Journal of Quality Engineering and Management

www.pqprc.ir

J. Qual. Eng. Manag. Vol. 15, No. 1 (2025) 83–109.

Paper Type: Original Article

# Proposing a Data-Driven Decision-Making Model for Evaluating Sustainable and Resilient Suppliers in the Automotive Industry

**Seyedeh Mahboubeh Saeidifar [1], Iraj Mahdavi [1,*], Ali Tajdin[1], Nikbakhsh Javadian[1]**

[1] Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran;
Seyedeh.mahboubeh.saeidi@gmail.com; Irajustmb@gmail.com; Ali_tajdin@yahoo.com; Nijavadian@ustmb.ac.ir.

**Citation:**

| | |
|---|---|
| *Received: 25 September 2024*<br>*Revised: 21 November 2024*<br>*Accepted: 17 December 2024* | Saeidifar, S. M., Mahdavi, I., Tajdin, A., & Javadian, N. (2025). Proposing a data-driven decision-making model for evaluating sustainable and resilient suppliers in the automotive industry. *Journal of Quality Engineering and Management, 15*(1), 83-109. |

## Abstract

**Purpose:** In light of the growing challenges in today's supply chains, including market fluctuations, increasing environmental and social pressures, and the need to enhance resilience against foreseeable crises such as the COVID-19 pandemic and economic disruptions, the strategic importance of selecting suppliers that simultaneously meet sustainability and resilience criteria has become more prominent. Accordingly, the main objective of this study is to present a comprehensive, data-driven, and forward-looking decision-making model for evaluating and selecting suppliers within the supply chain, accounting for multiple dimensions of sustainability and resilience simultaneously.

**Methodology:** In the proposed model, the weights of the defined criteria and sub-criteria were initially determined using the Stochastic Best-Worst Method (SBWM). Supplier performance was then evaluated using the Stochastic VIKOR Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) method. In the final stage, the Random Forest regression algorithm was applied to predict future supplier performance. The model was tested through a case study conducted at SAIPA Kashan Automotive Company using expert input collected via structured questionnaires.

**Findings:** Sustainability and resilience criteria play a central role in supplier selection in the automotive industry. Among the sub-criteria, "greenhouse gas emissions" and "energy consumption reduction" were most influential due to environmental regulations. At the same time, "cost" and "safety stock level" had the greatest impact due to their direct effect on economic performance and operational continuity. Furthermore, the Random Forest algorithm achieved high predictive accuracy (RMSE = 0.0976), confirming the model's ability to generate reliable, data-driven forecasts.

**Originality/Value:** Although each of the methods used in this research (Random Best-Worst Method, Random VIKOR, and Random Forest algorithm) has been employed individually in previous studies, the main innovation of this study lies in presenting an integrated framework that combines all three approaches. In fact, this research is the first to merge MCDM methods with a machine learning algorithm, offering a comprehensive, data-driven decision-making model. This model not only assesses the current performance of suppliers but also enables prediction of their future performance. Such a combination has not previously been introduced in the supplier selection literature with a simultaneous focus on supply chain sustainability and resilience in the automotive industry, marking a clear methodological innovation.

**Keywords:** Supplier selection, Sustainability, Resiliency, Automotive industry, Random forest algorithm.

Corresponding Author: Irajustmb@gmail.com

10.48313/jqem.2025.529590.1555

Licensee System Analytics. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

**مهندسی و مدیریت کیفیت**

www.pqprc.ir

دوره ۱۵، شماره (۱)، (۱۴۰۴)، ۱۰۹-۸۳

**نوع مقاله: پژوهشی**

# ارایه مدل تصمیم‌گیری داده‌محور به‌منظور ارزیابی تامین‌کنندگان پایدار و تاب‌آور در صنعت خودرو

**سیده محبوبه سعیدی‌فر[۱]، ایرج مهدوی[۱،*]، علی تاجدین[۱]، نیکبخش جوادیان[۱]**

[۱]گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران.

## چکیده

**هدف:** با توجه به چالش‌های رو به رشد زنجیره‌های‌تامین در دنیای امروز، شامل نوسانات بازار، فشارهای فزاینده زیست‌محیطی و اجتماعی و نیز نیاز به افزایش تاب‌آوری در برابر بحران‌های پیش‌بینی‌نشده (مانند همه‌گیری کرونا و بحران‌های اقتصادی)، انتخاب تامین‌کنندگانی که به‌طور همزمان معیارهای پایداری و تاب‌آوری را برآورده کنند، اهمیتی استراتژیک پیدا کرده است. در این راستا، هدف اصلی این پژوهش ارایه یک مدل تصمیم‌گیری جامع و داده‌محور با رویکردی آینده‌نگر برای ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان در زنجیره‌تامین است که بتواند همزمان ابعاد مختلف پایداری و تاب‌آوری را مد نظر قرار دهد.

**روش‌شناسی پژوهش:** در مدل ارایه‌شده، ابتدا وزن معیارها و زیرمعیارهای مطرح‌شده از طریق روش بهترین-بدترین تصادفی محاسبه گردید. سپس ارزیابی عملکرد تامین‌کنندگان با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ویکور تصادفی انجام گرفت. در مرحله بعد، برای پیش‌بینی عملکرد آتی تامین‌کنندگان از الگوریتم رگرسیون جنگل تصادفی استفاده شد. این مدل در قالب یک مطالعه موردی در شرکت خودروسازی سایپا کاشان و با بهره‌گیری از پرسشنامه‌های تخصصی و نظرات کارشناسان صنعت اجرا شد.

**یافته‌ها:** نتایج پژوهش نشان داد که معیارهای مرتبط با پایداری و تاب‌آوری در انتخاب تامین‌کنندگان صنعت خودرو نقش کلیدی دارند. در میان زیرمعیارهای بررسی‌شده، انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش مصرف انرژی به دلیل الزامات زیست‌محیطی و هزینه و سطح موجودی ایمنی به علت تاثیر مستقیم بر عملکرد اقتصادی و تداوم عملیات، بیشترین تاثیر را بر کارایی تامین‌کنندگان داشتند. علاوه‌بر این، به‌کارگیری الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش‌بینی عملکرد آینده تامین‌کنندگان نشان داد که این روش از دقت پیش‌بینی بالایی برخوردار است ($RMSE = 0.0976$).

**اصالت/ارزش‌افزوده علمی:** گرچه هر یک از روش‌های به‌کاررفته در این پژوهش (بهترین-بدترین تصادفی، ویکور تصادفی، الگوریتم جنگل تصادفی) تامین جداگانه در مطالعات پیشین مورداستفاده قرار گرفته‌اند، اما ارایه چارچوبی یکپارچه که این سه روش را با یکدیگر ترکیب کند، نوآوری اصلی این مطالعه محسوب می‌شود. در واقع، این پژوهش برای نخستین بار با تلفیق روش‌های چندمعیاره و الگوریتم یادگیری ماشین، یک مدل تصمیم‌گیری جامع و داده‌محور ارایه کرده است که علاوه‌بر ارزیابی عملکرد کنونی تامین‌کنندگان، قابلیت پیش‌بینی عملکرد آینده آن‌ها را نیز فراهم می‌کند. چنین ترکیبی، پیش از این در ادبیات انتخاب تامین‌کننده با تمرکز همزمان بر پایداری و تاب‌آوری زنجیره‌تامین در صنعت خودرو ارایه نشده و از این منظر دارای نوآوری روش‌شناختی مشخص و واضح است.

**کلیدواژه‌ها:** انتخاب تامین‌کننده، پایداری، تاب آوری، صنعت خودرو، الگوریتم جنگل تصادفی.

## ۱- مقدمه

در عصر رقابتی کنونی، زنجیره‌تامین به یکی از ارکان اساسی بقای سازمان‌ها در بازارهای جهانی تبدیل شده است. پیچیدگی روزافزون نیازهای مشتریان، فشارهای محیطی، تغییرات فناوری و نوسانات اقتصادی، ضرورت بازنگری در ساختارها و فرآیندهای زنجیره‌تامین را افزایش داده است [1]. مدیریت کارآمد زنجیره‌تامین، نقش محوری در کاهش هزینه‌ها، بهبود کیفیت خدمات، افزایش انعطاف‌پذیری در مواجهه با اختلالات و خلق

ارزش برای ذی‌نفعان ایفا می‌کند [2]. از این‌رو، مطالعه مسایل مرتبط با زنجیره‌تامین نه‌تنها به بهینه‌سازی منابع و فرآیندها کمک می‌کند، بلکه زمینه‌ساز کسب مزیت رقابتی پایدار و ارتقای جایگاه استراتژیک سازمان‌ها در عرصه ملی و بین‌المللی است [3]، [4].

