

بهینه‌سازی انتخاب تأمین‌کنندگان پایدار و تخصیص سفارش با استفاده از رویکرد ترکیبی برنامه‌ریزی ریاضی و

یادگیری ماشین

عباس فروزان‌فر

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
forouzanfar.abbas@ie.sharif.edu

مریم رادمان^۱

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
radman@sharif.edu

چکیده

در این پژوهش، یک رویکرد جدید ترکیبی سه مرحله‌ای برای انتخاب تأمین‌کنندگان پایدار و تخصیص سفارش به آن‌ها ارائه شده است. در این سه مرحله به ترتیب، از یک روش تاپسیس خاکستری برای ارزیابی اولیه تأمین‌کنندگان از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی، از یک مدل یادگیری ماشین مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان برای محاسبه امتیاز نهایی پایداری تأمین‌کنندگان و از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه به منظور انتخاب تأمین‌کنندگان نهایی و تعیین مقدار بهینه سفارش به آن‌ها، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مدل یادگیری ماشین علاوه بر روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، منجر به بهبود ۱.۷۶٪ در مقدار تابع هدف آرمانی شده است. همچنین پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی بر روی یک مطالعه موردی در صنعت پلاستیک، نسبت به چهار سیاست فعلی شرکت، به‌طور میانگین، موجب بهبود ۰.۶۷٪ در هدف پایداری تأمین، ۵.۵۷٪ در هدف هزینه‌های عملیاتی و ۲.۹٪ در هدف محیط‌زیستی و در مجموع، ۵.۶۱٪ بهبود در مقدار تابع هدف آرمانی شده است.

کلمات کلیدی: انتخاب تأمین‌کننده، تخصیص سفارش، تصمیم‌گیری چند معیاره، یادگیری ماشین، تاپسیس خاکستری.

Optimizing sustainable supplier selection and order allocation using an integrated mathematical programming and machine learning approach

A. Forouzanfar, forouzanfar.abbas@ie.sharif.edu

M.Sc. degree, Department of Industrial Engineering, Sharif university of technology, Tehran, Iran

M. Radman, (corresponding author), radman@sharif.edu

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, sharif university of technology, Tehran, Iran

Abstract

This study presents a novel three-phase hybrid approach for sustainable supplier selection and order allocation, integrating Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), machine learning, and mathematical programming techniques. In the first phase, the Grey-TOPSIS method is employed to evaluate suppliers based on economic, environmental, and social criteria, effectively handling uncertainty in expert judgments. In the second phase, a machine learning model based on Support Vector Regression (SVR) is developed to calculate suppliers' final sustainability scores. This model enhances consistency and scalability by leveraging the initial evaluations and learning from historical data. In the third phase, the predicted scores are incorporated into a multi-objective mixed-integer programming model to determine the optimal supplier

^۱ نویسنده مسئول

selection and order allocation. The model considers practical constraints such as supplier capacity, transportation modes, and risk mitigation through order splitting. The key innovation of this study is the sequential integration of these three important techniques for the first time. With the SVR method, once new suppliers are introduced, it is not necessary to re-apply the MCDM method, as the SVR model learned can predict sustainability scores. Additional innovations include the application of uncertainty through grey number theory in the initial phase and the possibility of obtaining financial support, as well as the need to limit the supply of each good from each supplier to reduce risk in the mathematical model during the third phase. To validate the proposed approach, two evaluations were conducted. First, the impact of the SVR model was assessed by comparing the results with a scenario using only Grey-TOPSIS scores. Incorporating SVR led to a 1.76% improvement in the weighted goal programming objective. Second, the proposed model was compared with four company-specific policies reflecting current operational practices. The results showed average improvements of 0.67% in sustainable procurement, 5.57% in operational cost, and 2.9% in environmental cost, resulting in an overall 5.61% enhancement in the weighted objective function. These findings demonstrate the practical effectiveness of the proposed framework in delivering balanced sustainability outcomes in real-world supply chain decision-making.

Keywords: Supplier selection, Order allocation, Multi-criteria decision making, Machine learning, Grey TOPSIS.

Introduction

Supplier selection and order allocation are critical tasks in supply chain management. Sustainable procurement has become a priority for organizations aiming to minimize environmental impacts while maximizing economic and social benefits. For instance, Walmart's 2010 initiative to reduce carbon emissions from its suppliers by 20 million tons demonstrates the significance of supplier sustainability. Traditional approaches to supplier selection often focused on cost, delivery time, and quality without considering environmental and social factors. These methods lacked adaptability for modern, complex, and globalized supply chains. While MCDM techniques have been widely used for supplier evaluation, they face challenges such as inconsistency in expert opinions, time constraints, and uncertainty. Machine learning methods, leveraging large datasets, address these limitations and improve decision-making. Mathematical modeling is also employed for optimal order allocation following supplier selection. Integrated approaches promise more accurate evaluations and adaptability to dynamic supply chain conditions.

This study introduces a novel three-phase approach that integrates an MCDM method, a machine learning technique, and a mathematical programming model. First a grey-TOPSIS method evaluates suppliers under uncertainty, then an SVR technique predicts sustainability scores, and finally a multi-objective mixed-integer programming model determines optimal suppliers and order allocation. The proposed approach addresses both qualitative and quantitative aspects of supplier selection and order allocation.

Methodology

This study adopts a three-phase approach to address supplier selection and order allocation challenges:

- **Phase 1 – Grey-TOPSIS for Supplier Evaluation:**
- Suppliers are initially evaluated based on economic, environmental, and social criteria identified through literature review and expert input. Grey-TOPSIS is used to manage uncertainty and imprecision in expert judgments, enabling a more reliable assessment under real-world conditions.
- **Phase 2 – SVR for Predicting Sustainability Scores:**
- A Support Vector Regression (SVR) model is trained using supplier evaluation metrics as inputs and the Phase 1 sustainability scores as outputs. This allows for predicting scores of new suppliers without repeating the MCDM process, enhancing consistency, scalability, and adaptability to dynamic supplier data.

- **Phase 3 – Multi-Objective Optimization:**

- The predicted scores are integrated into a multi-objective mixed-integer programming model. The model optimizes supplier selection and order allocation by considering financial, transportation, and risk-related constraints, including supplier capacity limits. Objective functions include maximizing sustainability, minimizing operational costs, and reducing CO₂ emissions. A weighted goal programming method is used to balance these competing objectives.

Results

The proposed framework was applied to a case study involving four raw materials, 10 suppliers, three plants, two vehicle types, and a 12-month planning horizon. Some results are as follows:

- Criteria weights were calculated using Analytical Hierarchy Process (AHP) with pairwise comparisons by experts, ensuring consistency ratios below 0.1. The highest weight was assigned to the defect rate criterion due to its critical impact on product quality. Grey-TOPSIS identified significant variability in suppliers' sustainability performance.
- In the SVR model, Ilam Petrochemical achieved the highest score but was excluded from the optimization phase due to additional constraints, such as capacity and transportation costs.
- Considering the minimization of both transportation costs and carbon emissions, flatbed trucks, which have a lower load-carrying capacity, were selected to transport a larger volume of raw materials.
- Increasing the budget reduced operational costs but did not affect the other objective functions.
- Increasing the number of suppliers required to supply polypropylene, one of the strategic raw materials for the plants, generally reduced shortages but increased transportation costs.
- The proposed model was validated through two evaluations. First, incorporating SVR led to a 1.76% improvement in the weighted goal programming objective compared to using only Grey-TOPSIS scores. Second, when benchmarked against four existing company policies, the model achieved average improvements of 0.67% in sustainable procurement, 5.57% in operational cost, and 2.9% in environmental impact—resulting in a 5.61% overall enhancement.

Conclusion

This study proposes a three-phase framework for sustainable supplier selection and order allocation by integrating MCDM, machine learning (SVR), and multi-objective mathematical programming. The use of grey-TOPSIS and SVR addresses the limitations of traditional MCDM methods, improving scalability and consistency in supplier evaluation. The final optimization phase incorporates practical constraints such as budget limits, transport modes, and supplier capacities, enhancing real-world applicability. Validation through a real case study showed that SVR improved the weighted objective by 1.76% compared to using Grey-TOPSIS alone. The proposed model also outperformed four current company policies with average improvements of 0.67% in sustainable procurement, 5.57% in operational costs, and 2.9% in environmental performance—resulting in a 5.61% overall gain. These results confirm the model's effectiveness in delivering balanced and practical solutions for complex supply chain decisions. Future research may explore incorporating uncertainty, hybrid MCDM approaches, and advanced machine learning techniques to further strengthen the framework.

۱. مقدمه

انتخاب تامین کنندگان و تخصیص سفارش یکی از حیاتی ترین وظایف در مدیریت زنجیره تامین است^[۱]. در بازارهای رقابتی امروز، شرکت ها بیش از پیش به همکاری با تامین کنندگان متعدد برای پاسخگویی مؤثر به نیازهای مشتریان وابسته اند^[۲]. عقد قرارداد و کار با تامین کنندگان مناسب نیز یکی از مهم ترین و پیچیده ترین تصمیمات استراتژیک برای سازمان ها محسوب می شود^[۳]. انتخاب تامین کنندگان در سازمان ها مستقیماً بر مواردی مانند مدیریت کیفیت جامع، فرآیند خرید^[۴]، کیفیت محصول نهایی^[۵]، رقابت پذیری و رضایت مشتری^[۶]، مدیریت موجودی، برنامه ریزی و کنترل تولید، تاثیرگذار است. شرکت ها و سازمان های مختلف، خرید پایدار را

به عنوان یک فرایند مهم مدیریت زنجیره تامین پایدار محسوب می کنند. به عنوان مثال، در سال ۲۰۱۰، شرکت *Walmart* به تامین کنندگان عمده خود اطلاع داد که باید در پنج سال آینده انتشار کربن خود را ۲۰ میلیون تن کاهش دهند. این نشان می دهد که یا تامین کنندگان باید پایداری خود را بهبود بخشند یا سازمان خریدار آن ها ممکن است به تامین کنندگانی روی آورد که در این زمینه صلاحیت بیشتری دارند. انتخاب تامین کنندگان پایدار، یک فرآیند تصمیم گیری چند معیاره پیچیده است که هر دو دسته عوامل کیفی و کمی را در بر دارد^[۷]. این پیچیدگی ناشی از عوامل غیرقابل پیش بینی است که ممکن است در تضاد با یکدیگر باشند. در پژوهش های ابتدایی در حوزه انتخاب تامین کنندگان و تخصیص سفارش، اثرات و مسائل زیست محیطی در نظر گرفته نمی شد و به جای آن، تمرکز اصلی بر روی هزینه مواد، زمان تحویل و کیفیت آن ها بود. مهم ترین روش مورد استفاده در این پژوهش ها، رویکرد تصمیم گیری چند معیاره بوده است. اگرچه که این رویکردها نسبت به فرآیندهای سنتی انتخاب تامین کنندگان از مقیاس پذیری بیشتری برخوردار هستند، اما در مسائل بزرگ با تعداد زیاد تامین کنندگان و معیارهای انتخاب، با چالش هایی مانند محدودیت های زمانی در جمع آوری نظرات خبرگان، وجود ناسازگاری و عدم قطعیت در نظرات آن ها، مواجه هستند. با جهانی شدن روزافزون زنجیره های تامین، رویکردهایی که بر حجم بالایی از داده ها متکی هستند، مانند یادگیری ماشین^۱، برای حل مساله انتخاب تامین کنندگان استفاده و با رویکردهای تصمیم گیری چند معیاره ترکیب شده اند^[۸]. همچنین، یکی دیگر از دلایل مهم این ترکیب، وجود ناسازگاری در نظرات خبرگان در تصمیم گیری در ابعاد بالا با استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره است که می توان با استفاده از روش های یادگیری ماشین آن را تعدیل کرد. پس از انتخاب تامین کنندگان، استفاده از روش های مدل سازی ریاضی برای تخصیص بهینه سفارش به آن ها متداول است. با توجه به توضیحات بیان شده، در سالیان اخیر، استفاده از رویکردهای ترکیبی برای انتخاب تامین کنندگان و تخصیص بهینه سفارش به آن ها مورد توجه فراوان پژوهشگران قرار گرفته است.

