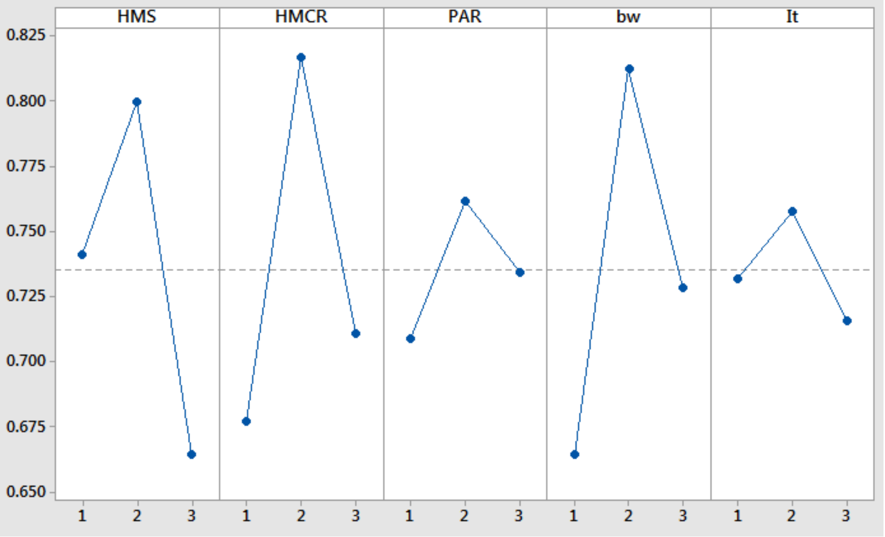
تنظیم پارامترهای الگوریتم جست‌وجوی هارمونی

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 دوهدفه 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 وزین ساده استفاده شد و امتیاز نهایی برای هر آزمایش با در نظر گرفتن وزن یکسان برای هر ۳ شاخص محاسبه شد.

جدول ۱٤. سطوح پارامترهای الگوریتم

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
اندازه حافظهٔ هارمونی (HMS)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
نرخ در نظر گرفتن حافظهٔ 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 به‌صورت زیر مقداردهی می‌شوند: اندازه حافظهٔ هارمونی (۱۰۰)، نرخ در نظر گرفتن حافظهٔ هارمونی (۰/۵)، نرخ تنظیم گام (۰/۵)، پهنای باند فاصله (۵۰) و تعداد تکرارها (۳۰۰۰۰).



شکل ٤. خروجی نرم افزار MiniTab برای تنظیم پارامترها

حل مسئله دو هدفه انتخاب تأمین‌کننده 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 تأمین‌کننده خریداری کند. وزن‌های تأمین‌کنندگان در تابع هدف ارزش خرید سالانه با توجه به ارزیابی تأمین‌کنندگان در مراحل قبلی به‌دست آمده‌اند و خروجی روش تاپسیس فازی هستند. اطلاعات تأمین‌کنندگان در جداول ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۱۵. اطلاعات تأمین‌کنندگان

پارامتر	تأمین‌کننده					
	۱	۲	۳	٤	٥	٦
S_i	۱۹۰۰۰	۱۷۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۸۰۰۰	۱۶۰۰۰
A_i	۲۰۰۰۰	۱۸۰۰۰	۱۷۰۰۰	۲۳۰۰۰	۲۰۰۰۰	۱۹۰۰۰
z_i	۳۲۵	۲۹۵	۲۹۰	۳۰۰	۲۹۰	۳۲۰
h_i	۱۲۰	۱۱۰	۹۰	۸۰	۱۰۰	۱۳۰
P_i	۳۵۰۰	۴۱۰۰	۳۰۰۰	۲۵۰۰	۳۲۰۰	۲۸۰۰
w_i	۰/۰۸۶۲	۰/۰۶۴۶	۰/۰۷۱۶	۰/۰۶۵۹	۰/۰۷۴۹	۰/۰۸۱۲