مساله انتخاب تامین‌کننده یکی از تصمیمات حیاتی در مدیریت زنجیره‌تامین است که تاثیر مستقیمی بر کیفیت، هزینه، پایداری و انعطاف‌پذیری کل زنجیره دارد [5]. در شرایط پرچالشی مانند نوسانات بازار، الزامات زیست‌محیطی و پیشرفت‌های فناورانه، انتخاب دقیق و علمی تامین‌کنندگان می‌تواند نقش کلیدی در ارتقا عملکرد و رقابت‌پذیری سازمان ایفا کند. از این‌رو، ارزیابی تامین‌کنندگان به‌عنوان یک موضوع استراتژیک و پژوهشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [7]-[5].

از سویی، در سال‌های اخیر، توجه به ابعاد پایداری در مدیریت زنجیره‌تامین به یکی از الزامات کلیدی برای سازمان‌ها تبدیل شده است. شرکت‌ها تحت تاثیر فشارهای قانونی، اجتماعی و زیست‌محیطی ناچارند از رویکردهای سنتی فاصله گرفته و به سمت مدل‌های پایداری‌محور حرکت کنند. این رویکرد بر سه بعد اصلی استوار است: اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی [8]، [9]. بعد اجتماعی شامل رعایت حقوق کارگران، تامین شرایط کاری منصفانه و مسئولیت‌پذیری در برابر جوامع محلی است. بعد زیست‌محیطی بر کاهش اثرات منفی فعالیت‌ها از طریق بهینه‌سازی مصرف انرژی، استفاده از منابع تجدیدپذیر و مدیریت پسماند متمرکز است؛ همانند اقدام شرکت‌هایی که از بسته‌بندی‌های زیست‌تجزیه‌پذیر استفاده می‌کنند. در بعد اقتصادی نیز تمرکز از سود کوتاه‌مدت به پایداری مالی و تاب‌آوری در برابر اختلالات منتقل شده است؛ برای مثال، تنوع‌بخشی به منابع تامین در بحران‌هایی مانند همه‌گیری کرونا توانسته است مزیت رقابتی پایدارتری ایجاد کند؛ بنابراین، تحلیل زنجیره‌تامین با رویکرد پایداری، سازمان‌ها را قادر می‌سازد تا همزمان به اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی پاسخ دهند و نقش موثری در توسعه پایدار ایفا کنند [10]، [11].

از سویی دیگر، در شرایط پرریسک و ناپایدار کنونی که زنجیره‌های تامین بیش از هر زمان دیگری در معرض تهدیدات و اختلالات مختلف قرار دارند، مطالعه مسایل مرتبط با زنجیره‌تامین با تمرکز بر استراتژی‌های تاب‌آوری، اهمیتی بنیادین یافته است. مفهوم تاب‌آوری در زنجیره‌تامین به توانایی یک سیستم در پیش‌بینی، پاسخ‌دهی و بازیابی از اختلالات و بازگشت به سطح عملکرد قابل‌قبول در کوتاه‌ترین زمان ممکن اشاره دارد. برخلاف رویکردهای سنتی که عمدتا بر بهینه‌سازی هزینه و کارایی متمرکز بودند، رویکردهای مبتنی بر تاب‌آوری تلاش می‌کنند تا با ایجاد ظرفیت‌های انعطاف‌پذیر، سازمان‌ها را در برابر بحران‌های غیرمنتظره مقاوم سازند [14]-[12].

این استراتژی‌ها می‌توانند شامل متنوع‌سازی منابع تامین، افزایش شفافیت و دیدپذیری در کل زنجیره از طریق فناوری‌های دیجیتال، توسعه روابط مشارکتی با تامین‌کنندگان، ایجاد موجودی‌های استراتژیک و طراحی ساختارهای شبکه‌ای غیرمتمرکز باشند. به‌عنوان مثال، در طول همه‌گیری ویروس کرونا، سازمان‌هایی که از زنجیره‌های تامین تاب‌آورتری برخوردار بودند، توانستند با سرعت بیشتری خود را با شرایط جدید وفق دهند و پاسخگوی نیازهای بازار باقی بمانند [15]. از این‌رو، ادغام مفهوم تاب‌آوری در طراحی و مدیریت زنجیره‌های تامین نه‌تنها ضامن پایداری عملیاتی در مواجهه با بحران‌هاست، بلکه به سازمان‌ها کمک می‌کند تا مزیت رقابتی خود را در بازارهای پرنوسان حفظ کرده و از فرصت‌های به‌وجودآمده در شرایط بی‌ثبات بهره‌برداری کنند [18]-[16]؛ بنابراین، توسعه مدل‌ها و چارچوب‌های تحلیلی که ابعاد مختلف تاب‌آوری را در سطح زنجیره‌تامین بررسی کنند، گامی کلیدی در جهت مدیریت موثر اختلالات و ارتقای پایداری در سیستم‌های پیچیده تامین به‌شمار می‌آید.

از سویی دیگر، بر اساس گزارش انجمن بین‌المللی تولیدکنندگان وسایل نقلیه، صنعت خودروسازی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های اقتصادی در سراسر جهان شناخته می‌شود که نقشی کلیدی در رشد و توسعه پایدار بسیاری از کشورها ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، حوادث و بحران‌های گوناگون (نظیر اختلالات ناشی از همه‌گیری کرونا) نشان داده‌اند که پایداری و انعطاف‌پذیری زنجیره‌تامین خودرو، تاثیر مستقیمی بر تولید به‌موقع و کیفیت محصولات دارد. بنابر آمار موجود، سالانه میلیون‌ها دستگاه خودرو در نقاط مختلف جهان ساخته و عرضه می‌شود؛ تنوع بالای قطعات و مجموعه‌های مورد نیاز در این فرآیند، ضرورت توجه جدی به مسایل لجستیک و مدیریت زنجیره‌تامین در این صنعت را دوچندان کرده است [19]، [20].

یکی از مهم‌ترین چالش‌های زنجیره‌تامین در صنعت خودروسازی، انتخاب تامین‌کننده است. با توجه به پیچیدگی محصولات و تعداد زیاد قطعات مورد نیاز در ساخت خودرو، اتخاذ تصمیمات راهبردی درباره انتخاب و ارزیابی تامین‌کنندگان مناسب، تاثیر چشمگیری بر کاهش هزینه‌ها، تضمین کیفیت و افزایش رقابت‌پذیری شرکت‌های خودروساز دارد. هرگونه اختلال یا ضعف در فرآیند تامین قطعات می‌تواند باعث تاخیر در خطوط تولید، افزایش هزینه‌های اضافی و کاهش رضایت مشتریان شود [21]. ازاین‌رو، مطالعه روش‌های ارزیابی و انتخاب تامین‌کننده، توسعه مدل‌های تصمیم‌گیری دقیق و به‌کارگیری رویکردهای نوین مدیریت ریسک در انتخاب شریک تجاری، از مباحث حیاتی و ضروری در پژوهش‌های مرتبط با لجستیک و مدیریت زنجیره‌تامین در صنعت خودروسازی به‌شمار می‌آید.

با توجه به اهمیت مباحث مطرح‌شده، این پژوهش به ارزیابی تامین‌کنندگان صنعت خودروسازی با در نظر گرفتن استراتژی‌های پایداری، تاب‌آوری و نیز با رویکرد آینده‌نگر می‌پردازد. در این راستا، یک مدل تصمیم‌گیری داده‌محور ارایه می‌شود که شامل مراحل زیر است:

۱. شناسایی معیارها و زیرمعیارهای مرتبط با مساله تحقیق
۲. محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش بهترین-بدترین تصادفی[1]
۳. شناسایی تامین‌کنندگان بالقوه و ارزیابی عملکرد آن‌ها با بهره‌گیری از روش ویکور فازی
۴. پیش‌بینی عملکرد آینده تامین‌کنندگان با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین[2] (جنگل تصادفی)

تامین کلی، پژوهش حاضر به‌دنبال پاسخ به سوالاتی به شرح زیر می‌باشد:

۱. معیارهای ارزیابی تامین‌کنندگان در زنجیره‌تامین پایدار و تاب‌آور کدامند؟
۲. با اهمیت‌ترین معیارها و زیرمعیارهای پایداری و تاب‌آوری در ارزیابی تامین‌کنندگان صنعت خودرو کدامند؟
۳. تامین‌کنندگان برتر با توجه به معیارهای مساله تحقیق کدامند؟
۴. چگونه می‌توان با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین به ارزیابی کارایی تامین‌کنندگان پرداخت؟

## ۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در حوزه‌های مختلف زنجیره‌تامین انجام شده‌اند. همان‌طور که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، هدف اصلی این مطالعه، ارایه یک مدل تصمیم‌گیری داده‌محور، به‌منظور ارزیابی تامین‌کنندگان صنعت خودروسازی با در نظر گرفتن ابعاد پایداری و تاب‌آوری در زنجیره‌تامین است. به همین منظور، ابتدا مروری جامع بر پژوهش‌های صورت‌گرفته در حوزه ارزیابی تامین‌کنندگان زنجیره‌تامین که در آن‌ها حداقل یکی از استراتژی‌های پایداری و یا تاب‌آوری لحاظ شده است، گزارش می‌شود. در نهایت، شکاف‌های موجود در ادبیات شناسایی‌شده و جایگاه پژوهش حاضر در پوشش این خلاها تامین دقیق تبیین خواهد شد.