در این پژوهش، برای اولین بار از یک رویکرد سه مرحله ای با ترکیب یک روش تصمیم گیری چند معیاره، یک روش یادگیری ماشین و برنامه ریزی ریاضی برای حل مساله انتخاب تامین کنندگان و تخصیص سفارش به آن ها استفاده شده است. تا جایی که نویسندگان بررسی کرده اند، ترکیب این سه ابزار که مزایای فراوانی را دارد، پیش تر در هیچ پژوهشی مورد بررسی قرار نگرفته است. در مرحله اول با استفاده از یک روش تصمیم گیری گروهی تحت شرایط عدم قطعیت به نام تاپسیس خاکستری^۲، امتیاز اولیه پایداری تامین کنندگان محاسبه می شود. به این منظور، از سه دسته معیارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی استفاده شده است. سپس در مرحله دوم، با استفاده از روش رگرسیون بردار پشتیبان (*SVR*)^۳، مدلی برای یادگیری نتایج تصمیم گیری، آموزش داده می شود تا به کمک آن بتوان امتیاز نهایی پایداری تامین کنندگان را محاسبه کرد. در مرحله سوم، با دریافت خروجی های مدل آموزش داده شده، از یک مدل برنامه ریزی ریاضی چند هدفه به منظور انتخاب نهایی تامین کنندگان و تخصیص بهینه سفارش به آن ها استفاده شده است. مدل ارایه شده، یک مدل چند کالایی و چند دوره ای با در نظر گرفتن امکان اخذ تسهیلات بانکی و انتخاب نوع وسیله حمل و نقل است. برای حل مدل ریاضی چند هدفه از روش برنامه ریزی آرمانی استفاده شده است.

مهم ترین مزیت رویکرد ارایه شده این است که با آموزش روش یادگیری ماشین *SVR*، با استفاده از نتایج حاصل از روش تاپسیس خاکستری در ابعاد کوچکتر، می توان با اضافه شدن تامین کنندگان جدید، از نتایج پیش بینی مدل آموزش دیده استفاده کرد. به این ترتیب، دیگری نیازی به پیاده سازی مجدد روش تصمیم گیری چند معیاره بر روی مسائل با تعداد زیاد تامین کنندگان نیست. بنابراین می توان چالش محدودیت زمانی جمع آوری مجدد نظرات خبرگان و ناسازگاری آن ها را در ابعاد بالا برطرف کرد. مزیت بعدی رویکرد سه مرحله ای ارایه شده، این است که نیازی به انتخاب نهایی تامین کنندگان در دو مرحله اول نیست. خروجی این دو مرحله، امتیاز پایداری تامین کنندگان است که وارد مدل ریاضی در مرحله سوم می شود. در این مرحله، با در نظر گرفتن سایر ملاحظات مانند هزینه های جابه جایی کالاهای تامین کنندگان و قیمت فروش آن ها، تصمیم نهایی انتخاب تامین کنندگان برای تامین کالاها و تخصیص بهینه سفارش به آن ها انجام می شود. لازم به ذکر است که در نظر گرفتن این ملاحظات به صورت معیارهای انتخاب در مرحله اول،

دارای معایبی است که از آن جمله می‌توان به زیاد شدن تعداد معیارها و عدم امکان تخصیص یک نوع کالا به چند تامین‌کننده اشاره کرد.

سایر نوآوری‌های پژوهش شامل مدل‌سازی عدم قطعیت به شکل اعداد خاکستری در مرحله اول و ادغام آن با یک مدل یادگیری ماشین، لحاظ محدودیت‌های کاربردی مانند امکان اخذ تسهیلات بانکی، ضرورت تامین یک حداقل و حداکثر تعداد کالا از هر نوع ماده اولیه توسط هر تامین‌کننده و در نظر گرفتن تعداد خاصی تامین‌کننده برای هر ماده اولیه در مدل ریاضی مرحله سوم است.

در ادامه و در بخش دوم، ادبیات مربوط به موضوع مرور می‌شود. در بخش سوم، بیان مساله انجام می‌شود و چارچوب پیشنهادی برای محاسبه امتیاز تامین‌کنندگان با استفاده از رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره و یادگیری ماشین تشریح می‌شود. در بخش چهارم مدل ریاضی ارائه شده برای انتخاب تامین‌کنندگان بر مبنای امتیاز پایداری محاسبه شده در مرحله قبل و تعیین میزان بهینه سفارش به آن‌ها ارائه می‌شود. در بخش پنجم نتایج محاسباتی شامل اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی و مطالعه موردی بیان می‌شود. در بخش ششم تحلیل حساسیت بر روی نتایج انجام می‌شود. در نهایت، در بخش هفتم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از پژوهش ارائه می‌شود.

۲. پیشینه پژوهش

در این بخش، پژوهش‌های انجام شده در دو بخش (۱) انتخاب تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و (۲) ترکیب هوش مصنوعی با این حوزه بررسی می‌شوند.

۱.۲. انتخاب تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

گسترش پژوهش در مورد انتخاب تامین‌کنندگان را می‌توان مربوط به دهه ۱۹۶۰ میلادی دانست که توسط دیکسون^[۹]، ۲۳ معیار مختلف برای ارزیابی تامین‌کنندگان جمع‌آوری شد. نیدیک و همکاران^[۴] از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)^۴ استفاده کردند تا بتوانند یک ساختار برای انتخاب تامین‌کنندگان برای هر سازمان بوجود آورند. با توجه به وجود فاکتورهای متعدد برای ارزیابی تامین‌کنندگان، امکان ارزیابی آن‌ها صرفاً از طریق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی ممکن نبود و به همین علت محققان به بررسی ترکیب مدل‌های ریاضی و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره پرداختند. دمیرتاس و همکاران^[۱۰]، از روش تحلیل فرایند شبکه (ANP)^۵ استفاده کردند تا تامین‌کنندگان یک کارخانه تولید یخچال را ارزیابی کنند و سپس با استفاده از نتایج آن به عنوان ورودی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه، تخصیص بهینه سفارش را با اهداف بیشینه‌سازی ارزش خرید و کمینه‌سازی هزینه‌های خرید و نرخ خرابی را انجام دادند. صنایعی و همکاران^[۷] ابتدا با استفاده از نظریه مطلوبیت چند معیاره، تامین‌کنندگان را ارزیابی کردند و برای هر کدام از آن‌ها نرخ مطلوبیتی تعیین کردند. سپس با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی سعی کردند تا تامین‌کنندگانی را انتخاب کنند که ضمن برآورد تقاضا، حداکثر نرخ مطلوبیت را برای خریدار به همراه داشته باشد. زوگاری و همکاران^[۱۱]، ابتدا از دو روش تاپسیس فازی ($FTOPSIS$)^۶ و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی^۷ استفاده کردند تا تامین‌کنندگان را در چهار طبقه براساس عملکرد استراتژیک، سطح کیفیت، نوآوری و ریسک ارزیابی کنند و سپس با استفاده از مدل تخصیص سفارش به انتخاب نهایی تامین‌کنندگان بپردازند. عرب‌زاد و همکاران^[۱۲]، برای انتخاب معیارهای مهم در تصمیم‌گیری، از روش تحلیل ماتریس $SWOT$ ^۸ و استخراج نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها، استفاده کردند. سپس از روش تاپسیس فازی برای وزن‌دهی معیارها و ارزیابی تامین‌کنندگان استفاده کردند. در ادامه و با استفاده از نتایج این روش تصمیم‌گیری چند معیاره، یک مدل برنامه‌ریزی خطی توسعه دادند تا در آن بتوانند به بیشینه ارزش کسب‌شده از طریق تعداد کالا خریداری شده از هر تامین‌کننده دست پیدا کنند. سودنکمپ و همکاران^[۱۳]، تامین‌کنندگان را در دو دسته معیار شامل معیارهای هم‌افزایی^۹ و معیارهای غیر هم‌افزایی ارزیابی کردند و سپس با استفاده از یک

مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط^{۱۰}، به بیشینه کردن ارزش کلی خرید پرداختند. در سال‌های اخیر، پایداری نیز به جزئی جدانشدنی از انتخاب تامین‌کنندگان تبدیل شده‌است. گورن و گونر^[۱۴] با استفاده از دیمتل فازی ($FDEMATEL$)^[۱] به وزن‌دهی به معیارهای پایداری برای انتخاب تامین‌کنندگان پرداختند. سپس با استفاده از تابع زیان تاگوچی^{۱۲}، نرخ ارزش را برای هر تامین‌کننده تعیین کردند و در نهایت در یک مسئله تخصیص سفارش با دو هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی ارزش خرید، به انتخاب نهایی تامین‌کنندگان پرداختند. بابر و همکاران^[۱۵]، هر دو نوع معیارهای کمی و کیفی در زمینه پایداری تامین‌کنندگان را در نظر گرفتند. آن‌ها با استفاده از اعداد فازی دوزنقه‌ای، عدم قطعیت را در مدل‌سازی مسئله تخصیص سفارش چند هدفه لحاظ کردند. موندراگون و همکاران^[۱۶]، از ۱۲ معیار با در نظر گرفتن پایداری برای انتخاب تامین‌کنندگان استفاده کردند. آن‌ها از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و معمولی برای انتخاب تکنولوژی و همچنین انتخاب تامین‌کنندگان در صنعت چاپ استفاده کردند. خوش‌فطرت و همکاران^[۱۷] انتخاب تامین‌کنندگان را با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی انجام دادند. سپس در مدل تخصیص سفارش با در نظر گرفتن عدم قطعیت فازی، شش تابع هدف شامل هزینه کل، امتیاز اقتصادی، امتیاز محیطی، امتیاز اجتماعی، نرخ تورم و سطح ریسک را در نظر گرفتند.

۲.۲. استفاده از هوش مصنوعی در انتخاب تامین‌کنندگان

با توجه به اینکه علوم داده در سال‌های اخیر پیشرفت چشم‌گیری داشته‌است، ترکیب تکنیک‌های تصمیم‌گیری و علوم داده به یکی از موضوعات مرز دانش تبدیل شده‌است. اولین مقاله‌های مربوط به این حوزه را می‌توان در اواسط دهه اول قرن ۲۱ یافت. در این زمان، اولین پژوهش‌ها برای ترکیب هوش مصنوعی و انتخاب تامین‌کنندگان صورت گرفت تا پاسخ‌هایی با قابلیت اطمینان بالاتر بدست آید. وو و همکاران^[۱۸]، برای ارزیابی عملکرد شعب یک بانک کانادایی از ترکیب روش تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)^[۱۳] و شبکه عصبی^{۱۴} استفاده کردند و معتقدند که استفاده از شبکه عصبی، پاسخ بهتری را نسبت به حالتی که ارزیابی آن‌ها به تنهایی با روش تحلیل پوششی داده‌ها انجام شود، ارائه می‌دهد. وو^[۱۹]، یک ساختار دو مرحله‌ای برای ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان ارائه داد که در مرحله اول، تامین‌کنندگان با روش تحلیل پوششی داده‌ها ارزیابی می‌شوند و با توجه به امتیازات کسب‌شده، در دسته کارآمد و ناکارآمد طبقه‌بندی می‌شوند. در مرحله دوم با استفاده از شبکه‌های عصبی و درخت تصمیم‌گیری (DT)^[۱۵]، یک مدل پیش‌بینی و طبقه‌بندی توسعه داده می‌شود تا در مواجهه با تامین‌کنندگان جدید، از این رویکرد برای برآورد امتیاز کارایی و طبقه‌بندی این تامین‌کنندگان استفاده شود. گو و همکاران^[۲۰]، برای ارزیابی و طبقه‌بندی تامین‌کنندگان، ۳۰ معیار را در نظر گرفتند که باعث افزایش پیچیدگی تصمیم‌گیری می‌شود و برای مقابله با آن از یک روش مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان به نام پتانسیل سلسله مراتبی ماشین بردار پشتیبان ($PSVM$)^[۱۶] و درخت تصمیم‌گیری استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از این چارچوب، ابتدا به شناسایی معیارهای مهم و سپس طبقه‌بندی تامین‌کنندگان پرداختند. ژیانگ و همکاران^[۲۱]، ابتدا با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها، تامین‌کنندگان را از نظر کارایی ارزیابی کردند. سپس تلاش کردند تا با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان به طبقه‌بندی تامین‌کنندگان در چهار حالت بپردازند تا کمترین ریسک ممکن در خرید و یا سرمایه‌گذاری شکل گیرد. میرکویی و همکاران^[۲۲]، از یک ساختار چهار مرحله‌ای برای انتخاب تامین‌کنندگان مواد اولیه زیست توده^{۱۷} استفاده کردند. در مرحله اول با استفاده از روش درخت تصمیم‌گیری به طبقه‌بندی این مواد با در نظر گرفتن ریسک تامین کالا و اهمیت آن‌ها پرداختند. در مرحله دوم، به انتخاب معیارها برای تامین‌کنندگان پرداختند. در مرحله سوم برای انتخاب اولیه و طبقه‌بندی برخی تامین‌کنندگان، از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند. در نهایت، در مرحله آخر با لحاظ تامین‌کنندگان منتخب اولیه، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای انتخاب تمام تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش به آن‌ها با در نظر گرفتن نرخ خرابی کالا و ظرفیت خاص برای تامین‌کنندگان توسعه دادند. چنگ و همکاران^[۲۳]، برای ارزیابی تامین‌کنندگان در صنعت نفت و پتروشیمی، از یک رویکرد ترکیبی استفاده کردند که در آن