جدول ۱٦. تخفیف قیمت پیشنهادی از طرف تأمین‌کنندگان

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

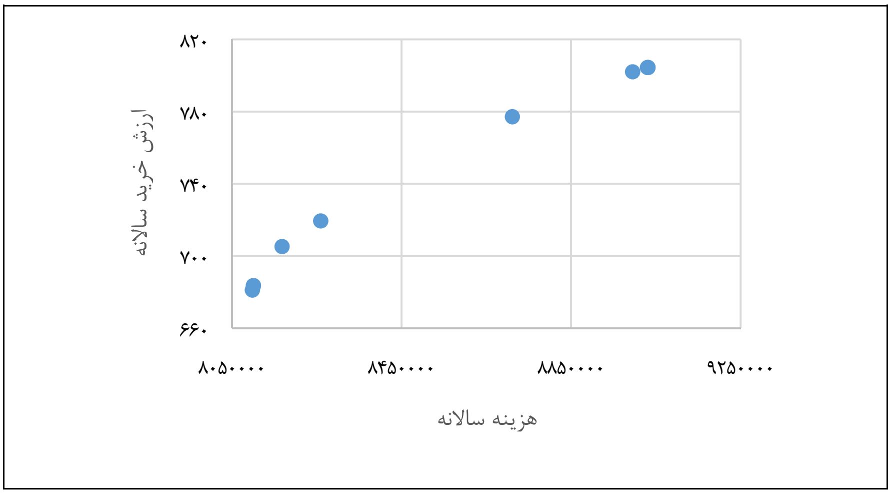
الگوریتم جست‌وجوی هارمونی در نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۷ پیاده‌سازی شد و پارامترهای آن مطابق با خروجی نرم افزار مینی‌تب مقداردهی شدند. همچنین، ابتدا مقادیر توابع بهینه هر یک از اهداف محاسبه شدند: مقدار بهینه تابع هدف هزینه کل سالانه معادل ۸۰۹۸۴۳۰ = Z_1^* به‌دست آمد که در آن مقادیر سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان ۱ تا ۶ به‌ترتیب برابر ۰، ۳۲۸۲، ۷۶۵، ۲۰۰۲، ۱۹۵۹ و ۰ است؛ همچنین مقدار بهینه تابع هدف ارزش خرید سالانه معادل ۸۰۴/۵۴ = Z_2^* به‌دست آمد که در آن مقادیر سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان ۱ تا ۶ به‌ترتیب برابر ۳۵۰۰، ۰، 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

همان طور که قبلاً اشاره شد، با تغییر اوزان توابع هدف می‌توان جواب‌های پارتوی مسئله را شناسایی کرد. در بخش قبلی جواب مسئله به ازای ۱ = λ، ۰ = λ و ۰/۷ = λ 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 برازش، مقادیر توابع هدف و سفارش‌های تخصیص یافته به تأمین‌کنندگان مشخص شده است. با توجه به ردیف اول جدول ۱۷ که معادل با ۰ = λ 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 همان طور 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

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



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 دو هدفه در نرم افزار گمز کدنویسی شده و با تنظیم خطای نسبی برابر صفر، از حل‌کننده بارون[1] استفاده شده است. مشابه با الگوریتم پیشنهادی، از رویکرد معیار جهانی مطابق با رابطهٔ (۲۴) استفاده شده و جواب‌های مسئله به ازای مقادیر مختلف λ به‌دست آمدند. جدول ۱۸ نتایج مقایسه‌ای را نشان می‌دهد. همان طور که از نتایج مشخص است، الگوریتم فراابتکاری به ازای تمامی مقادیر λ مجموع انحرافات نسبی (Z) بهتری را حاصل کرده است.