### ۲-۱- پایداری و تاب‌آوری در زنجیره‌تامین

امروزه، پایداری و تاب‌آوری به‌عنوان دو مفهوم کلیدی در مدیریت زنجیره‌تامین مطرح هستند که سازمان‌ها را در مواجهه با چالش‌های محیطی، اجتماعی و اقتصادی توانمند می‌سازند. پایداری به معنای تلاش برای دستیابی همزمان به اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است. به‌طور خاص، سازمان‌ها باید علاوه بر تحقق سودآوری مالی، اثرات منفی زیست‌محیطی فعالیت‌های خود را کاهش دهند و مسئولیت اجتماعی خود را در قبال کارکنان و جامعه محلی رعایت کنند [11].

[1] Stochastic Best-Worst Method (SBWM)
[2] Machine learning

در مقابل، تاب‌آوری به توانایی زنجیره‌تامین اشاره دارد که بتواند در برابر اختلالات و ناپایداری‌ها به‌سرعت واکنش نشان داده، خود را بازیابی کرده و فعالیت‌های خود را با حداقل وقفه ادامه دهد. این قابلیت شامل پیش‌بینی ریسک‌ها، پاسخ‌دهی به بحران‌ها، حفظ تداوم عملیات و ایجاد انعطاف‌پذیری در فرآیندها است [13]، [22].

طی سال‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی با هدف ترکیب این دو رویکرد در فرآیندهای زنجیره‌تامین انجام شده‌اند. در ادامه، مهم‌ترین مطالعات مرتبط در این حوزه مرور خواهد شد. در حوزه انتخاب تامین‌کننده پایدار در زنجیره‌تامین، تانگ و همکاران [23] با هدف حمایت از بنگاه‌های کوچک و متوسط که با فشارهای عملیاتی و قدرت چانه‌زنی محدود مواجه‌اند، چارچوبی برای ارزیابی تامین‌کنندگان پایدار طراحی کردند. آن‌ها با توسعه روش *PROMETHEE II* و ترکیب آن با پارامترهای ترجیحی ذهنی و مجموعه اصطلاحات زبانی احتمالاتی[1]، الگویی برای انتخاب تامین‌کننده ارایه دادند. مطالعه موردی در شرکت *M* در چین نشان داد که سه عامل هزینه، اعتبار و تخلفات شرکتی مهم‌ترین معیارهای ارزیابی عملکرد تامین‌کننده برای بنگاه‌های کوچک و متوسط هستند و روش پیشنهادی از اعتبار و کارایی بالایی برخوردار است.

در پژوهشی دیگر، کوسی–سارپونگ و همکاران [24] با هدف ارزیابی و انتخاب تامین‌کننده پایدار، چارچوبی تصمیم‌گیری مبتنی بر فناوری‌های نوین صنعتی در زمینه اجرای اقتصاد چرخشی طراحی کردند. آن‌ها با ترکیب مرور ادبیات و نظرات خبرگان صنعتی، چهار دسته معیار اصلی و بیست‌ویک زیرمعیار را شناسایی کرده و با استفاده از روش‌های بهترین- بدترین و ویکور، تامین‌کنندگان را در یک شرکت نساجی در پاکستان ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که زیرساخت و فناوری و فرهنگ سازمانی مثبت نسبت به اجرای فناوری‌های نوین و اقتصاد چرخشی بیشترین اهمیت را داشتند و تامین‌کننده شماره دو به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد.

در حوزه انتخاب تامین‌کنندگان تاب‌آور، نصراللهی و همکاران [25] با هدف شناسایی معیارهای انتخاب تامین‌کننده تاب‌آور در زنجیره‌تامین آب‌شیرین‌کن، ۸۹ معیار را از ادبیات گردآوری و سپس ۱۹ معیار اصلی را انتخاب کردند. با استفاده از دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره[2] مدلسازی ساختاری تفسیری[3] و دیمتل فازی، معیارهای محرک و روابط میان آن‌ها تحلیل شد. نتایج نشان داد که معیارهای مدیریت، وضعیت مالی و فرهنگ بیشترین تاثیرگذاری را دارند، درحالی‌که معیارهای خدمات، کیفیت، روابط، ظرفیت سازگاری و پاسخ‌گویی وابسته‌ترین معیارها بودند. نوآوری این پژوهش در استفاده از روش‌های *MCDM* برای مدلسازی معیارهای تاب‌آوری در زنجیره‌تامین آب‌شیرین‌کن است.

در پژوهشی دیگر، رضایی و کیونگ [26] با هدف طراحی شبکه زنجیره‌تامین و انتخاب تامین‌کننده تاب‌آور، یک مدل ریاضی دوهدفه برای چند محصول و چند دوره با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت ارایه دادند. آن‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته[4]، دو تابع هدف شامل بیشینه‌سازی سود و بیشینه‌سازی امتیاز تاب‌آوری تامین‌کنندگان را تعریف کردند. معیارهای تاب‌آوری و وزن آن‌ها با روش فازی ارزیابی همزمان معیارها و جایگزین‌ها[5] محاسبه شد و به کمک روش محدودیت اپسیلون، مقادیر بهینه متغیرها برای مطالعه موردی واقعی تعیین گردید. تحلیل پارتو نشان داد که در امتیاز تاب‌آوری ۴۰۰۰، بیشترین مقدار سود حاصل می‌شود و در نتیجه، می‌توان به انتخاب تامین‌کننده‌ای دست یافت که هم تاب‌آوری بالا و هم‌سود حداکثری دارد.

در پژوهشی، افراسیابی و همکاران [27] به مساله انتخاب تامین‌کننده با در نظر گرفتن شاخص‌های پایداری (اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی) و تاب‌آوری به‌ویژه پس از همه‌گیری کووید-۱۹ پرداختند. برای حل این مساله، از یک روش ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی شامل روش

[1] Probabilistic Linguistic Term Sets (PLTSs)
[2] Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)
[3] Interpretive Structural Modeling (ISM)
[4] Mixed-Integer Linear Programming (MILP)
[5] Simultaneous Evaluation of Criteria and Alternatives (SECA)

بهترین-بدترین و تحلیل رابطه خاکستری به‌همراه تاپسیس فازی استفاده کردند. مطالعه موردی در صنعت تولید نشان داد که معیارهای کنترل آلودگی، سیستم مدیریت زیست‌محیطی و آگاهی از ریسک بیشترین تاثیر را داشتند و همچنین پایداری مدل از طریق تحلیل حساسیت بررسی و تایید شد.

قمری و همکاران [28] به مساله انتخاب تامین‌کننده با در نظر گرفتن شاخص‌های پایداری و تاب‌آوری در صنعت فولاد پرداختند. آن‌ها با استفاده از *ISM* و تحلیل ماتریس تاثیرات متقابل ضربدری[1]، عوامل کلیدی را شناسایی و سپس با روش بهترین-بدترین وزن‌دهی کردند و در نهایت با روش تاپسیس تامین‌کنندگان را رتبه‌بندی نمودند. مطالعه موردی در شرکت فولاد گیلان نشان داد که در نظر گرفتن معیارهای تاب‌آوری باعث تغییر در نتایج رتبه‌بندی شد و عواملی چون شهرت، وجود تامین‌کننده پشتیبان، ذخایر استراتژیک و مسئولیت اجتماعی تامین‌کنندگان از اهمیت بالایی برخوردار بودند.

در پژوهشی دیگر، نیری و همکاران [29] به مساله انتخاب تامین‌کننده و تخصیص سفارش با در نظر گرفتن سه مفهوم کلیدی پاسخگویی، پایداری و تاب‌آوری پرداختند. برای این منظور، یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای ارایه کردند که در مرحله نخست با استفاده از روش جدید بهترین-بدترین فازی تصادفی به ارزیابی تامین‌کنندگان پرداخت و در مرحله دوم، از یک مدل چندهدفه و به‌دنبال آن از روش بهینه‌سازی مقاوم فازی-تصادفی مبتنی بر مدل‌های سری زمانی استفاده نمودند. مطالعه موردی در صنعت تجهیزات پزشکی نشان داد که چابکی، هزینه، انتشار گازهای گلخانه‌ای، کیفیت، تاب‌آوری و مدیریت پسماند از مهم‌ترین معیارها بودند و همچنین افزایش نرخ اختلالات اثر منفی بر شاخص‌های پایداری داشت.

رهنمای بناب و همکاران [30] با هدف انتخاب تامین‌کننده اینترنت اشیا[2] با در نظر گرفتن معیارهای پایداری و تاب‌آوری، رویکردی یکپارچه در محیط فازی کروی توسعه دادند. در این رویکرد، ابتدا معیارها با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی کروی وزن‌دهی شده و سپس تامین‌کنندگان با روش خودآموزی بدون نظارت مرتبط با وظیفه[3] ارزیابی و رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که کنترل آلودگی و ریسک‌پذیری به‌ترتیب مهم‌ترین زیرمعیارها بودند و پایداری روش پیشنهادی نیز از طریق تحلیل حساسیت و مقایسه با سایر روش‌های تصمیم‌گیری تایید شد.