تامین‌کنندگان بر اساس روش تحلیل پوششی داده‌ها و تاپسیس، ارزیابی می‌شوند و میانگین وزنی امتیاز کسب‌شده برای هر تامین‌کننده و همچنین اعداد مربوط به ماتریس تصمیم به مدل رگرسیون بردار پشتیبان وارد می‌شوند تا بتوان ساختاری مبتنی بر داده برای ارزیابی تامین‌کنندگان ایجاد کرد. همچنین تعدادی از پژوهشگران به ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین و مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی در این حوزه پرداخته‌اند. لیو و همکاران^[۲۴] برای انتخاب تامین‌کنندگان سبز، از یک رویکرد سه مرحله‌ای استفاده کردند. ابتدا با استفاده از ماشین بردار پشتیبان، یک ساختار مبتنی بر استخراج داده ارائه دادند که به طبقه‌بندی و کشف معیارهای اصلی برای ارزیابی تامین‌کنندگان بر اساس داده‌های سه سال قبل می‌پردازد. در مرحله دوم و پس از شناسایی معیارهای مهم، از روش فازی بهترین-بدترین^{۱۸} برای تعیین وزن آن‌ها استفاده کردند و در نهایت با استفاده از روش تاپسیس فازی، اقدام به رتبه‌بندی تامین‌کنندگان کردند. ایسلام و همکاران^[۲۵]، یک ساختار سه مرحله‌ای برای انتخاب تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش ارائه دادند. در مرحله اول برای پیش‌بینی تقاضا از یادگیری عمیق^{۱۹} استفاده شده‌است. در مرحله دوم با استفاده از منطق فازی بر اساس روش تحلیل ماتریس *SWOT*، به امتیازدهی تامین‌کنندگان پرداخته شده‌است. در مرحله سوم با استفاده از داده‌های مراحل قبل، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه توسعه داده شده تا در آن به انتخاب نهایی تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش پرداخته شود. با توجه به گسترش تعداد معیارها برای تصمیم‌گیری، پژوهشگران از یادگیری ماشین برای تعیین معیارهای مهم استفاده کرده‌اند. عبدالله و همکاران^[۲۶]، معتقدند که وزن‌دهی به معیارها توسط انسان می‌تواند با ناسازگاری همراه باشد. به همین علت سعی کردند تا با استفاده از یک رویکرد سه مرحله‌ای شامل جمع‌آوری و پردازش داده، تعیین وزن معیار با استفاده از یادگیری ماشین و در نهایت استفاده از روش *MARCOS*^{۲۰} برای رتبه‌بندی و امتیازدهی به تامین‌کنندگان، این خطا را رفع کنند. آن‌ها از چهار تکنیک طبقه‌بندی مبتنی بر درخت تصمیم‌گیری استفاده کردند تا عددی را برای اهمیت هر معیار بدست آورند. ایسلام و همکاران^[۲۷]، با استفاده از یادگیری عمیق به پیش‌بینی تقاضا پرداختند و به کمک روش تحلیل مولفه‌های اصلی (*PCA*^{۲۱}) به تعیین وزن هر تامین‌کننده پرداختند. سپس نتایج حاصل را در یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه وارد کردند تا تصمیم نهایی در انتخاب تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش اخذ شود. ما و همکاران^[۲۸]، با توجه به امکان ناسازگاری و پیچیدگی تصمیم‌گیری در ارزیابی کیفیت تامین‌کنندگان، یک رویکرد سه مرحله‌ای را پیشنهاد دادند. ابتدا با استفاده از نظر افراد خبره به تشکیل ماتریس تصمیم و تعیین وزن معیارها پرداختند. سپس برای بررسی دقیق از شش روش تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده کردند. در پایان با استفاده از یک مدل تجمیع‌شده از شش روش مرحله قبل و با در نظر گرفتن توابع زبان مختلف، مدل یادگیری ماشین را ایجاد کردند تا به امتیاز عملکرد نهایی هر تامین‌کننده دست یابند. جین و همکاران^[۲۹] در یک رویکرد سه مرحله‌ای به انتخاب پیمانکاران در پروژه ساختمانی پرداختند. در مرحله اول، چهار روش یادگیری ماشین شامل ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی، جنگل تصادفی (*RF*^{۲۲}) و رگرسیون خطی چندگانه (*MLR*^{۲۳}) را برای پیش‌بینی متغیر خروجی عملکردی پیمانکاران مقایسه کردند. در مرحله دوم با استفاده از مقادیر پیش‌بینی شده، آن‌ها را رتبه‌بندی کردند و در نهایت در یک مساله تخصیص سفارش، میزان کار به هر پیمانکار را مشخص کردند. جدول ۱، ویژگی‌های مقاله‌های مرور شده را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، این تحقیق برای اولین بار یک چارچوب سه مرحله‌ای یکپارچه شامل یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره در شرایط عدم قطعیت برای محاسبه امتیاز اولیه پایداری تامین‌کنندگان، یک روش پیش‌بینی داده‌محور برای محاسبه امتیاز نهایی پایداری تامین‌کنندگان با استفاده از مدل یادگیری ماشین *SVR*، و یک مدل ریاضی چندهدفه برای انتخاب نهایی تامین‌کنندگان و تخصیص بهینه سفارش به آن‌ها ارائه می‌دهد. همچنین در مدل‌سازی ریاضی چندکالایی و چنددوره‌ای مرحله سوم، برای اولین بار، محدودیت‌های واقعی و کاربردی دنیای واقعی مانند ظرفیت تامین‌کنندگان، لحاظ تعداد خاصی تامین‌کننده برای هر کالا، امکان دریافت تسهیلات مالی، و انتخاب وسیله حمل‌ونقل (با لحاظ آثار محیط‌زیستی) در نظر گرفته شده‌است.

۳. بیان مساله

انتخاب تأمین‌کنندگان مناسب و تخصیص میزان بهینه سفارش به آن‌ها در زنجیره تأمین پایدار، مسئله‌ای چندهدفه و پیچیده است که تحت تأثیر عوامل اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی قرار دارد. در شرایط واقعی، تنوع تأمین‌کنندگان و اهداف متضادی مانند کاهش هزینه‌ها، کاهش آلاینده‌گی و افزایش پایداری، تصمیم‌گیری را دشوار می‌سازد. یکی از چالش‌های اصلی، عدم قطعیت در ارزیابی اولیه تأمین‌کنندگان به‌ویژه با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به دلیل وابستگی به قضاوت انسانی، ضعف در مقیاس‌پذیری و ناتوانی در بروزرسانی سریع، پاسخگوی نیازهای زنجیره تأمین مدرن نیستند. از سوی دیگر، اغلب مدل‌های بهینه‌سازی کلاسیک، توانایی تلفیق نتایج ارزیابی پایداری در فرآیند تخصیص سفارش را ندارند. بنابراین، مسأله تحقیق حاضر این است که چگونه می‌توان چارچوبی ترکیبی و مقیاس‌پذیر طراحی کرد که از یک سو با کاهش وابستگی به قضاوت انسانی، امتیاز پایداری تأمین‌کنندگان را به‌شکلی داده‌محور و قابل‌پیش‌بینی تعیین نماید و از سوی دیگر این امتیاز را در یک مدل ریاضی جامع برای تخصیص بهینه سفارش با در نظر گرفتن اهداف متضاد و محدودیت‌های عملیاتی تلفیق کند.

در پاسخ به این پرسش، پژوهش حاضر یک چارچوب سه‌مرحله‌ای برای انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش به آن‌ها ارائه می‌دهد. در مرحله اول، با توجه به اهمیت پایداری تأمین‌کنندگان، معیارهای مربوطه از ادبیات موضوع و با استفاده از نظر خبرگان جمع‌آوری شده‌است. سپس با توجه به معیارهای جمع‌آوری شده، تأمین‌کنندگان توسط خبرگان امتیازدهی شده‌اند. با توجه به پیچیدگی ارزیابی تأمین‌کنندگان از ابعاد مختلف، در نظر گرفتن عدم قطعیت امری اجتناب‌ناپذیر جهت بهبود تصمیم‌گیری است. به این منظور در این پژوهش، از روش تاپسیس خاکستری استفاده شده‌است. پس از مشخص شدن امتیاز تأمین‌کنندگان با استفاده از این روش، از تکنیک رگرسیون بردار پشتیبان، برای برازش یک مدل آماری استفاده می‌شود تا به کمک آن بتوان امتیاز یک تأمین‌کننده جدید را پیش‌بینی کرد. به این منظور از ماتریس‌های نظر خبرگان (شامل امتیاز خبرگان برای هر تأمین‌کننده در مواجهه با هر معیار)، به عنوان ویژگی مدل، و از امتیاز نهایی روش تاپسیس خاکستری، به عنوان برجسب مدل، استفاده می‌شود. پس از آموزش مدل، در صورت اضافه شدن تأمین‌کنندگان جدید جهت ارزیابی، نیازی به طی کردن فرایند تصمیم‌گیری از ابتدا نیست و می‌توان با دقت مناسبی از خروجی مدل یادگیری ماشین برای تخمین امتیاز پایداری آن تأمین‌کننده استفاده کرد. در مرحله سوم، با توجه به امتیاز پایداری حاصل برای تأمین‌کنندگان، یک مدل ریاضی چندهدفه توسعه داده شده‌است. خروجی مدل ریاضی، تأمین‌کنندگان نهایی را به همراه میزان سفارش از هر کالا در هر دوره زمانی مشخص می‌کند. چارچوب سه مرحله‌ای پیشنهادی در این پژوهش در شکل ۱ آمده است.

۱.۳. روش تصمیم‌گیری گروهی چند معیاره

معیارهای ارزیابی تأمین‌کنندگان بر اساس مرور ادبیات و نظر افراد خبره مشخص و هفت معیار پایداری در سه دسته تعیین شد:

- اقتصادی: نرخ تغییرات قیمت (C1)، سهم بازار (C2)، نرخ خرابی محصول (C3)
- اجتماعی: نیروی انسانی بومی (C4)، همسویی با قوانین (C5)
- زیست محیطی: موقعیت مکانی نسبت به منابع طبیعی (C6)، بسته‌بندی سازگار با محیط زیست (C7)

منظور از همسویی با قوانین، میزان رعایت قوانین و مقررات اجتماعی توسط تأمین‌کنندگان (در این پژوهش، شرکت‌های پتروشیمی) است. رعایت این قوانین، نشان‌دهنده مسئولیت‌پذیری اجتماعی تأمین‌کنندگان و تعهد آن‌ها به استانداردهای اخلاقی و اجتماعی است. با توجه به اینکه عرضه بسیاری از مواد اولیه پتروشیمی‌ها در ایران در بورس کالا انجام می‌شود، اهتمام پتروشیمی‌ها نسبت به رعایت قوانین عرضه محصول نیز جنبه دیگر مورد بررسی است. موقعیت مکانی نسبت به منابع طبیعی، به بررسی نزدیکی

تأمین‌کنندگان به منابع طبیعی می‌پردازد. نزدیکی به این منابع می‌تواند خطرات زیست‌محیطی و آلودگی ناشی از فعالیت‌های پتروشیمی را افزایش دهد. بنابراین، ارزیابی این معیار به منظور کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی و حفظ سلامت اکوسیستم‌ها اهمیت دارد. پس از مشخص شدن معیارها، برای ارزیابی تأمین‌کنندگان براساس این معیارها، از روش تاپسیس خاکستری استفاده شده است. این روش، نوعی تصمیم‌گیری گروهی است که در آن ماتریس ارزیابی تأمین‌کنندگان نسبت به معیارها توسط خبرگان تکمیل می‌شود و سپس بر مبنای ترکیب نظرات آن‌ها، امتیاز نهایی تأمین‌کنندگان محاسبه می‌شود. اولین بار جولانگ^[۳۰]، "عدد خاکستری" را به صورت رابطه (۱) تعریف کرد:

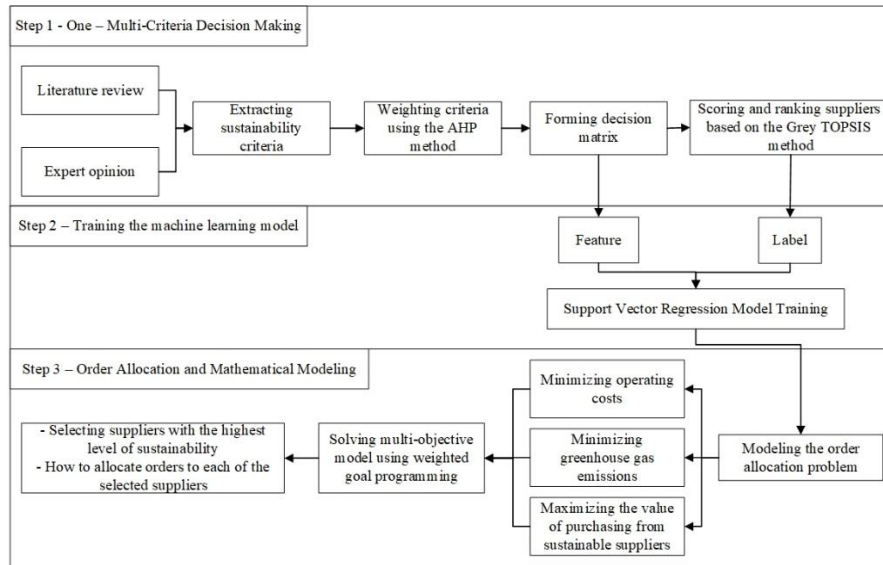
$$\otimes x = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x | \underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \underline{x} \& \bar{x} \in R\} \quad (1)$$

روش تاپسیس خاکستری، توسعه‌یافته روش تاپسیس با استفاده از اعداد خاکستری است. جدیدی و همکاران^[۳۱] و بای و همکاران^[۳۲]، برای انتخاب تأمین‌کنندگان از این روش استفاده کرده‌اند. این پژوهش از نسخه تاپسیس خاکستری توسعه‌یافته توسط لین و همکاران^[۳۳] که مناسب برای محیط‌های تصمیم‌گیری گروهی است، استفاده می‌کند. مهم‌ترین تغییرات این روش نسبت به تاپسیس عبارت است از: ۱. استفاده از تابع فاصله مینکوفسکی^{۲۴} برای رفع مشکل وزن‌دهی بیش از حد در تاپسیس، ۲. استفاده از اعداد خاکستری برای امتیازدهی در شرایط عدم قطعیت نظرات خبرگان و ۳. استفاده از یک روش جدید برای تجمیع نظرات خبرگان. این اصلاحات باعث می‌شود که این روش برای تصمیم‌گیری گروهی در شرایط عدم قطعیت مناسب باشد.

یک مجموعه شامل n تأمین‌کننده و m معیار برای ارزیابی آن‌ها، وجود دارد. تعداد k تصمیم‌گیرنده (خبره) نیز انتخاب شده‌اند. بردار وزن معیارها با نماد W نمایش داده می‌شود. معیارهای سهم بازار، همسویی با قوانین، موقعیت مکانی نسبت به منابع طبیعی و بسته‌بندی سازگار با محیط زیست به عنوان متغیرهای زبانی در نظر گرفته می‌شوند و برای ارزیابی آن‌ها از اعداد خاکستری موجود در جدول ۲ استفاده می‌شود.

جدول ۱. مرور ادبیات پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه انتخاب تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش (Literature review of studies conducted on supplier selection and order allocation)

ردیف	پژوهش	سال	یادگیری ماشین	شبکه عصبی	هوش مصنوعی		تصمیم‌گیری چند معیاره		مدل ریاضی تخصیص سفارش		مطالعه موردی
					کاربرد	روش	عدم قطعیت	تابع چند هدفه	روش حل	پایداری	
۱	[۱۸]	۲۰۰۶	×	✓	پیش‌بینی عملکرد تامین‌کنندگان	DEA	×	×	×	×	شعب بانک
۲	[۱۰]	۲۰۰۸	×	×	×	ANP/AHP	×	×	ε-محدودیت	×	لوازم خانگی
۳	[۲۰]	۲۰۰۹	PSVM	×	انتخاب معیار و طبقه‌بندی تامین‌کنندگان	×	×	×	×	✓	×
۴	[۱۹]	۲۰۰۹	DT	✓	طبقه‌بندی و پیش‌بینی عملکرد تامین‌کنندگان	DEA	×	×	×	×	مخابرات
۵	[۲۱]	۲۰۱۳	SVM	×	طبقه‌بندی تامین‌کنندگان	DEA	×	×	×	×	مخابرات
۶	[۲۲]	۲۰۱۴	SVM/DT	×	طبقه‌بندی مواد اولیه و تامین‌کنندگان	×	×	×	دقیق	×	مواد زیست توده
۷	[۱۴]	۲۰۱۸	×	×	×	FDEMATEL	✓	✓	جمع وزنی	✓	فروشگاه آنلاین
۸	[۱۵]	۲۰۱۸	×	×	×	×	×	✓	جمع وزنی	×	صنعت نوشیدنی
۹	[۲۳]	۲۰۲۰	SVR	×	پیش‌بینی عملکرد تامین‌کنندگان	DEA/TOPSIS	×	×	×	×	صنعت نفت و گاز
۱۰	[۱۷]	۲۰۲۰	×	×	×	AHP	×	✓	جمع وزنی	✓	صنعت خودرو
۱۱	[۲۴]	۲۰۲۱	SVM	×	انتخاب معیار و طبقه‌بندی تامین‌کنندگان	FTOPSIS	✓	×	×	×	صنعت الکترونیک
۱۲	[۲۵]	۲۰۲۲	×	×	×	×	×	✓	جمع وزنی	×	صنعت نوشیدنی
۱۳	[۲۶]	۲۰۲۳	DT	×	تعیین وزن معیارها	MARCOS	×	×	×	×	صنعت نفت و گاز
۱۴	[۲۷]	۲۰۲۴	PCA	✓	پیش‌بینی تقاضا و تعیین وزن تامین‌کنندگان	×	×	✓	جمع وزنی	×	صنعت گوشت
۱۵	[۲۹]	۲۰۲۴	RF/SVM/MLR	✓	پیش‌بینی عملکرد تامین‌کنندگان	×	×	✓	برنامه‌ریزی آرمانی	✓	صنعت ساختمان
۱۶	پژوهش حاضر		SVR	×	پیش‌بینی امتیاز پایداری تامین‌کنندگان	Grey TOPSIS	✓	✓	برنامه‌ریزی آرمانی وزن‌دار	✓	صنعت پلاستیک



شکل ۱. چارچوب سه مرحله‌ای ارائه شده در این پژوهش جهت انتخاب تامین‌کنندگان و بهینه‌سازی تخصیص سفارش (The three-stage framework presented in this study for supplier selection and order allocation optimization)

جدول ۲. دامنه امتیازدهی به معیارها (Scoring range for criteria)

متغیر زبانی	اعداد خاکستری $\otimes$
بسیار ضعیف	$[0, 1]$
ضعیف	$[1, 3]$
نسبتاً ضعیف	$[3, 4]$
متعادل	$[4, 5]$
نسبتاً خوب	$[5, 6]$
خوب	$[6, 9]$
خیلی خوب	$[9, 10]$

ماتریس تصمیم‌گیری خاکستری D^k برای تصمیم‌گیرنده k تشکیل می‌شود که ساختار آن در رابطه (۲) آورده شده است:

$$D^k = \begin{pmatrix} \otimes x_{11}^k & K & \otimes x_{1m}^k \\ M & O & M \\ \otimes x_{n1}^k & L & \otimes x_{nm}^k \end{pmatrix} \quad (2)$$

سطرهای این ماتریس، نشان‌دهنده تامین‌کنندگان و ستون‌های آن نشان‌دهنده معیارهای ارزیابی است. $\otimes x_{ij}^k$ نشان‌دهنده ارزیابی تامین‌کننده i ام در معیار j ام توسط خبره k ام است. گام‌های این روش عبارتند از:

گام ۱: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری خاکستری. برای معیارهای سود و هزینه به ترتیب از روابط (۳) و (۴) استفاده می‌شود:

$$\otimes r_{ij}^k = \frac{\otimes x_{ij}^k}{\max_i \otimes x_{ij}^k} = \left(\frac{x_{ij}^k}{\max_i x_{ij}^k}, \frac{-x_{ij}^k}{\max_i -x_{ij}^k} \right) \quad (3)$$

$$\otimes r_{ij}^k = \frac{\min_i x_{ij}^k}{\otimes x_{ij}^k} = \left(\frac{-x_{ij}^k}{\min_i x_{ij}^k}, \frac{\min_i x_{ij}^k}{-x_{ij}^k} \right) \quad (4)$$

گام ۲: شناسایی ایده‌آل مثبت و منفی. گزینه ایده‌آل مثبت و منفی از نظر خبره k ام به ترتیب توسط روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شود.

$$A^{k+} = \left\{ \left(\left(\max_i \bar{r}_{ij}^k \mid j \in J \right), \left(\min_i \underline{r}_{ij}^k \mid j \in J \right) \mid i \in I \right) \right\} = [r_1^{k+}, r_2^{k+}, \dots, r_m^{k+}] \quad (۵)$$

$$A^{k-} = \left\{ \left(\left(\min_i \underline{r}_{ij}^k \mid j \in J \right), \left(\max_i \bar{r}_{ij}^k \mid j \in J \right) \mid i \in I \right) \right\} = [r_1^{k-}, r_2^{k-}, \dots, r_m^{k-}] \quad (۶)$$

گام ۳: محاسبه فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی. این مرحله شامل محاسبه d_i^{*+} و d_i^{*-} است که به ترتیب فاصله از گزینه ایده‌آل مثبت و منفی هستند. این فرآیند به دو مرحله فرعی تقسیم می‌شود:

مرحله اول: محاسبه فاصله برای هر خبره. برای خبره k ام، میزان فاصله از گزینه ایده‌آل مثبت و منفی از طریق روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شود:

$$d_i^{k+} = \left\{ \frac{1}{r} \sum_{j=1}^m w_j \left[|r_j^{k+} - \underline{r}_{ij}^k|^p + |r_j^{k+} - \bar{r}_{ij}^k|^p \right] \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (۷)$$

$$d_i^{k-} = \left\{ \frac{1}{r} \sum_{j=1}^m w_j \left[|r_j^{k-} - \underline{r}_{ij}^k|^p + |r_j^{k-} - \bar{r}_{ij}^k|^p \right] \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (۸)$$

در این روابط، p مربوط به نوع فاصله است و همواره بزرگتر از ۱ و صحیح است. w_j نشان‌دهنده وزن تخصیص داده شده به معیار j ام است. در این پژوهش $p=2$ در نظر گرفته شده است که نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی است.

مرحله دوم: محاسبه فاصله ادغام شده افراد خبره. برای محاسبه فاصله ادغام‌شده از روابط (۹) و (۱۰) و عملگر $\oplus$ استفاده می‌شود:

$$d_i^{*+} = d_i^{1+} \oplus \dots \oplus d_i^{k+} \quad (۹)$$

$$d_i^{*-} = d_i^{1-} \oplus \dots \oplus d_i^{k-} \quad (۱۰)$$

عملیات تجمیع را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی مانند میانگین هندسی و میانگین حسابی انجام داد. در این پژوهش، از میانگین هندسی استفاده می‌شود. در نتیجه، فاصله هر تامین‌کننده از ایده‌آل مثبت و منفی از روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$d_i^{*+} = \left(\prod_k d_i^{k+} \right)^{1/k} \quad (۱۱)$$

$$d_i^{*-} = \left(\prod_k d_i^{k-} \right)^{1/k} \quad (۱۲)$$

گام ۴: محاسبه شاخص نزدیکی به گزینه ایده‌آل. این شاخص از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$c_i^{*+} = \frac{d_i^{*-}}{d_i^{*-} + d_i^{*+}} \quad (۱۳)$$

که در آن $0 \leq c_i^{*+} \leq 1$ و مقدار بزرگتر آن، نشان دهنده مطلوبیت بیشتر برای تامین‌کننده است.