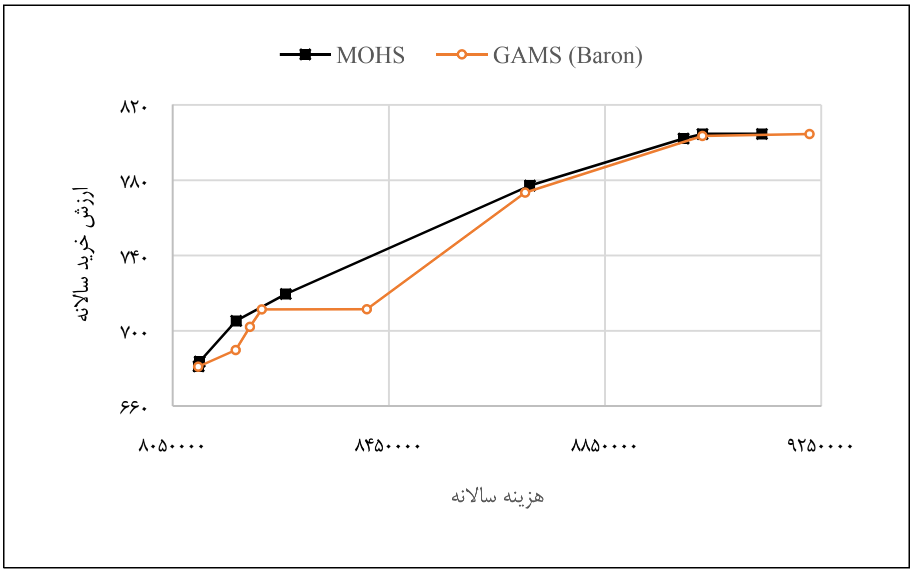
---

[1] Baron

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

	جواب الگوریتم فراابتکاری			جواب گمز (سالور Baron)		
λ	Z	Z_1	Z_2	Z	Z_1	Z_2
۰	۰	۹۱۴۰۳۱۰	۸۰۴/۵۴	۰	۱۳۳۲۲۳۱۰	۸۰۴/۵۴
۰/۱	۰/۰۱۱۵	۹۰۳۱۳۰۰	۸۰۴/۵۲	۰/۰۵۳۲	۸۸۷۹۷۰۶	۷۶۵/۵۲
۰/۲	۰/۰۲۳۰	۹۰۳۰۹۰۰	۸۰۴/۵۱	۰/۰۲۴۱	۹۰۳۰۱۴۱	۸۰۳/۴۵
۰/۳	۰/۰۳۴۵	۹۰۳۰۳۰۰	۸۰۴/۵۱	۰/۰۴۱۸	۹۲۲۸۲۵۰	۸۰۴/۵۴
۰/۴	۰/۰۴۶۱	۸۹۹۵۳۰۰	۸۰۲/۱۲	۰/۰۴۸۶	۹۰۵۸۵۴۸	۸۰۲/۹۳
۰/۵	۰/۰۵۴۹	۸۷۱۱۳۰۰	۷۷۷/۱۳	۰/۰۵۶۶	۸۷۰۲۵۱۹	۷۷۳/۴۲
۰/۶	۰/۰۵۴۲	۸۲۵۹۷۰۰	۷۱۹/۵۲	۰/۰۵۵۰	۸۲۱۵۴۲۳	۷۱۱/۳۱
۰/۷	۰/۰۴۳۰	۸۱۶۸۱۰۰	۷۰۵/۲۹	۰/۰۴۶۴	۸۱۹۳۳۲۱	۷۰۲/۰۳
۰/۸	۰/۰۳۰۲	۸۱۰۰۵۳۸	۶۸۳/۶۲	۰/۰۳۵۳	۸۱۶۷۱۶۶	۶۸۹/۷۵
۰/۹	۰/۰۱۵۳	۸۱۰۰۵۳۸	۶۸۳/۶۲	۰/۰۴۶۲	۸۴۰۹۶۹۱	۷۱۱/۴۱
۱	۰	۸۰۹۸۴۳۰	۶۸۱/۱۳	۰	۸۰۹۷۸۷۱	۶۸۰/۸۹

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 به‌ترتیب ۸ و ۵ جواب از ۱۳ جواب پارتو خواهد بود.



شکل ٦. مقایسه مرز پارتوی حاصل از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی و گمز

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله، از یک رویکرد پیشنهادی شامل دنپ 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 دنپ 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 صرفا برای حل یک مسئله استفاده شدند. برای مقاسه 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., & Euchi, 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.