در پژوهشی، شیخی زاده و همکاران [31] به بررسی نقش معیارهای ناب، چابک، تاب‌آور و سبز[4] در انتخاب تامین‌کننده زنجیره‌تامین دارویی پیش و پس از شیوع کووید-۱۹ پرداختند. آن‌ها با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چندشاخصه فازی ترکیبی، شامل روش بهترین-بدترین و ارزیابی نسبت افزایشی[5]، هجده زیرمعیار را ارزیابی و تامین‌کنندگان را رتبه‌بندی کردند. نتایج مطالعه موردی در صنعت دارو نشان داد که معیارهایی مانند کیفیت، همکاری، موجودی ایمنی و محیط‌زیست پیش از همه‌گیری و تحویل به‌موقع، زمان تاخیر، موجودی ایمنی و محیط‌زیست پس از همه‌گیری، اهمیت بیشتری داشتند.

بیات‌زاده و همکاران [6] به شناسایی و ارزیابی معیارهای انتخاب تامین‌کننده پایدار و تاب‌آور در صنعت فولاد با تمرکز بر مفاهیم صنعت ۵.۰ پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش دلفی فازی و بهترین-بدترین فازی، معیارهای مورد نظر را با نظر ۱۰ خبره ارزیابی و وزن‌دهی کردند. نتایج نشان داد که معیار انسان‌محوری بیشترین اهمیت را داشت و معیارهایی نظیر به‌کارگیری فناوری‌های صنعت ۴/۰و همکاری انسان و ربات نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند، در حالی که معیارهای سنتی مانند کیفیت و کاهش هزینه همچنان تاثیرگذار بودند.

ورچندی و همکاران [32] به مساله انتخاب تامین‌کننده با در نظر گرفتن توازن میان عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی همراه با حفظ تداوم کسب‌وکار پرداختند. آن‌ها با ترکیب روش بهترین-بدترین و روش فازی تاپسیس، رویکردی جدید ارایه دادند که با کاهش تعداد مقایسه‌های زوجی،

[1] Matrix Impacts Croisés Multiplication Appliquée à un Classement (MICMAC)
[2] Internet of Things (IoT)
[3] Task-Relevant Unsupervised Self-Training (TRUST)
[4] Lean, Agile, Resilient and Green (LARG)
[5] Additive Ratio ASsessment (ARAS)

فرآیند ارزیابی را ساده‌تر ساخت. مطالعه موردی در صنعت تجارت الکترونیک نشان داد که این مدل ضمن حفظ دقت، از پایداری و سازگاری بیشتری در رتبه‌بندی برخوردار بوده و انتخاب تامین‌کنندگانی توانمند در مقابله با اختلالات و عدم‌قطعیت‌ها را تسهیل کرده است.

بسرا و دیاز [33] به خلا موجود در ادبیات انتخاب تامین‌کننده در صنعت معدن با تمرکز بر معیارهای پایداری و تاب‌آوری پرداختند. آن‌ها با استفاده از رویکرد پژوهش سازنده و همکاری با بازیگران کلیدی صنعت، یک مدل ریاضی بهینه‌سازی برای ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان توسعه دادند. این مدل با در نظر گرفتن عواملی فراتر از هزینه، مانند اثرات زیست‌محیطی، مسئولیت اجتماعی و توانایی حفظ عرضه در شرایط بحرانی، ارزیابی جامع‌تری از تامین‌کنندگان ارایه داد و کاربرد عملی آن در صنعت معدن تایید شد.

لایلی و مسروره [34] در پژوهش خود با هدف طراحی مدلی تصمیم‌گیری برای انتخاب تامین‌کننده با تاکید بر معیارهای تاب‌آوری و پایداری، مطالعه‌ای موردی در یک شرکت بتن آماده انجام دادند. آن‌ها با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی[1] برای وزن‌دهی معیارها، مدل سیستم استنتاج فازی[2] برای تعیین شاخص وابستگی و ترکیبی از مدل‌های تحلیل پوششی داده‌ها و خودهمبسته[3] برای رتبه‌بندی نهایی، پنج تامین‌کننده جایگزین را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که از میان یازده زیرمعیار شناسایی‌شده، کیفیت، قیمت و انعطاف‌پذیری در پرداخت بالاترین امتیاز را داشتند و تامین‌کننده چهارم به‌عنوان بهترین گزینه با کارایی کامل انتخاب شد.

تاجعلی و همکاران [35] به مساله انتخاب تامین‌کننده و تخصیص سفارش با در نظر گرفتن ابعاد چابکی، تاب‌آوری و پایداری پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی وزن معیارها را تعیین کردند و با روش مجموع وزن‌دهی نرمال فازی، امتیاز تامین‌کنندگان مواد اولیه را محاسبه نمودند. سپس با توسعه یک مدل ریاضی و به‌کارگیری برنامه‌ریزی فازی مقاوم مبتنی بر داده و روش حل اجماع محدودیت برای تولید مسیر ممکن[4]، بهترین تامین‌کنندگان و میزان سفارش‌ها مشخص شدند. نتایج نشان داد که معیارهای پاسخ‌گویی، هزینه، کیفیت، تاب‌آوری و قابلیت اطمینان بیشترین اهمیت را داشتند و کارایی مدل پیشنهادی تایید شد. تاجعلی و همکاران [36] با هدف بررسی مساله انتخاب تامین‌کننده، سه مفهوم کلیدی پایداری، اقتصاد چرخشی و بقا را در ارزیابی تامین‌کنندگان صنعت خودروسازی مدنظر قرار دادند. آن‌ها با ترکیب یادگیری ماشین و روش‌های تصمیم‌گیری، مدلی ترکیبی توسعه دادند که در آن از روش *LGPSBWM* برای وزن‌دهی ابعاد و از الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبان وزن‌دار ایمن[5] برای ارزیابی عملکرد تامین‌کنندگان استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص‌هایی نظیر پاسخ‌گویی، قابلیت اطمینان، هزینه، کیفیت، مدیریت پسماند و انتشار گازهای گلخانه‌ای بیشترین اهمیت را دارند و دو تامین‌کننده به‌عنوان گزینه‌های برتر انتخاب شدند. **جدول ۱** خلاصه‌ای از پژوهش‌های موردبررسی را نشان می‌دهد.

**جدول ۱- بررسی اجمالی تحقیقات پیشین.**
**Table 1- Overview of previous research.**

| محقق | پایداری | تاب آوری | یادگیری ماشین | مطالعه موردی | روش حل |
|---|---|---|---|---|---|
| تانگ و همکاران [23] | ✓ | - | - | - | PROMETHEE II، پارامترهای ترجیحی ذهنی و مجموعه PLTS |
| کوسی-سارپونگ و همکاران [24] | ✓ | | - | شرکت نساجی | روش بهترین-بدترین و روش ویکور |
| نصراللهی و همکاران [25] | | ✓ | - | صنعت آب شیرکن | ISM، دیمتل فازی |
| رضایی و کیونگ [26] | | ✓ | - | - | محدودیت اپسیلون، روش فازی SECA |

[1] Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)
[2] Fuzzy Inference System (FIS)
[3] Data Envelopment Analysis (DEA) and Autoregressive (AR) models (DEA/AR)
[4] Constraint Consensus for Feasible Path Generation (CCFGP)
[5] Safe Weighted Support Vector Machines (SWSVM)

**جدول ۱- ادامه.**
**Table 1- Continued.**

| محقق | پایداری | تاب‌آوری | یادگیری ماشین | مطالعه موردی | روش حل |
|---|---|---|---|---|---|
| افراسیابی و همکاران [27] | ✓ | ✓ | - | صنعت تولید | بهترین-بدترین، تحلیل رابطه خاکستری، تاپسیس فازی |
| قمری و همکاران [28] | ✓ | ✓ | - | صنعت فولاد | ISM و تحلیل MICMAC، بهترین بدترین، تاپسیس |
| نیری و همکاران [29] | ✓ | ✓ | - | تجهیزات پزشکی | SBWM، بهینه‌سازی استوار فازی-تصادفی |
| رهنمای بناب و همکاران [30] | ✓ | ✓ | - | - | روشTRUST، بهترین بدترین فازی |
| شیخ زاده و همکاران [31] | ✓ | ✓ | - | صنعت دارو | بهترین-بدترین، ARAS |
| بیات زاده و همکاران [6] | ✓ | ✓ | - | صنعت تجارت الکترونیک | ترکیبی از روش بهترین-بدترین و روش فازی تاپسیس |
| بسرا و دیاز [33] | ✓ | ✓ | - | صنعت معدن | رویکرد تحقیق سازنده[1] |
| لایلی و مسروره [34] | ✓ | ✓ | - | شرکت بتن | FIS ،FAHP |
| تاجعلی و همکاران [35] | ✓ | ✓ | - | - | بهترین-بدترین فازی، روش مجموع وزن دهی، برنامه‌ریزی استوار فازی |
| تاجعلی و همکاران [36] | ✓ | ✓ | ✓ | - | روش LGPSBWM، الگوریتم SWSVM |
| پژوهش حاضر | ✓ | ✓ | ✓ | صنعت خودروسازی | SBWM، روش ویکور تصادفی، الگوریتم جنگل تصادفی |