۲.۳. روش یادگیری ماشین

در این بخش به بررسی روش رگرسیون بردار پشتیبان می‌پردازیم که به عنوان یک تکنیک مؤثر در پیش‌بینی امتیاز تامین‌کنندگان استفاده شده است. امتیاز تامین‌کنندگان که از طریق روش تاپسیس خاکستری در بخش ۱.۳ به دست آمده‌اند، به عنوان خروجی مورد نظر مدل یادگیری ماشین محسوب می‌شوند. رگرسیون بردار پشتیبان، یک روش یادگیری ماشین است که بر اساس نظریه

یادگیری آماری و بهینه‌سازی عمل می‌کند. در این روش، هدف اصلی، پیدا کردن یک تابع $f(x)$ است که بتواند به خوبی داده‌های ورودی x را به خروجی‌های مورد نظر $f(x)$ متصل کند. تابع $f(x)$ به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود:

$$f(x) = \omega^T \phi(x) + b \quad (14)$$

که در آن ω بردار وزن است. $\phi(x)$ تابع هسته‌ای^{۲۵} است که داده‌ها را به فضای ویژگی‌های بالاتر می‌برد و b نشان‌دهنده میزان انحراف است. برای آموزش مدل، به دنبال کمینه‌سازی تابع هزینه و حل مدل (۱۵) هستیم:

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*)$$

s.t.

$$y_i - \omega^T \phi(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i$$

$$\omega^T \phi(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^*$$

$$\xi_i \geq 0 \quad (15)$$

عبارت اول تابع هدف به نرمال‌سازی واریانس مدل اشاره دارد. هدف این است که وزن‌ها به گونه‌ای تنظیم شود که از بیش‌برازش جلوگیری کند. استفاده از ضریب ۰.۵ به منظور ساده‌سازی محاسبات در مشتق‌ها است. C نمایانگر تعادل بین همواری تابع $f(x)$ و میزان انحرافات قابل تحمل است. مقدار بالای C به مدل اجازه می‌دهد تا به دقت بیشتری در پیش‌بینی دست یابد، حتی اگر این امر منجر به پیچیدگی بیشتر مدل شود. ξ_i^* و ξ_i نشان‌دهنده انحرافات از پیش‌بینی‌ها هستند. انحرافات بزرگ‌تر از مقدار مجاز ε به عنوان هزینه در نظر گرفته می‌شوند و هدف این است که مجموع این هزینه‌ها کمینه شود. با توجه به اینکه معیارهای ماتریس تصمیم به عنوان ورودی‌ها و عدد امتیاز نهایی به عنوان برچسب برای هر تأمین‌کننده تعریف شده‌اند، این روش امکان پیش‌بینی امتیاز تأمین‌کنندگان جدید بدون نیاز به تشکیل ماتریس تصمیم از ابتدا برای تأمین‌کنندگان و معیارها را فراهم می‌کند. در شرایطی که تعداد تأمین‌کنندگان جهت ارزیابی زیاد باشد، احتمال بروز خطا در تصمیم‌گیری و یا عدم کارایی روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره وجود دارد. می‌توان ابتدا با استفاده از داده‌های تعدادی تأمین‌کننده، مدل یادگیری ماشین را آموزش داد و سپس امتیاز پایداری سایر تأمین‌کنندگان را پیش‌بینی کرد. همچنین می‌توان با استفاده از تمام تأمین‌کنندگان، مدل یادگیری ماشین را آموزش داد و پس از اضافه شدن تأمین‌کنندگان جدید، از این مدل برای پیش‌بینی امتیاز پایداری آن‌ها استفاده کرد.

۳.۳. مدل انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش

پس از تعیین امتیاز پایداری تأمین‌کنندگان، در این مرحله تصمیم‌گیری برای انتخاب نهایی تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش به آن‌ها، بر مبنای یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح مختلط انجام می‌شود. در این پژوهش فرض می‌شود که برای هر ماده اولیه مورد نیاز برای تولید، تعدادی تأمین‌کننده انتخاب می‌شود تا این مواد را در طی دوره‌های زمانی مشخص به کارخانه‌های تولیدی انتقال دهند. این انتقال به کمک وسایل نقلیه متفاوتی انجام می‌شود که تفاوت بین آن‌ها در ظرفیت، نرخ انتشار کربن و هزینه استفاده است. تمام پارامترها در این مدل قطعی است. مفروضاتی که در مدل‌سازی این مساله لحاظ شده‌اند عبارتند از:

- ۱- در مبدا زمانی، موجودی مواد اولیه در کارخانه‌های تولیدی صفر است و کمبود هر دوره به دوره بعد منتقل می‌شود.
- ۲- در هر دوره زمانی، هر وسیله نقلیه فقط یکبار از تأمین‌کننده بارگیری را انجام می‌دهد و برای کارخانه‌های تولیدی ارسال می‌کند.
- ۳- مکان کارخانه‌های تولیدی و تأمین‌کنندگان مشخص است.
- ۴- جهت جلوگیری از بحران در زمان وقوع اختلال، تنوع موادی که هر تأمین‌کننده می‌تواند تأمین کند، محدود است.
- ۵- هزینه حمل‌ونقل مواد اولیه با کارخانه است و وسایل نقلیه دارای هزینه ثابت و متغیر هستند که تعداد محدودی از هر نوع در اختیار هر تأمین‌کننده است.

۶- با توجه به محدودیت مالی کارخانه، بودجه مشخصی برای خرید مواد اولیه وجود دارد و برای تامین مازاد بر آن، امکان دریافت تسهیلات مالی تا سقف مشخصی از بانک وجود دارد. نمادهای استفاده شده در مدل در جدول ۳ هستند:

جدول ۳. نمادهای استفاده شده در مدل ریاضی (Symbols used in the mathematical model)

نماد	توضیح	نماد	توضیح
مجموعه‌ها			
I	مجموعه مواد اولیه	D_{ikt}	تقاضا کارخانه تولیدی k از ماده i در دوره زمانی t
J	مجموعه تامین‌کنندگان	dis_{jk}	مسافت بین تامین‌کننده j و کارخانه تولیدی k
K	مجموعه کارخانه‌های تولیدی	S_i	هزینه کمبود هر واحد ماده i در کارخانه‌های تولیدی
V	مجموعه وسایل حمل‌ونقل	H_i	هزینه نگهداری هر واحد مازاد بر تقاضا ماده i
T	مجموعه دوره‌های زمانی	CV_v	ظرفیت وسیله حمل‌ونقل v
پارامترها			
γ_j	امتیاز پایداری تامین‌کننده j (خروجی روش یادگیری ماشین)	FV_v	هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه نوع v
NS_i	تعداد تامین‌کننده لازم برای تامین ماده i	NOV_{jv}	تعداد وسیله نقلیه نوع v در اختیار تامین‌کننده j
NP_j	حداکثر تنوع ماده قابل تامین توسط تامین‌کننده j	L	تعداد کل دوره‌های تصمیم‌گیری
ABC	حداکثر مقدار اعتبار بانکی قابل دریافت	M	عدد بسیار بزرگ
متغیرهای تصمیم			
β	نرخ بهره بانکی	x_{ij}	متغیر باینری با مقدار ۱ در صورتی که تامین‌کننده j برای تامین ماده i انتخاب شود، ۰ در غیر این صورت
B	میزان بودجه برای تامین مواد اولیه در کل دوره‌های زمانی	y_{ijkvt}	حجم ماده i جابجاشده از تامین‌کننده j به کارخانه تولیدی k توسط وسیله حمل‌ونقل v در دوره زمانی t
f_{ij}	هزینه خرید یک واحد ماده i از تامین‌کننده j	sh_{ikt}	کمبود ماده i در کارخانه k در دوره زمانی t
CO	هزینه انتشار کربن در واحد مسافت	ex_{ikt}	مازاد ماده i در کارخانه k در دوره زمانی t
c_{ijkvt}	هزینه حمل‌ونقل یک واحد ماده i از تامین‌کننده j به کارخانه k توسط وسیله حمل‌ونقل v در دوره زمانی t	NV_{jv}	متغیر باینری با مقدار ۱ در صورتی که ماده از تامین‌کننده j توسط وسیله نقلیه v ارسال شود، ۰ در غیر این صورت
CA_{ij}	ظرفیت تامین ماده i توسط تامین‌کننده j	BC	میزان اعتبار دریافت‌شده از بانک جهت خرید مواد اولیه در مجموع دوره‌های زمانی
L_i	حداقل ارسال ماده i در صورت انتخاب هر تامین‌کننده برای آن در مجموع دوره‌های زمانی		
τ_v	نرخ انتشار کربن برای حمل یک واحد از مواد اولیه در یک واحد مسافت توسط وسیله حمل‌ونقل v		

$$\max Z_1 = \sum_I \sum_J \sum_K \sum_V \sum_T \gamma_j y_{ijkvt} \quad (16)$$

$$\min Z_2 = \sum_I \sum_J \sum_K \sum_V \sum_T dis_{jk} c_{ijkvt} y_{ijkvt} + \sum_I \sum_K \sum_T S_i sh_{ikt} + \sum_I \sum_K \sum_T H_i ex_{ikt} + \sum_J \sum_V FV_v NV_{jv} + \sum_I \sum_J \sum_K \sum_V \sum_T f_{ij} y_{ijkvt} + \beta BC \quad (17)$$

$$\min Z_3 = \sum_I \sum_J \sum_K \sum_V \sum_T CO \tau_v dis_{jk} y_{ijkvt} \quad (18)$$

s.t.

$$\sum_J x_{ij} = NS_i \quad \forall i \in I \quad (19)$$

$$\sum_I x_{ij} \leq NP_j \quad \forall j \in J \quad (20)$$

$$\sum_I \sum_J \sum_K \sum_V \sum_T y_{ijkvt} f_{ij} - BC \leq B \quad (21)$$

$$BC \leq ABC \quad (22)$$

$$y_{ijkvt} \leq Mx_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (23)$$

$$y_{ijkvt} \leq NV_{jv} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (24)$$

$$x_{ij}L_i \leq \sum_K \sum_V \sum_T y_{ijkvt} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (25)$$

$$\sum_J \sum_V y_{ijkv} + sh_{ik\lambda} - ex_{ik\lambda} = D_{ik\lambda} \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (26)$$

$$\sum_J \sum_V y_{ijkvt} + sh_{ikt} - ex_{ikt} + ex_{ikt-\lambda} = D_{ikt} + sh_{ikt-\lambda} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in \{2, \dots, L-1\} \quad (27)$$

$$\sum_J \sum_V y_{ijkvL} + ex_{ikL-\lambda} = D_{ikL} + sh_{ikL-\lambda} \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (28)$$

$$\sum_I \sum_K y_{ijkvt} \leq NOV_{jv} CV_v \quad \forall j \in J, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (29)$$

$$\sum_K \sum_V y_{ijkvt} \leq CA_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (30)$$

$$x_{ij}, NV_{jv} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall v \in V \quad (31)$$

$$BC, y_{ijkvt}, sh_{ikt}, ex_{ikt} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (32)$$

رابطه (۱۶)، بیشینه‌سازی ارزش خرید از تامین‌کنندگان را انجام می‌دهد تا بالاترین میزان پایداری در تخصیص سفارش به آن‌ها لحاظ شود. رابطه (۱۷)، مربوط به کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی است که به ترتیب شامل هزینه حمل‌ونقل مواد، کمبود و مازاد موجودی مواد، هزینه ثابت استفاده از وسایل حمل‌ونقل، هزینه خرید مواد و هزینه دریافت اعتبار بانکی است. رابطه (۱۸)، مربوط به کمینه‌سازی انتشار کربن ناشی از حمل‌ونقل مواد است که سبب افزایش سهم پایداری تصمیم حاصل از مدل می‌شود. رابطه (۱۹)، بیان می‌کند که برای تامین هر ماده اولیه، تعداد تامین‌کننده مشخصی باید انتخاب شود. این امر به این علت است که در مورد مواد حساس بتوان از چند منبع آن را تهیه کرد. رابطه (۲۰)، حداکثر تعداد مواد اولیه مشخصی را جهت تامین به هر تامین‌کننده تخصیص می‌دهد. رابطه (۲۱) بیان می‌کند که هزینه تامین مواد برابر میزان بودجه موجود و اعتبار بانکی دریافتی است. رابطه (۲۲)، حد مجاز اعتبار بانکی را نشان می‌دهد. رابطه (۲۳) بیان می‌کند، در صورتی امکان ارسال مواد از یک تامین‌کننده وجود دارد که آن تامین‌کننده برای تامین آن ماده اولیه انتخاب شده باشد. در رابطه (۲۴)، در صورتی که وسیله نقلیه برای حمل‌ونقل انتخاب شده باشد، می‌توان از آن برای انتقال مواد استفاده کرد. در رابطه (۲۵)، در صورتی که یک تامین‌کننده برای تامین ماده‌ای انتخاب شود، باید حداقل مقدار مشخصی از مواد را در طول دوره‌های زمانی ارسال کند. روابط (۲۶) تا (۲۸) مربوط به محاسبه میزان کمبود و مازاد مواد اولیه به ترتیب در دوره اول، دوره دوم تا ماقبل آخر و دوره آخر هستند. رابطه (۲۹) بیان‌کننده رعایت ظرفیت وسایل نقلیه است. رابطه (۳۰) مربوط به ظرفیت تامین‌کنندگان است. روابط (۳۱) و (۳۲) بیان‌کننده نوع و علامت متغیرهای تصمیم‌گیری است.