## ۲-۲- شکاف‌های پژوهش

با توجه به‌مرور ادبیات انجام‌شده، اگرچه در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان پایدار و تاب‌آور انجام شده است، اما همچنان شکاف‌های پژوهشی قابل‌توجهی در این حوزه وجود دارد. نخستین شکاف، کمبود پژوهش‌هایی است که در شرایط عدم قطعیت تصادفی به ارزیابی تامین‌کنندگان پرداخته باشند. به بیان دیگر، اکثر مطالعات موجود یا از رویکردهای قطعی استفاده کرده‌اند و یا صرفا ابعاد محدود عدم قطعیت را لحاظ نموده‌اند، در حالی‌که تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده و ناپایدار امروزی مستلزم در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تصادفی و سناریوهای متنوع است. دومین شکاف نیز، کمبود مطالعاتی است که از رویکردهای داده‌محور و الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد آینده تامین‌کنندگان در صنعت خودروسازی بهره برده باشند؛ به عبارت دیگر، تحلیل‌های سنتی عمدتا بر مبنای داده‌های تاریخی انجام گرفته و کمتر به تحلیل‌های پیش‌بینی آینده‌محور توجه داشته‌اند.

این پژوهش با ارایه یک مدل تصمیم‌گیری داده‌محور و جامع که تامین یکپارچه به ابعاد پایداری و تاب‌آوری توجه دارد، سهم قابل‌توجهی در پر کردن شکاف‌های یادشده ایفا کرده است. مدل پیشنهادی شامل سه مرحله اصلی است: ابتدا وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارهای مهم از طریق *SBWM*

[1] Constructive research approach

انجام شده که امکان مواجهه کارآمد با عدم قطعیت‌های تصادفی را فراهم می‌کند. سپس، تامین‌کنندگان با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ویکور تصادفی ارزیابی شده‌اند که موجب می‌شود گزینه‌ها در شرایط پیچیده و چندمعیاره به‌صورت دقیق اولویت‌بندی شوند. در مرحله سوم، استفاده از الگوریتم رگرسیون جنگل تصادفی[1] برای پیش‌بینی عملکرد آینده تامین‌کنندگان موجب افزایش دقت تصمیمات و کاهش ریسک‌های عملیاتی شده است.

این پژوهش با یکپارچه‌سازی روش‌های پیشرفته *MCDM* و تحلیل داده‌محور، مدلی ارایه داده که نه‌تنها ابعاد مختلف پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) و تاب‌آوری را همزمان پوشش می‌دهد، بلکه قابلیت پیش‌بینی و آینده‌نگری را به فرآیند تصمیم‌گیری افزوده است. نوآوری این تحقیق، ترکیب سه روش *SBWM*، ویکور تصادفی و جنگل تصادفی در یک چارچوب واحد به‌منظور ارزیابی تامین‌کنندگان است که برای اولین بار در صنعت خودروسازی به‌کار گرفته شده است. این مدل نه‌تنها از نظر علمی موجب توسعه نظری حوزه مدیریت زنجیره‌تامین پایدار و تاب‌آور شده، بلکه از جنبه عملی نیز الگوی جامعی برای صنعت خودرو و سایر صنایع مشابه فراهم آورده است.

## ۳- روش تحقیق

همان‌گونه که در بخش مقدمه پژوهش اشاره شد، هدف اصلی این مطالعه ارایه یک مدل تصمیم‌گیری داده‌محور به‌منظور ارزیابی تامین‌کنندگان زنجیره‌تامین، با در نظر گرفتن همزمان استراتژی‌های پایداری و تاب‌آوری با رویکردی آینده‌نگر است. در این چارچوب، یک مدل تصمیم‌گیری سه‌مرحله‌ای طراحی شده است که در ادامه، مراحل مختلف این مدل و روش‌های مورد استفاده در هر مرحله به تفصیل تشریح خواهند شد. **شکل ۱**، نمای کلی فرآیند پژوهش و مراحل اجرای آن را نمایش می‌دهد.

**شکل ۱- چارچوب تحقیق و مراحل اجرا.**
**Figure 1- Research framework and execution steps.**

### ۳-۱- SBWM

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، در این پژوهش برای تعیین وزن معیارها در مدل پیشنهادی، از روش *SBWM* استفاده شده است که نسخه‌ای توسعه‌یافته از روش بهترین–بدترین سنتی است، به‌منظور مواجهه با شرایط عدم قطعیت و بر پایه تحلیل سناریوها طراحی شده است [37]. روش اصلی توسط رضایی [38] معرفی شد و با کاهش چشمگیر تعداد مقایسات زوجی نسبت به روش‌هایی مانند روش تحلیل سلسله مراتبی، مزایایی همچون کاهش بار محاسباتی، دقت بالاتر و سهولت ترکیب با سایر روش‌های تصمیم‌گیری را به همراه دارد [39]-[41]. در نسخه تصادفی این روش، مقایسات زوجی بین بهترین و بدترین معیار با سایر معیارها در قالب سناریوهای مختلف (مانند سناریوهای خوش‌بینانه، بدبینانه و محتمل) انجام می‌گیرد. این فرآیند منجر به شکل‌گیری بردارهای مقایسات زوجی برای هر سناریو می‌شود. سپس، با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه، وزن

[1] Random Forest Regression

نهایی معیارها محاسبه می‌گردد [37]. مدل ریاضی بهینه‌سازی پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده است که نرخ ناسازگاری در هر سناریو ($\xi_s$) را به حداقل رسانده و وزن نهایی هر معیار را بر اساس احتمال وقوع سناریوها تعیین می‌کند. به‌صورت خلاصه، مراحل زیر در اجرای روش طی می‌شود:

۱. شناسایی بهترین و بدترین معیارها بر اساس نظر خبرگان
۲. تعریف سناریوها با احتمال وقوع مشخص برای هرکدام (مانند ۵۰% شرایط عادی، ۱۰% همه‌گیری و ۴۰% آتش‌سوزی) و انجام مقایسات زوجی بین بهترین معیار و سایر معیارها و همچنین بین سایر معیارها و بدترین معیار با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف
۳. حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی مبتنی بر سناریو (مدل زیر) برای به‌دست‌آوردن وزن نهایی معیارها با هدف کمینه‌سازی مجموع نرخ ناسازگاری‌ها در همه سناریوها

$$Min \sum_s P_s.\xi_s,$$

$$\left|ws_{Bs} - a_{Bjs}.ws_{js}\right| \le \xi_s, \qquad for\ all\ j,s,$$

$$\left|ws_{js} - a_{jWs}.ws_{Ws}\right| \le \xi_s, \qquad for\ all\ j,s,$$

$$\sum_j ws_{js} = 1, \qquad for\ all\ s,$$

$$w_j = \sum_s P_s.ws_{js}, \qquad for\ all\ j,$$

$$\mathrm{ws_{js}}, \mathrm{w_j} \ge 0, \quad for\ all\ j,s.$$

در مدل بالا، پارامترهای $P_s$، $a_{Bjs}$، $a_{jWs}$ به ترتیب احتمال رخداد هر سناریو، مقایسات زوجی بهترین معیار با معیار $j$ و مقایسات زوجی معیار $j$ با بدترین معیار تحت سناریو $s$ می‌باشد. همچنین متغیرهای تصمیم شامل، $\xi_s$، $WS_{js}$، $W_j$ میزان نرخ ناسازگاری، وزن معیار $j$ و وزن نهایی معیار $j$ در سناریو $s$ است. این رویکرد، نه‌تنها دقت محاسبه وزن‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه به‌صورت واقع‌گرایانه‌تری تاثیر شرایط مختلف محیطی و عملیاتی را در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ می‌کند.

## ۲-۳- روش ویکور تصادفی

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان برتر، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ویکور تصادفی استفاده شده است. این روش با هدف نزدیک‌کردن گزینه‌ها به راه‌حل ایده‌آل، به تحلیل عملکرد آن‌ها در سناریوهای مختلف می‌پردازد. ویکور تصادفی با لحاظ احتمال وقوع سناریوها و وزن معیارها، امکان انتخاب بهینه در شرایط پیچیده و عدم قطعیت را فراهم می‌سازد [42]. مراحل اجرای این روش به‌صورت زیر است:

۱. ساخت ماتریس تصمیم‌گیری: ایجاد ماتریسی شامل امتیازات گزینه‌ها (تامین‌کنندگان) نسبت به معیارهای مختلف در سناریوهای مختلف. ماتریس تصمیم‌گیری در روش ویکور تصادفی شامل مجموعه‌ای از سناریوها، احتمال وقوع هر سناریو، مجموعه معیارها و مجموعه گزینه‌ها می‌باشد که به ترتیب با $Sr = \{sr_1, sr_2, \dots, sr_s\}$ ، $Ps_s$ ، $C = \{c_1, c_2, \dots, c_i\}$ و $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$ نشان داده می‌شود.
۲. نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری: در این گام تبدیل داده‌ها به مقیاس یکسان جهت مقایسه‌پذیری با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود که $x_{ijs}$ برابر با نمره گزینه $j$ درمعیار در سناریوی $s$ می‌باشد.

$$n_{jis} = \frac{x_{ijs}}{\sqrt{x_{jis}^2}}.$$

۳. تشکیل ماتریس نرمال‌سازی‌شده وزنی: اعمال وزن معیارها و احتمال سناریوها به داده‌های نرمال‌شده به‌منظور محاسبه ماتریس نرمال‌شده وزنی با استفاده از رابطه زیر انجام می‌شود.

$$f_{jis} = Ps_s \times n_{jis} \times w_i.$$

۴. محاسبه نقاط ایده‌آل مثبت و منفی: تعیین بهترین و بدترین مقدار برای هر معیار در هر سناریو. در این گام، اگر معیار دارای ماهیت مثبت باشد، نقطه ایده‌آل مثبت ($f_s^+$) برابر با بیشترین مقدار در ستون آن سناریو و نقطه ایده‌آل منفی ($f_s^-$) برابر با کمترین مقدار در ستون آن سناریو می‌باشد. همچنین اگر معیار دارای ماهیت منفی باشد، نقطه ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی به‌ترتیب برابر با کمترین مقدار و بیشترین مقدار در ستون سناریو می‌باشد.

۵. محاسبه مقادیر سودمندی $(S)$ و پشیمانی $:(R)$ ارزیابی عملکرد هر گزینه با توجه به فاصله از مقادیر ایده‌آل با استفاده از روابط زیر به‌دست می‌آید.

$$L_{js} = \sum_i \frac{f_s^+ - f_{ijs}}{f_s^+ - f_s^-}.$$

$$SS_j = \sum_s Ps_s \times L_{js}.$$

$$T_{js} = max\left\{\frac{f_s^+ - f_{ijs}}{f_s^+ - f_s^-}\right\}.$$

$$R_j = \sum_s Ps_s \times T_{js}.$$

۶. محاسبه شاخص ویکور: در این گام، مقدار شاخص ویکور برای گزینه‌های تصمیم، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$Q_j = v \times \left[\frac{SS_j - SS^*}{SS^- - SS^*}\right] + (1-v) \times \left[\frac{R_j - R^*}{R^- - R^*}\right].$$

$$SS^- = max\{SS_j\}, \quad SS^* = min\{SS_j\}.$$

$$R^- = max\{R_j\}, \quad \mathrm{R^*} = \min\{\mathrm{R_j}\}.$$

۷. رتبه‌بندی و انتخاب گزینه برتر: در این گام، اولویت‌بندی گزینه‌ها بر اساس مقادیر $Q$ و بررسی شرایط توافق برای انتخاب نهایی انجام می‌شود. شرایط توافق به شرح زیر می‌باشد:

- شرط اول: درصورتی‌که گزینه‌های $a'$ و $a''$ در بین $m$ گزینه، دارای رتبه اول و دوم باشد، رابطه زیر باید برقرار باشد:

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ$$

$$Q = \frac{1}{m-1}(DQ = 0.25\ if\ m \leq 4)$$

- شرط دوم: گزینه $a'$ که دارای رتبه اول است، باید حداقل در یکی از گروه‌های $R$ و S نیز دارای رتبه اول باشد. اگر هر دو شرط برقرار باشد، رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس مقدار شاخص ویکور خواهد بود. در غیر این‌صورت، گزینه‌های $a'$ و $a''$ به‌عنوان برترین گزینه‌ها انتخاب می‌شوند.

### ۳-۳- الگوریتم جنگل تصادفی

در این پژوهش، به‌منظور پیش‌بینی دقیق و قابل‌اعتماد امتیاز کارایی تامین‌کنندگان، از الگوریتم رگرسیون جنگل تصادفی استفاده شده است. این الگوریتم با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم، توانایی مدلسازی روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرها را دارد و با ترکیب خروجی‌های چندین درخت، از بیش برازش[1] جلوگیری کرده و دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد [43]. مزیت‌های کلیدی آن شامل پایداری در مواجهه با داده‌های نویزی، امکان پردازش داده‌های حجیم و متنوع و قابلیت تفسیر نتایج از طریق تحلیل اهمیت ویژگی‌ها است [44]، [45]. فرآیند اجرای این مدل شامل مراحل زیر است [46]–[48]:

۱. جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها: شامل پاک‌سازی، نرمال‌سازی و تبدیل متغیرهای طبقه‌ای به عددی
۲. تقسیم‌بندی داده‌ها به مجموعه‌های آموزش، اعتبارسنجی (در صورت نیاز) و آزمون

[1] Overfitting

۳. ساخت درختان تصمیم با بازنمونه‌گیری تصادفی و انتخاب زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها در هر گره
۴. ترکیب پیش‌بینی‌ها از طریق میانگین‌گیری از خروجی درخت‌ها
۵. تنظیم پارامترها مانند تعداد درختان، عمق، حداقل نمونه‌ها برای تقسیم و برگ
۶. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از معیارهایی نظیر میانگین قدرمطلق خطا[1] و میانگین مربعات خطا[2]
۷. تحلیل اهمیت ویژگی‌ها برای شناسایی عوامل موثر در کارایی تامین‌کنندگان
۸. بهینه‌سازی و تکرار مراحل برای ارتقا دقت و کارایی مدل نهایی

استفاده از این الگوریتم در پژوهش حاضر به دلیل تطابق بالا با ویژگی‌های مساله و قابلیت کاربردی آن در تصمیم‌گیری مدیریتی انتخاب شده است.

## ۴- مطالعه موردی

در این تحقیق، مساله ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان پایدار و تاب‌آور در شرکت سایپا کاشان، به‌عنوان یکی از شرکت‌های شاخص در صنعت خودروسازی کشور، موردبررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در بخش پیشینه پژوهش بررسی شد، مطالعات گسترده‌ای در حوزه شناسایی معیارها و زیرمعیارهای مرتبط با پایداری و تاب‌آوری در انتخاب تامین‌کننده انجام شده است. در **جدول ۲**، مهم‌ترین زیرمعیارهای هر یک از این دو بعد با مطالعه ادبیات پژوهش، استخراج و دسته‌بندی شده‌اند. شایان ذکر است که امروزه یکی از معتبرترین استانداردهای جهانی برای گزارش‌دهی و ارزیابی پایداری شرکت‌ها، استاندارد گزارش‌دهی پایداری[3] است. در این استاندارد مجموعه‌ای جامع از شاخص‌ها و معیارها برای سنجش عملکرد پایداری در سه بعد زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی ارایه شده است. در پژوهش حاضر، معیارهای مرتبط با ارزیابی تامین‌کنندگان پایدار با در نظر گرفتن انطباق با استاندارد *GRI* انتخاب شده‌اند. به‌عنوان نمونه، معیارهایی مانند کاهش مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدیریت پسماند، ظرفیت مالی و شرایط کاری و قرارداد کارگران از جمله شاخص‌هایی هستند که دقیقا بر اساس شاخص‌های تعریف‌شده در استاندارد *GRI* شناسایی و در این پژوهش استفاده شده‌اند. استفاده از این استاندارد معتبر، ضمن افزایش اعتبار نظری پژوهش، ارتباط نتایج را با چارچوب‌های بین‌المللی ارزیابی پایداری تقویت می‌کند.