۴. روش حل

روش برنامه‌ریزی آرمانی نخستین بار توسط چارنز و همکاران^[۳۴] معرفی گردید. این روش به منظور حل مسائلی با اهداف متعارض به کار می‌رود و هدف آن حداقل‌سازی انحرافات نامطلوب از آرمان‌های تعیین‌شده است. این مدل به صورت زیر است.

$$\min Z_{WGP} = \sum_{i=1}^n W_i (d_i^+ + d_i^-) \quad (33)$$

s.t.

$$f_i(x) - d_i^+ + d_i^- = g_i \quad \forall i \quad (34)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad (35)$$

(۱۶) تا (۳۲)

$f_i(x)$ نشان‌دهنده تابع هدف i ام از مساله اصلی (روابط (۱۶) تا (۱۸)) است. آرمان مربوط به تابع هدف i ام با g_i نشان داده شده‌است. W_i وزن تابع هدف i ام، d_i^+ میزان انحراف مثبت و d_i^- میزان انحراف منفی از آرمان تابع هدف i ام هستند. برای

تعیین آرمان‌ها، رویکردهای متفاوتی در ادبیات پیشنهاد شده‌است. در این پژوهش، ابتدا مساله تخصیص سفارش برای هر کدام از توابع هدف به طور جداگانه حل شده‌است. سپس مقدار بهینه هر تابع هدف در اختیار افراد خبره قرار گرفته‌است تا با استفاده از آن به تعیین آرمان مربوط به آن هدف بپردازند.

۵. نتایج محاسباتی

۱.۵. مطالعه موردی

در این پژوهش، یک شرکت تولید لوازم یکبار مصرف پلاستیکی مطالعه شده‌است. این شرکت، کارخانه‌های مختلفی در سطح ایران دارد. تنوع بسیار زیاد محصولات یکبار مصرف باعث شده‌است تا مواد اولیه مختلفی برای تولید آن‌ها مورد نیاز باشد. تامین‌کنندگان اصلی این مواد، پتروشیمی‌ها در سطح کشور هستند. با توجه به رویکرد پیشنهادی در این مقاله، ابتدا سه خبره از شرکت شامل مدیر تدارکات، مدیر تولید و مدیر کیفیت انتخاب شدند و ماتریس‌های تصمیم خود را تشکیل دادند. برای وزندهی به معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، ماتریس مقایسات زوجی معیارها توسط افراد خبره تشکیل شد و پس از آنکه نرخ ناسازگاری آن‌ها کمتر از ۰.۱ شد، وزن معیارها با استفاده از روش میانگین حسابی، محاسبه شد. جدول ۴ این وزن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴. وزن معیارها، محاسبه‌شده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (Weights of criteria calculated using the Analytical Hierarchy Process)

معیار	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
وزن	۰.۱	۰.۰۵	۰.۳۰	۰.۲	۰.۰۵	۰.۱	۰.۲

با توجه به اهمیت مواد اولیه در کیفیت محصولات تولیدی، بیش‌ترین وزن، مربوط به نرخ خرابی محصول است. در مرحله اول، روش تاپسیس خاکستری بر روی نظرات خبرگان اعمال شد که نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شده‌است. امتیاز پایداری (c_i^{*+}) و رتبه هر تامین‌کننده در این جدول قابل مشاهده است. در مرحله دوم، مدل رگرسیون بردار پشتیبان برای پیش‌بینی امتیاز پایداری هر تامین‌کننده (پیش‌بینی مقدار c_i^{*+}) آموزش داده شد. این کار با استفاده از کتابخانه *Scikit-learn* در زبان برنامه‌نویسی *Python* انجام شد. اطلاعات مدل برازش‌شده در جدول ۵ آورده شده‌است. دو ستون آخر جدول ۶، مقدار پیش‌بینی شده و رتبه هر تامین‌کننده را نشان می‌دهد.

جدول ۵. اطلاعات مدل رگرسیون بردار پشتیبان برازش شده (Fitted Support Vector Regression model information)

	R - $squared$	میانگین مربعات خطا	درصد از کل داده‌ها
داده یادگیری	۰.۶۴	۰.۰۴	۷۰
داده تست	۰.۵۸	۰.۰۳	۳۰

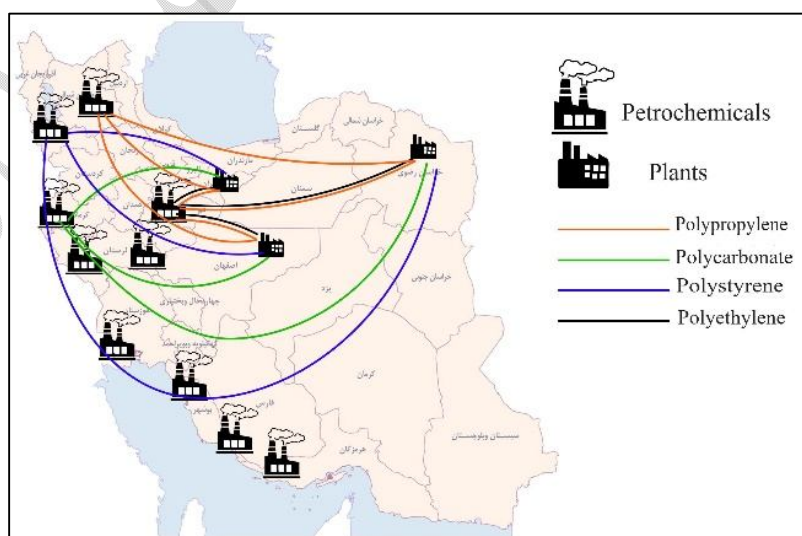
جدول ۶. محاسبه/پیش‌بینی امتیاز و رتبه تامین‌کنندگان با روش تاپسیس خاکستری / مدل رگرسیون بردار پشتیبان (Calculation/prediction of supplier scores and rankings using the Grey TOPSIS method / Support Vector Regression model)

روش تاپسیس خاکستری										روش رگرسیون بردار پشتیبان	
رتبه	c_i^{*+}	d_i^{*-}	d_i^{*+}	d_i^{*-}	d_i^{*+}	d_i^{*-}	d_i^{*+}	d_i^{*-}	d_i^{*+}	رتبه	امتیاز پیش‌بینی شده
۳	۰.۶۴	۰.۵۵	۰.۳۰	۰.۴۵	۰.۴۳	۰.۵۹	۰.۲۸	۰.۶۲	۰.۲۴	تبریز	۰.۵۹
۵	۰.۶۱	۰.۵۳	۰.۳۳	۰.۵۲	۰.۳۳	۰.۵۷	۰.۳۱	۰.۴۹	۰.۳۷	لرستان	۰.۵۷

مهاباد	۰.۳۳	۰.۵۴	۰.۳۳	۰.۶۱	۰.۳۷	۰.۵۵	۰.۳۴	۰.۵۶	۰.۶۲	۴	۰.۶۶	۳
مارون	۰.۳۳	۰.۵۲	۰.۲۷	۰.۶۷	۰.۵۰	۰.۴۲	۰.۳۶	۰.۵۳	۰.۶۰	۶	۰.۵۱	۹
جم	۰.۳۸	۰.۴۹	۰.۴۳	۰.۵۳	۰.۳۴	۰.۵۰	۰.۳۸	۰.۵۱	۰.۵۷	۸	۰.۶۱	۴
اراک	۰.۴۵	۰.۴۵	۰.۳۵	۰.۵۷	۰.۳۲	۰.۵۰	۰.۳۷	۰.۵۱	۰.۵۸	۷	۰.۵۲	۸
بندرعباس	۰.۴۸	۰.۳۶	۰.۵۲	۰.۴۴	۰.۳۸	۰.۴۶	۰.۴۵	۰.۴۲	۰.۴۸	۱۰	۰.۴۵	۱۰
پارس	۰.۴۵	۰.۴۳	۰.۳۳	۰.۵۷	۰.۴۴	۰.۴۵	۰.۴۰	۰.۴۸	۰.۵۴	۹	۰.۵۸	۶
ایلام	۰.۲۷	۰.۵۶	۰.۳۸	۰.۵۷	۰.۲۹	۰.۶۵	۰.۳۱	۰.۵۹	۰.۶۵	۱	۰.۷۳	۱
کرمانشاه	۰.۳۴	۰.۴۸	۰.۳۸	۰.۵۴	۰.۲۰	۰.۶۱	۰.۳۰	۰.۵۴	۰.۶۵	۲	۰.۷۰	۲

امتیاز پایداری حاصل از مدل یادگیری ماشین که در جدول ۶ آمده است، داده ورودی به مدل ریاضی است. مطالعه موردی دارای چهار نوع ماده اولیه، ۱۰ تامین کننده، سه کارخانه تولیدی، دو وسیله نقلیه و ۱۲ دوره زمانی یک ماهه است. مواد اولیه پلی اتیلن، پلی کربنات، پلی استایرن و پلی پروپیلن هستند. شرکت مورد مطالعه، سه کارخانه تولیدی در تهران، اصفهان و خراسان رضوی دارد. دو نوع تریلی کفی و چادری با ظرفیت ۲۰ و ۲۴ تن برای حمل مواد اولیه وجود دارد که در هزینه، ظرفیت و میزان تولید کربن متفاوت هستند. با توجه به نظر افراد خبره و اهمیت پلی پروپیلن و تنوع کالاهایی که از آن تولید می شود، برای این ماده اولیه، دو تامین کننده و برای سایر مواد، یک تامین کننده در نظر گرفته می شود. مدل ریاضی مساله در کتابخانه *PyOMO* در زبان برنامه نویسی *Python* کدنویسی و با استفاده از *CPLEX* بر روی یک سیستم با پردازنده هفت هسته ای و پردازنده مرکزی با قدرت ۲.۶ گیگاهرتز و حافظه ۱۶ گیگابایت اجرا شده است. تامین کنندگان مواد اولیه انتخاب شده در شکل ۲ قابل مشاهده هستند. این تامین کنندگان پتروشیمی های تبریز، کرمانشاه، اراک و مهاباد هستند.

با توجه به جدول ۶، پتروشیمی ایلام، بالاترین امتیاز پایداری را پس از پیش بینی توسط مدل یادگیری ماشین کسب کرده است، اما پس از حل مدل ریاضی برای تامین مواد اولیه انتخاب نشده است. همچنین مشخص گردید که به علت محدودیت ناوگان حمل و نقل، از هر دو نوع تریلی کفی و چادری استفاده شده است. با توجه به کمینه سازی هر دو تابع هدف هزینه های حمل و نقل و انتشار کربن، تریلی کفی که ظرفیت حمل بار کمتری دارد، برای جابه جایی حجم بیشتر حمل و نقل انتخاب شده است.



شکل ۲. نتایج مدل ریاضی در انتخاب پتروشیمی ها و تخصیص سفارش (order allocation) Results of the mathematical model in petrochemical selection and

۲.۵. اعتبارسنجی

در این بخش، اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی در دو زیربخش تاثیر ترکیب روش یادگیری ماشین با روش تصمیم‌گیری چند معیاره و بهبود ایجاد شده توسط رویکرد پیشنهادی نسبت به وضعیت موجود شرکت انجام می‌شود.