**جدول ۲- زیرمعیارهای پایداری و تاب‌آوری.**
**Table 2- Sustainability and resiliency sub-criteria.**

| بعد | شماره | زیرمعیار | تعریف | منابع |
|---|---|---|---|---|
| پایداری | 1 | کاهش مصرف انرژی | بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اتلاف آن در فرآیندهای عملیاتی | [25]، [49] |
| | 2 | کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای | مقدار گازهای آلاینده تولیدشده | [50] |
| | 3 | سلامتی و ایمنی شغلی | تامین محیط کاری ایمن و سالم برای کارکنان به‌منظور پیشگیری از حوادث و آسیب‌ها در محل کار | [51]، [52] |
| | 4 | مشارکت در توسعه محلی | مشارکت فعال در پروژه‌های اجتماعی و اثرگذاری مثبت بر جامعه محلی محل فعالیت تامین‌کننده (نظیر اشتغال‌زایی یا حمایت از توسعه محلی) | [53]، [54] |
| | 5 | ظرفیت مالی | توانایی تامین‌کننده در در مدیریت منابع مالی برای اجرای اقدامات پایدار و مقابله با بحران‌های اقتصادی | [55]، [56] |
| | 6 | استفاده از منابع تجدید پذیر | بهره‌گیری از منابع پایدار مانند انرژی خورشیدی یا مواد اولیه قابل بازیافت در فعالیت‌های زنجیره‌تامین | [19]، [32] |

[1] Mean Absolute Error (MAE)
[2] Mean Squared Error (MSE)
[3] Global Reporting Initiative (GRI)

**جدول ۲- ادامه.**
**Table 2- Continued.**

| بعد | شماره | زیرمعیار | تعریف | منابع |
|---|---|---|---|---|
| | 7 | مدیریت پسماند | فرآیندهای برنامه‌ریزی و کنترل برای کاهش، بازیافت یا دفع مناسب پسماندهای ناشی از عملیات تولید و توزیع | [57] |
| | 8 | خرید سبز | درجه تعهد تامین‌کننده به استفاده از مواد و فرآیندهای دوست‌دار محیط‌زیست در تولید کالاها و خدمات | [27]، [58] |
| | 9 | حقوق بانوان | پایبندی تامین‌کننده به رعایت حقوق قانونی، شرایط منصفانه کاری و حفظ رفاه و ایمنی کارکنان در زنجیره‌تامین | [59]، [60] |
| | 10 | قرارداد کارگران | رعایت استانداردهای کاری، امنیت شغلی و حقوق قانونی کارگران در طول زنجیره‌تامین | [9] |
| تاب‌آوری | 1 | ظرفیت ترمیمی | توانایی و سطح تامین‌کننده در مدیریت ظرفیت | [13]، [61] |
| | 2 | تامین‌کنندگان پشتیبان | انعقاد قرارداد با تامین‌کنندگان پشتیبان به‌منظور مقابله با مشکلات تامین در زمان اختلالات | [5]، [37] |
| | 3 | تنوع منابع | میزان تنوع تامین‌کنندگان به‌منظور کاهش ریسک ناشی از اختلال در تامین | [62] |
| | 4 | پیش‌بینی | سطح تامین‌کننده در پیش‌بینی مشکلات احتمالی برای جلوگیری از اختلالات | [34]، [58] |
| | 5 | قابلیت پاسخگویی | توانایی تامین‌کننده در واکنش سریع و موثر به تغییرات ناگهانی یا بحران‌ها | [58]، [63] |
| | 6 | مسیریابی مجدد | امکان تغییر مسیرهای حمل‌ونقل یا لجستیکی در شرایط اضطراری یا اختلال | [64]، [65] |
| | 7 | منبع یابی | توانایی یافتن و جایگزینی سریع منابع جدید در صورت بروز اختلال در زنجیره‌تامین | [66] |
| | 8 | سطح موجودی ایمنی | مقدار موجودی نگهداری‌شده برای مقابله با نوسانات تقاضا یا تاخیرهای تامین | [13]، [33] |
| | 9 | همکاری و شفافیت | سطح تعامل، تبادل اطلاعات و هماهنگی میان شرکای زنجیره‌تامین برای مقابله با ریسک‌ها | [63]، [67] |

این دسته‌بندی به درک بهتر ابعاد کلیدی انتخاب تامین‌کنندگان پایدار و تاب‌آور کمک می‌کند و مبنای انتخاب معیارهای تحقیق حاضر قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، با توجه به گستردگی و تنوع معیارهای مطرح در ادبیات موضوع، مکانیزم انتخاب زیرمعیارهای پژوهش بر پایه یک رویکرد ترکیبی و چندمرحله‌ای شکل گرفته است. ابتدا با مرور جامع ادبیات و استخراج زیرمعیارهای کلیدی پایداری و تاب‌آوری، فهرستی اولیه از معیارها تهیه گردید. سپس این فهرست با توجه به ویژگی‌های خاص صنعت خودرو و شرایط ملی کشور، از طریق مشورت با خبرگان و متخصصان صنعت خودروسازی (شرکت سایپا کاشان) مورد بازبینی و پالایش قرار گرفت تا معیارهای متناسب و عملیاتی‌تر انتخاب شوند.

به‌منظور جمع‌آوری داده‌های موردنیاز، از نظرات کارشناسان متخصص بهره‌گیری شده که مشخصات آن‌ها در **جدول ۳** ارایه شده است. این افراد از طریق تکمیل پرسشنامه‌های طراحی‌شده، در فرآیند گردآوری داده‌ها مشارکت داشته‌اند. در این مطالعه، معیارهای مساله تحقیق در سه بعد کلی شامل معیارهای عمومی، پایداری، تاب‌آوری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که توضیحات مربوط به هر یک به‌صورت تفصیلی در **جدول ۴** تا **۶** آمده است. در نهایت، وزن‌دهی و تعیین اهمیت نسبی زیرمعیارهای منتخب، با استفاده از *SBWM* انجام شد. این روش علاوه‌بر دقت بالا، امکان در نظر گرفتن سناریوهای مختلف و عدم قطعیت‌های محیطی را فراهم می‌کند و موجب شد که وزن نهایی معیارها به‌صورت داده‌محور و با لحاظ شرایط مختلف اقتصادی و عملیاتی تعیین شود. به این ترتیب، مکانیزم انتخاب زیرمعیارها ضمن حفظ جامعیت و اعتبار علمی، سازگاری بالایی با شرایط واقعی و نیازهای صنعت خودروسازی کشور دارد.

**جدول ۳- مشخصات کارشناسان شرکت‌کننده در پژوهش.**
**Table 3- Profile of experts participating in the study.**

| رده‌بندی شغلی | سابقه کاری | تحصیلات |
|---|---|---|
| مدیر تولید | 7 | دکتری مدیریت صنعتی |
| کارشناس تحقیق و توسعه | 11 | کارشناسی ارشد مهندسی صنایع |
| مدیریت لجستیک | 5 | کارشناسی ارشد مهندسی صنایع |

**جدول ۴- زیرمعیارهای عمومی.**
**Table 4- General sub-criteria.**

| شماره | معیار | تعریف | منابع |
|---|---|---|---|
| 1 | هزینه | کلیه مخارج صرف‌شده در زنجیره‌تامین | [69]، [68] |
| 2 | کارایی | میزان کارآمدی در بهره‌گیری از منابع زنجیره‌تامین | [70]، [63] |
| 3 | زمان تحویل | بازه زمانی موردنیاز در بهره‌گیری از منابع زنجیره‌تامین | [71] |
| 4 | انعطاف‌پذیری | قابلیت زنجیره‌تامین در سازگاری با تغییرات و ناپایداری‌ها | [65]، [60] |
| 5 | کیفیت | سطح تامین‌کننده از نظر کیفیت ارایه خدمات | [72] |

**جدول ۵- زیرمعیارهای پایداری.**
**Table 5- Sustainability sub-criteria.**

| شماره | معیار | تعریف | منابع |
|---|---|---|---|
| 1 | کاهش مصرف انرژی | بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اتلاف آن در فرآیندهای عملیاتی | [49]، [25] |
| 2 | انتشار گازهای گلخانه‌ای | مقدار گازهای آلاینده تولیدشده | [50] |
| 3 | ظرفیت مالی | توانایی تامین‌کننده در مدیریت منابع مالی برای اجرای اقدامات پایدار و مقابله با بحران‌های اقتصادی | [56]، [55] |
| 4 | استفاده از منابع تجدیدپذیر | بهره‌گیری از منابع پایدار مانند انرژی خورشیدی یا مواد اولیه قابل بازیافت در فعالیت‌های زنجیره‌تامین | [19]، [32] |
| 5 | مدیریت پسماند | فرآیندهای برنامه‌ریزی و کنترل برای کاهش، بازیافت یا دفع مناسب پسماندهای ناشی از عملیات تولید و توزیع | [57] |
| 6 | قرارداد کارگران | رعایت استانداردهای کاری، امنیت شغلی و حقوق قانونی کارگران در طول زنجیره‌تامین | [9] |

**جدول ۶- زیرمعیارهای تاب‌آوری.**
**Table 6- Resilience sub-criteria.**

| شماره | شاخص | تعریف | منابع |
|---|---|---|---|
| 1 | تنوع منابع | میزان تنوع تامین‌کنندگان به‌منظور کاهش ریسک ناشی از اختلال در تامین | [62] |
| 2 | قابلیت پاسخگویی | توانایی تامین‌کننده در واکنش سریع و موثر به تغییرات ناگهانی یا بحران‌ها | [58]، [63] |
| 3 | مسیریابی مجدد | امکان تغییر مسیرهای حمل‌ونقل یا لجستیکی در شرایط اضطراری یا اختلال | [64]، [65] |
| 4 | منبع‌یابی | توانایی یافتن و جایگزینی سریع منابع جدید در صورت بروز اختلال در زنجیره‌تامین | [66] |
| 5 | سطح موجودی ایمنی | مقدار موجودی نگهداری‌شده برای مقابله با نوسانات تقاضا یا تاخیرهای تامین | [13]، [33] |
| 6 | همکاری و شفافیت | سطح تعامل، تبادل اطلاعات و هماهنگی میان شرکای زنجیره‌تامین برای مقابله با ریسک‌ها | [63]، [67] |

## ۵- نتایج عددی

### ۵-۱- نتایج SBWM

همان‌گونه که پیش‌تر در بخش‌های ابتدایی تحقیق مطرح شد، جهت تعیین وزن معیارها و زیرمعیارهای مرتبط با مساله پژوهش، از *SBWM* بهره گرفته شده است. در این چارچوب، داده‌های مورد نیاز از طریق تکمیل پرسشنامه توسط سه تن از کارشناسان کلیدی شرکت هدف که مشخصات آن‌ها در **جدول ۳** درج گردیده، گردآوری شده است. این افراد با توجه به تجربه و دانش خود، بردارهای مقایسه زوجی را برای سه سناریوی متمایز ارایه داده‌اند که در ادامه مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. به‌منظور اطمینان از قابلیت اتکای داده‌ها، میانگین نظرات پاسخ‌دهندگان به‌عنوان مبنای اجرای مدل در نظر گرفته شده است.