۱.۲.۵. بهبود ایجاد شده با استفاده از روش یادگیری ماشین

به منظور بررسی تاثیر استفاده از مدل یادگیری ماشین علاوه بر روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، در این بخش مستقیماً امتیازهای حاصل از روش تاپسیس خاکستری وارد مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه می‌شود. به منظور مقایسه نتایج دو حالت استفاده و عدم استفاده از روش یادگیری ماشین، اختلاف درصد نسبی این دو حالت برای سه تابع هدف معرفی شده در بخش ۳.۳ و تابع هدف آرمانی بخش ۴ طبق رابطه (۳۶) محاسبه شده است. در این رابطه که به عنوان نمونه برای تابع هدف دوم محاسبه شده است، Z_p^s نشان دهنده مقدار تابع هدف دوم در شرایط عدم حضور مدل یادگیری ماشین و Z_p^o نشان دهنده مقدار تابع هدف دوم در رویکرد پیشنهادی این پژوهش (استفاده از روش یادگیری ماشین) است. نتایج حاصل در جدول ۷ آورده شده است.

$$Gap_p^{s-o} = \frac{Z_p^s - Z_p^o}{Z_p^o} \times 100 \quad (36)$$

جدول ۷. نتایج حل مدل در شرایط عدم استفاده از روش SVR نسبت به رویکرد پیشنهادی (Results of solving the model without using the SVR) (method compared to the proposed approach)

Gap_{WGP}^{s-o}	Gap_p^{s-o}	Gap_p^{s-o}	Gap_p^{s-o}	عدم استفاده از یادگیری ماشین
۱.۷۶٪	-۱.۸۶٪	۲.۳۴٪	-۱.۰۳٪	

توجه شود که تابع هدف اول از نوع بیشینه‌سازی و توابع هدف دوم و سوم از نوع کمینه‌سازی هستند؛ بنابراین، مقدار منفی برای تابع هدف اول و مقدار مثبت برای توابع هدف دوم و سوم، نشان‌دهنده عملکرد بهتر رویکرد پیشنهادی است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت عدم استفاده از روش یادگیری ماشین، تنها تابع هدف سوم بهبود یافته است و توابع هدف اول و دوم عملکرد بدتری داشته‌اند. در مجموع، رویکرد پیشنهادی توانسته است ۱.۷۶٪ بهبود در مقدار تابع هدف آرمانی نسبت به حالت عدم استفاده از مدل یادگیری ماشین ایجاد کند.

۲.۲.۵. مقایسه روش پیشنهادی نسبت به وضعیت موجود

در این بخش، نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی نسبت به چهار سیاست موجود شرکت بررسی می‌شود. در وضعیت موجود، شرکت فقط از مدل تصمیم‌گیری تاپسیس خاکستری با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی شامل نرخ تغییرات قیمت، سهم بازار و نرخ خرابی محصول و معیارهای اجتماعی شامل نیروی انسانی بومی و همسویی با قوانین برای ارزیابی تأمین‌کنندگان استفاده می‌کند. با استفاده از نتایج حاصل، شرکت سه نوع سیاست عملیاتی مختلف برای تأمین مواد دارد. در سیاست اول، تأمین کلیه مواد فقط از تأمین‌کننده دارای رتبه یک انجام می‌گیرد؛ در سیاست دوم، این تأمین فقط از تأمین‌کننده دارای رتبه دوم صورت می‌پذیرد؛ و در سیاست سوم، از هر دو تأمین‌کننده دارای رتبه یک و دو استفاده می‌شود که تخصیص نوع کالا به هر تأمین‌کننده بر اساس نظر کارشناسان است. انتخاب میان این سیاست‌ها نیز بر مبنای شرایط زمانی، مالی سازمان و تصمیم مدیریت صورت می‌گیرد. همچنین حمل‌ونقل شرکت، تنها با استفاده از تریلی کفی انجام می‌شود. با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی و اجتماعی در روش تصمیم‌گیری چند معیاره، پتروشیمی تبریز و مارون به ترتیب در رتبه‌های اول و دوم قرار می‌گیرند. در سیاست اول و دوم شرکت، تمام کالاها به ترتیب از پتروشیمی تبریز و مارون تأمین می‌شوند. در سیاست سوم و چهارم، ترکیب این دو تأمین‌کننده برای تأمین کالاها در نظر گرفته می‌شود. در سیاست سوم، پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن به پتروشیمی تبریز و پلی‌کربنات و پلی‌استایرن به پتروشیمی مارون تخصیص

می‌یابد. در سیاست چهارم، پلی اتیلن و پلی کربنات از پتروشیمی تبریز و پلی پروپیلن و پلی استایرن از پتروشیمی مارون تأمین می‌شود. نتایج حاصل از این سیاست‌ها و مقایسه با رویکرد پیشنهادی در جدول ۸ ارائه شده‌است. در این جدول $Gap_i^{s-O}, i \in \{1, 2, 3\}$ و Gap_{WGP}^{s-O} به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف درصد نسبی تابع هدف i ام هر سیاست با رویکرد پیشنهادی و اختلاف درصد نسبی تابع هدف برنامه‌ریزی آرمانی وزن دار با رویکرد پیشنهادی در این پژوهش است.

جدول ۸. مقایسه نتایج رویکرد پیشنهادی با سیاست‌های موجود شرکت برای انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش (Comparing the results of the proposed approach with the company's existing policies for supplier selection and order allocation)

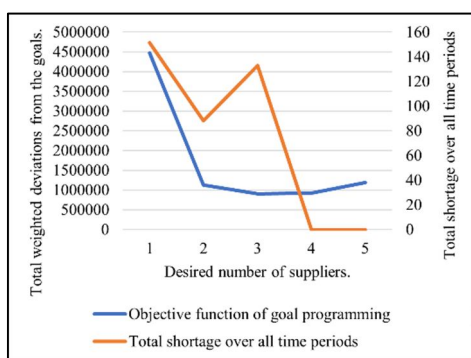
سیاست	Gap_1^{s-O}	Gap_2^{s-O}	Gap_3^{s-O}	Gap_{WGP}^{s-O}
۱	۰.۷۱٪	۵.۵۸٪	۲.۵۵٪	۵.۶۵٪
۲	-۰.۷۶٪	۶.۶۱٪	۳.۵۹٪	۶.۵۵٪
۳	-۱.۲۶٪	۶.۰۹٪	۲.۶۷٪	۴.۸۴٪
۴	-۱.۳۷٪	۳.۹۹٪	۲.۷۹٪	۵.۴۰٪
میانگین	-۰.۶۷٪	۵.۵۷٪	۲.۹۰٪	۵.۶۱٪

همان‌طور که در زیربخش قبل بیان شد، مقدار منفی برای تابع هدف اول (پایداری تأمین) و مقدار مثبت برای توابع هدف دوم (هزینه‌های عملیاتی) و سوم (آلایندگی) نشان دهنده مطلوبیت رویکرد پیشنهادی است. در سیاست اول، تابع هدف اول عملکرد مطلوب‌تری نسبت به رویکرد پیشنهادی دارد (۰.۷۱٪ بهبود)، زیرا تمام مواد از تأمین‌کننده با بالاترین امتیاز تأمین می‌شود، اما به دلیل محدودیت در تنوع منابع و عدم بهره‌گیری از ترکیب بهینه تأمین‌کنندگان، هزینه‌های عملیاتی و محیط‌زیستی به ترتیب ۵.۵۸٪ و ۲.۵۵٪ نسبت به رویکرد پیشنهادی افزایش یافته‌اند. دلیل اصلی افزایش در تابع هدف محیط‌زیستی، استفاده انحصاری شرکت از تریلی کفی است، در حالی که در رویکرد پیشنهادی امکان استفاده از تریلی چادری نیز لحاظ شده‌است که با ظرفیت بیشتر خود موجب کاهش تعداد سفرها و در نتیجه کاهش انتشار کربن شده‌است. در سیاست دوم، استفاده کامل از پتروشیمی مارون به دلیل رتبه پایین‌تر در امتیاز پایداری نسبت به پتروشیمی تبریز، موجب کاهش عملکرد در تابع هدف اول (-۰.۷۶٪) و افزایش چشم‌گیر در هزینه‌های عملیاتی (۶.۶۱٪) و زیست‌محیطی (۳.۵۹٪) شده‌است. این سیاست نشان می‌دهد که اتکای کامل به تأمین‌کننده‌ای با رتبه پایین‌تر، حتی اگر به‌طور مقطعی باشد، منجر به افت قابل توجه عملکرد می‌شود. در سیاست‌های ترکیبی سوم و چهارم، شرکت با ترکیب دو تأمین‌کننده سعی در توزیع تأمین منابع دارد، اما تخصیص منابع بر اساس قضاوت انسانی انجام شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که به صورت کلی، نسبت به سیاست‌های اول و دوم بهبود ایجاد شده‌است، اما همچنان اختلاف مشهودی با رویکرد پیشنهادی وجود دارد. برای نمونه، در سیاست سوم، هزینه‌های عملیاتی ۶.۰۹٪ و هزینه‌های محیط‌زیستی ۲.۶۷٪ بالاتر از رویکرد پیشنهادی است. در سیاست چهارم نیز این اختلاف‌ها به ترتیب ۳.۹۹٪ و ۲.۷۹٪ هستند. در مجموع، اختلاف تابع هدف آرمانی وزن دار در تمام سیاست‌ها نسبت به مدل پیشنهادی قابل توجه است و بین ۴.۸۴٪ تا ۶.۵۵٪ محاسبه شده‌است. در این پژوهش، رویکرد پیشنهادی به طور میانگین موجب بهبود ۰.۶۷٪ در تابع هدف اول، ۵.۵۷٪ در تابع هدف دوم و ۲.۹٪ در تابع هدف سوم شده‌است. در نهایت مدل پیشنهادی نسبت به تمام سیاست‌ها منجر به بهبود ۵.۶۱٪ در مقدار تابع هدف آرمانی شده‌است. این شاخص ترکیبی بیانگر عملکرد کلی مدل است و نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی موفق به کاهش هم‌زمان هزینه‌های عملیاتی و محیط‌زیستی و افزایش تأمین پایدار شده‌است.

۶. تحلیل حساسیت

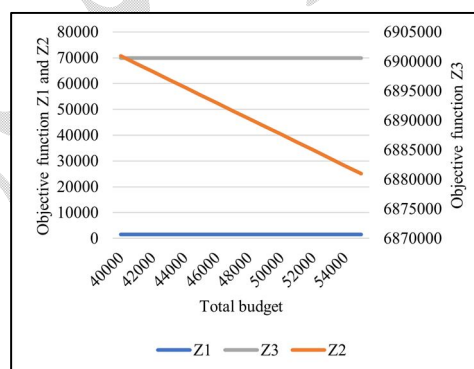
در این بخش بر روی دو پارامتر B ، بودجه شرکت برای تأمین مواد اولیه در تمام دوره‌های زمانی، و NS_4 ، تعداد تأمین‌کنندگان برای تأمین پلی پروپیلن، تحلیل حساسیت صورت گرفته است. تغییرات مقدار هر تابع هدف نسبت به تغییر بودجه در شکل ۳ قابل

مشاهده است. با توجه به این شکل، با افزایش بودجه برای خرید مواد اولیه، تابع هدف دوم یعنی هزینه‌های عملیاتی زنجیره تامین، به صورت خطی کاهش یافته است، ولی تابع هدف اول و سوم بدون تغییر مانده است. افزایش بودجه می‌تواند به صورت کاهش اعتبار دریافتی از بانک و کاهش کمبود کالا، منجر به کاهش تابع هدف دوم شود. تعداد تامین‌کننده برای هر ماده اولیه، با نظر افراد خبره تعیین می‌شود. در این پژوهش، برای پلی‌پروپیلن، دو تامین‌کننده در نظر گرفته شده است. انتظار می‌رود که با افزایش تعداد تامین‌کنندگان برای یک ماده اولیه، مقدار کمبود آن در کارخانه‌های تولیدی کاهش پیدا کند. به منظور بررسی بیشتر، تعداد تامین‌کننده پلی‌پروپیلن، از یک تا پنج تغییر داده شده که نتایج آن در شکل ۴ آمده است. باتوجه به شکل ۴، مجموع مقدار کمبود ابتدا روند کاهشی، سپس افزایشی و در نهایت کاهشی دارد. هنگامی که چهار یا پنج تامین‌کننده برای این ماده انتخاب شود، مقدار کمبود به صفر می‌رسد که علت آن را می‌توان مربوط به محدودیت (۲۵) در مدل ریاضی دانست. به عبارت دیگر، هنگامی که تعداد تامین‌کنندگان افزایش پیدا می‌کند، باید یک حداقل مقدار مشخص از هر کالا را ارسال کنند که باعث کاهش کمبود می‌شود. همچنین مجموع انحرافات وزن‌دار از آرمان‌ها (تابع هدف آرمانی)، ابتدا کاهشی و سپس افزایشی بوده است. در ابتدا، با افزایش تعداد تامین‌کنندگان، هزینه کمبود کاهش و در نتیجه مقدار تابع هدف آرمانی کاهش می‌یابد. هنگامی که تعداد تامین‌کننده به چهار یا پنج افزایش پیدا کند، هزینه ارسال کالا از تامین‌کنندگان به کارخانه‌ها به علت پراکندگی در نقاط مختلف کشور افزایش می‌یابد که منجر به افزایش مقدار انحراف تابع هدف دوم از آرمان آن می‌شود.



شکل ۴. تغییر تابع هدف با تغییر تعداد تامین‌کننده پلی‌پروپیلن

Objective function changes with variations in the number of (polypropylene suppliers)



شکل ۳. تغییر توابع هدف بر حسب تغییر بودجه موجود (Objective function changes with budget variations)

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این مقاله، یک رویکرد سه مرحله‌ای برای انتخاب تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش به آن‌ها ارائه شده است. این رویکرد، شامل ارزیابی تامین‌کنندگان با روش تاپسیس خاکستری، پیش‌بینی امتیاز پایداری تامین‌کنندگان با روش یادگیری ماشین مبتنی بر رگرسیون بردار پشتیبان و انتخاب نهایی تامین‌کنندگان و تخصیص سفارش با برنامه‌ریزی ریاضی است. دو مرحله اول این رویکرد با تأکید بر پایداری در جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی، سعی در ایجاد یک مدل برای محاسبه امتیاز پایداری تامین‌کنندگان در شرایط عدم قطعیت دارد. استفاده از اعداد خاکستری در روش تاپسیس، این امکان را می‌دهد که عدم قطعیت موجود به خوبی مدیریت و تصمیمات بهتری اتخاذ شود. مدل رگرسیون بردار پشتیبان، به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی نتایج و افزایش سرعت تصمیم‌گیری، نقش مهمی دارد. این مدل یادگیری ماشین کمک می‌کند تا با تحلیل داده‌ها و شناسایی الگوها، امتیاز پایداری تامین‌کنندگان دقیق‌تر از حالتی که فقط از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌شود، محاسبه شود و در نتیجه خطای انسانی در تصمیم‌گیری را کاهش می‌دهد. در نهایت، امتیاز پایداری تامین‌کنندگان وارد مدل ریاضی به منظور انتخاب نهایی

تامین‌کنندگان و تخصیص بهینه سفارش به آن‌ها می‌شود. در این مدل، به منظور کاهش ریسک عدم تامین کالا، برای کالاهای استراتژیک، بیش از یک تامین‌کننده در نظر گرفته می‌شود، همچنین هر تامین‌کننده، امکان برآورده‌سازی یک حداکثر تعداد مشخص از هر کالا را دارد. رویکرد ارایه‌شده بر روی یک مطالعه موردی در صنعت پلاستیک پیاده‌سازی شده‌است. در این مطالعه موردی، مشخص شد که ممکن است که تامین‌کننده‌ای دارای بیشترین امتیاز پایداری از هر دو روش تاپسیس خاکستری و مدل یادگیری ماشین باشد، اما به عنوان تامین‌کننده نهایی برای هیچ ماده اولیه‌ای انتخاب نشود. به این علت که باید سایر ملاحظات مانند هزینه‌های جابه‌جایی مواد و قیمت فروش تامین‌کنندگان که در مدل ریاضی لحاظ شده‌است را نیز در نظر داشت. رویکرد پیشنهادی در این مقاله، یک چارچوب تصمیم‌گیری مؤثر برای مدیران با در نظر گرفتن ابعاد مختلف پایداری به منظور انتخاب بهتر آن‌ها در فرآیند تامین کالاهای خود ارائه می‌دهد. اعتبارسنجی مدل نشان داد که استفاده از روش SVR در مقایسه با حالتی که صرفاً از نتایج روش تاپسیس خاکستری استفاده می‌شود، منجر به بهبود ۱۰۷۶٪ در مقدار تابع هدف برنامه‌ریزی آرمانی وزن‌دار شده‌است. همچنین، رویکرد پیشنهادی در مقایسه با چهار سیاست مبتنی بر وضعیت فعلی شرکت، به‌طور میانگین بهبود ۵۰۶٪ در مقدار تابع هدف آرمانی داشته‌است. در تحقیقات آتی می‌توان عدم قطعیت را در پارامترهای ورودی مدل ریاضی نیز لحاظ کرد. همچنین می‌توان در مرحله اول از رویکرد پیشنهادی، از ترکیبی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده کرد و سپس براساس نتایج آن‌ها، مدل یادگیری ماشین را توسعه داد.

پانویس‌ها

1. Machine learning
2. Grey TOPSIS
3. Support Vector Regression (SVR)
4. Analytical Hierarchy Process (AHP)
5. Analytic Network Process (ANP)
6. Fuzzy TOPSIS (FTOPSIS)
7. Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)
8. Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (SWOT)
9. Synergy criteria
10. Mixed integer linear programming
11. Fuzzy Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (FDEMATEL)
12. Taguchi loss function
13. Data Envelopment Analysis (DEA)
14. Neural network
15. Decision Tree (DT)
16. Potential Support Vector Machine (PSVM)
17. Biomass
18. Fuzzy best-worst method
19. Deep learning
20. Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution (MARCOS)
21. Principal Component Analysis (PCA)
22. Random Forest (RF)
23. Multi-Linear Regression (MLR)
24. Minkowski distance function
25. Kernel function

مراجع (References)

1. Choi, T.Y. and Hartley, J.L., 1996. An exploration of supplier selection practices across the supply chain. *Journal of Operations Management*, 14(4), pp.333-343. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(96\)00091-5](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(96)00091-5).
2. Zegordi, S.H. and Maleki, E., 2024. Supplier selection and order allocation model with disruption risks and business volume discount risk-neutral or risk-averse. *Sharif Journal of Industrial Engineering & Management*, 40(1), pp.3-13. [In Persian]. <https://doi.org/10.24200/j65.2022.58512.2239>.

3. Heese, H.S., 2015. Single versus multiple sourcing and the evolution of bargaining positions. *Omega*, 54, pp.125-133. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.016>.
4. Nydick, R.L. and Hill, R.P., 1992. Using the analytic hierarchy process to structure the supplier selection procedure. *International Journal of Purchasing and Materials Management*, 28(2), pp.31-36. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.1992.tb00561.x>.
5. Gonzalez, M.E., Quesada, G. and Mora Monge, C.A., 2004. Determining the importance of the supplier selection process in manufacturing: a case study. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(6), pp.492-504. <https://doi.org/10.1108/09600030410548550>.
6. Florez-Lopez, R., 2007. Strategic supplier selection in the added-value perspective: A CI approach. *Information Sciences*, 177(5), 1169–1179. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.08.009>.
7. Sanayei, A., Mousavi, S.F., Abdi, M.R. and Mohaghar, A., 2008. An integrated group decision-making process for supplier selection and order allocation using multi-attribute utility theory and linear programming. *Journal of the Franklin institute*, 345(7), pp.731-747. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2008.03.005>.
8. Bonab, S.R., Haseli, G., Rajabzadeh, H., Ghoushchi, S.J., Hajiaghahi-Keshteli, M. and Tomaskova, H., 2023. Sustainable resilient supplier selection for IoT implementation based on the integrated BWM and TRUST under spherical fuzzy sets. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 6(1), pp.153-185. <https://doi.org/10.31181/dmame12012023b>.
9. Dickson, G.W., 1966. An analysis of vendor selection systems and decisions. *Journal of Purchasing*, 2(1), pp.5-17. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.1966.tb00818.x>.
10. Demirtas, E.A. and Üstün, Ö., 2008. An integrated multiobjective decision making process for supplier selection and order allocation. *Omega*, 36(1), pp.76-90. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.11.003>.
11. Zouggari, A. and Benyoucef, L., 2012. Simulation based fuzzy TOPSIS approach for group multi-criteria supplier selection problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(3), pp.507-519. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.10.012>.
12. Arabzad, S.M., Ghorbani, M., Razmi, J. and Shirouyehzad, H., 2015. Employing fuzzy TOPSIS and SWOT for supplier selection and order allocation problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76, pp.803-818. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6288-3>.
13. Sodenkamp, M.A., Tavana, M. and Di Caprio, D., 2016. Modeling synergies in multi-criteria supplier selection and order allocation: An application to commodity trading. *European Journal of Operational Research*, 254(3), pp.859-874. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.015>.
14. Gören, H.G., 2018. A decision framework for sustainable supplier selection and order allocation with lost sales. *Journal of Cleaner Production*, 183, pp.1156-1169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.211>.
15. Babbar, C. and 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, pp.27-38. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.09.041>.
16. Mondragon, A.E.C., Mastrocinque, E., Tsai, J.F. and Hogg, P.J., 2019. An AHP and fuzzy AHP multifactor decision making approach for technology and supplier selection in the high-functionality textile industry. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 68(4), pp.1112-1125. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2923286>.
17. Khoshfetrat, S., Rahiminezhad Galankashi, M. and Almasi, M., 2020. Sustainable supplier selection and order allocation: a fuzzy approach. *Engineering Optimization*, 52(9), pp.1494-1507. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2019.1663185>.
18. Wu, D.D., Yang, Z. and Liang, L., 2006. Using DEA-neural network approach to evaluate branch efficiency of a large Canadian bank. *Expert Systems with Applications*, 31(1), pp.108-115. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.09.034>.
19. Wu, D., 2009. Supplier selection: A hybrid model using DEA, decision tree and neural network. *Expert Systems with Applications*, 36(5), pp.9105-9112. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.12.039>.
20. Guo, X., Yuan, Z. and Tian, B., 2009. Supplier selection based on hierarchical potential support vector machine. *Expert Systems with Applications*, 36(3), pp.6978-6985. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.08.074>.
21. Jiang, B., Chen, W., Zhang, H. and Pan, W., 2013. Supplier's efficiency and performance evaluation using DEA-SVM approach. *Journal of Software*, 8(1), pp.25-30. <https://doi.org/10.4304/jsw.8.1.25-30>.

22. Mirkouei, A. and Haapala, K. R., 2014. Integration of machine learning and mathematical programming methods into the biomass feedstock supplier selection process. *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.14809/faim.2014.0443>.
23. Cheng, Y., Peng, J., Gu, X., Zhang, X., Liu, W., Zhou, Z., Yang, Y. and Huang, Z., 2020. An intelligent supplier evaluation model based on data-driven support vector regression in global supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 139, p.105834. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.047>.
24. Liou, J.J., Chang, M.H., Lo, H.W. and Hsu, M.H., 2021. Application of an MCDM model with data mining techniques for green supplier evaluation and selection. *Applied Soft Computing*, 109, p.107534. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107534>.
25. Islam, S., Amin, S.H. and Wardley, L.J., 2022. Supplier selection and order allocation planning using predictive analytics and multi-objective programming. *Computers & Industrial Engineering*, 174, p.108825. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108825>.
26. Abdulla, A., Baryannis, G. and Badi, I., 2023. An integrated machine learning and MARCOS method for supplier evaluation and selection. *Decision Analytics Journal*, 9, p.100342. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100342>.
27. Islam, S., Amin, S.H. and Wardley, L.J., 2024. A supplier selection & order allocation planning framework by integrating deep learning, principal component analysis, and optimization techniques. *Expert Systems with Applications*, 235, p.121121. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121121>.
28. Ma, Q. and Li, H., 2024. A decision support system for supplier quality evaluation based on MCDM-aggregation and machine learning. *Expert Systems with Applications*, 242, p.122746. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122746>.
29. Jain, S., Jauhar, S. K. and Piyush., 2024. A machine-learning-based framework for contractor selection and order allocation in public construction projects considering sustainability, risk, and safety. *Annals of Operations Research*, pp.1-43. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-05898-6>.
30. Ju-Long, D., 1982. Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*, 1(5), pp.288-294. [https://doi.org/10.1016/S0167-6911\(82\)80025-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(82)80025-X).
31. Jadidi, O., Sai Hong, T., Firouzi, F. and Yusuff, R.M., 2009. An optimal grey based approach based on TOPSIS concepts for supplier selection problem. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 4(2), pp.104-117. <https://doi.org/10.1080/17509653.2009.10671066>.
32. Bai, C. and Sarkis, J., 2018. Integrating sustainability into supplier selection: a grey-based TOPSIS analysis. *Technological and Economic Development of Economy*, 24(6), pp.2202-2224. <https://doi.org/10.3846/tede.2018.5582>.
33. Lin, Y.H., Lee, P.C., Chang, T.P. and Ting, H.I., 2008. Multi-attribute group decision making model under the condition of uncertain information. *Automation in Construction*, 17(6), pp.792-797. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.02.011>.
34. Charnes, A., Cooper, W.W. and Ferguson, R.O., 1955. Optimal estimation of executive compensation by linear programming. *Management Science*, 1(2), pp.138-151. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1.2.138>.