سه سناریوی اصلی برای تحلیل شرایط مختلف محیطی تعریف شده‌اند: سناریوی اول (*S1*) نشان‌دهنده وضعیت‌های خوش‌بینانه نظیر دوره‌های رشد اقتصادی است، سناریوی دوم (*S2*) نمایانگر وضعیت‌های متعارف مانند شرایط پایدار بازار و صنعت و سناریوی سوم (*S3*) معرف وضعیت‌های بحرانی از جمله رکود اقتصادی یا شوک‌های غیرمنتظره می‌باشد. احتمال وقوع هر یک از این سناریوها به‌ترتیب برابر با ۰٫۳، ۰٫۵۵ و ۰٫۱۵ در نظر

گرفته شده است. بر این اساس، نتایج مقایسه زوجی بین بهترین معیار با سایر معیارها و نیز سایر معیارها با بدترین معیار، با توجه به سه سناریوی ذکرشده در **جدول‌های ۶** و **۷** آمده است. به‌علاوه، بر اساس نظر خبرگان، معیار پایداری به‌عنوان بهترین و معیار عمومی به‌عنوان بدترین انتخاب شده‌اند. در گام بعد، به‌منظور محاسبه وزن نهایی معیارها، از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی سناریو محور بهره گرفته شد که هدف اصلی آن، حداقل‌سازی مقدار مورد انتظار نرخ ناسازگاری می‌باشد.

**جدول ۱۴** وزن نهایی معیارها و زیرمعیارهای مساله تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌طور که در **جدول ۷** مشاهده می‌شود، در سطح معیارهای اصلی، سه دسته عمومی، پایداری و تاب‌آوری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. معیار پایداری با وزن ۰٫۳۴۵۹ به‌عنوان مهم‌ترین بعد شناسایی‌شده است که نشان‌دهنده تمرکز روزافزون بر الزامات زیست‌محیطی و اجتماعی در زنجیره‌تامین است. پس از آن، تاب‌آوری با وزن ۰٫۳۳۵۸ و معیار عمومی با وزن ۰٫۳۲۹۵ در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. فاصله‌ی کم بین این سه مقدار نشان می‌دهد که هر سه بعد از اهمیت قابل‌توجهی در تصمیم‌گیری برخوردارند و باید به‌صورت یکپارچه در مدلسازی مد نظر قرار گیرند.

در میان زیرمعیارهای مربوط به معیار عمومی، هزینه (0.0860) و کیفیت (0.0673) بالاترین وزن را دارند که نشان‌دهنده تمرکز تصمیم‌گیرندگان بر جنبه‌های اقتصادی و عملکردی است. در حوزه پایداری، کاهش مصرف انرژی (0.0745) و انتشار گازهای گلخانه‌ای (0.0659) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل زیست‌محیطی ارزیابی شده‌اند، درحالی‌که قرارداد کارگران نیز با وزن ۰٫۰۶۳۳، بعد اجتماعی پایداری را برجسته می‌سازد. در بعد تاب‌آوری، بیشترین وزن مربوط به سطح موجودی ایمنی (0.0661) و قابلیت پاسخگویی (0.0616) بوده که اهمیت آمادگی برای مواجهه با بحران‌ها و حفظ تداوم زنجیره‌تامین را نشان می‌دهد. این نتایج حاکی از آن است که تصمیم‌گیری در زمینه انتخاب تامین‌کنندگان یا گزینه‌های استراتژیک باید با در نظر گرفتن توامان عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و تاب‌آورانه انجام پذیرد.

در مجموع، نتایج حاکی از آن است که هر سه بعد عمومی، پایداری و تاب‌آوری باید به‌صورت همزمان در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در نظر گرفته شوند. در عین حال، تمرکز ویژه‌ای بر زیرمعیارهایی چون هزینه، کاهش مصرف انرژی، سطح موجودی ایمنی، کیفیت و انتشار گازهای گلخانه‌ای ضروری به نظر می‌رسد.

**جدول ۷- مقایسات زوجی بهترین معیار با سایر معیارها.**

**Table 7- Pairwise comparisons between the best criterion and all other criteria.**

| کارشناس | معیار | عمومی | | | پایداری | | | تاب‌آوری | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | سناریو | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم |
| 1 | پایداری (بهترین معیار) | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 3 | | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| میانگین | | 3.66 | 2.33 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |

**جدول ۸- مقایسات زوجی سایر معیارها با بدترین معیار.**

**Table 8- Pairwise comparisons between each of the other criteria and the worst criterion.**

| | | عمومی (بدترین معیار) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | کارشناس | | | |
| معیار | سناریو | 1 | 2 | 3 | میانگین |
| عمومی | اول | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | دوم | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | سوم | 1 | 1 | 1 | 1 |

جدول ۸- ادامه.
Table 8- Continued.

| عمومی (بدترین معیار) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | کارشناس | | | |
| معیار | سناریو | 1 | 2 | 3 | میانگین |
| پایداری | اول | 4 | 3 | 2 | 3 |
| | دوم | 2 | 3 | 3 | 2.66 |
| | سوم | 3 | 4 | 4 | 3.66 |
| تاب‌آوری | اول | 1 | 2 | 2 | 1.66 |
| | دوم | 2 | 3 | 2 | 2.33 |
| | سوم | 3 | 4 | 3 | 3.33 |

جدول ۹- مقایسات زوجی بهترین زیرمعیار (عمومی) با سایر زیرمعیارها (عمومی).
Table 9- Pairwise comparisons between the best general sub-criterion and all other general sub-criteria.

| کارشناس | معیار | هزینه | | | کارایی | | | زمان تحویل | | | انعطاف‌پذیری | | | کیفیت | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | سناریو | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم |
| 1 | هزینه (بهترین زیرمعیار) | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| 3 | | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 1 | 1 | 2 |
| میانگین | | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2.33 | 1 | 2.33 | 2 | 2 | 3.33 | 3.66 | 1.66 | 1 | 2 |

جدول ۱۰- مقایسات زوجی سایر زیر معیارها (عمومی) با بدترین معیار (عمومی).
Table 10- Pairwise comparisons between each of the other general sub criteria and the worst general sub-criterion.

| انعطاف‌پذیری (بدترین زیرمعیار) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | کارشناس | | |
| معیار | سناریو | 1 | 2 | 3 | میانگین |
| هزینه | اول | 2 | 3 | 3 | 22.66 |
| | دوم | 3 | 3 | 4 | 3.33 |
| | سوم | 2 | 3 | 3 | 2.66 |
| کارایی | اول | 2 | 3 | 2 | 2.33 |
| | دوم | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | سوم | 2 | 2 | 2 | 2 |
| زمان تحویل | اول | 2 | 2 | 1 | 1.66 |
| | دوم | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | سوم | 2 | 2 | 2 | 2 |
| انعطاف‌پذیری | اول | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | دوم | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | سوم | 1 | 1 | 1 | 1 |
| کیفیت | اول | 2 | 3 | 2 | 1.66 |
| | دوم | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | سوم | 2 | 2 | 2 | 2 |

**جدول ۱۱- مقایسات زوجی بهترین زیر معیار (پایداری) با سایر زیرمعیارها (پایداری).**

**Table 11- Pairwise comparisons between the best sustainable sub-criterion and all other sustainable sub-criteria.**

| کارشناس | | کاهش مصرف انرژی ۱ | | | انتشار گازهای گلخانه‌ای ۲ | | | ظرفیت مالی ۳ | | | استفاده از منابع تجدیدپذیر ۴ | | | مدیریت پسماند ۵ | | | قرارداد کارگران ۶ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | سناریو | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم |
| 1 | کاهش | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 2 | مصرف | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 |
| 3 | انرژی | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| | (بهترین زیرمعیار) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| میانگین | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2.66 | 1.33 | 1 | 1.33 | 2 | 2 | 1.66 | 1.33 | 1 | 2.33 | 2 | 1.33 | 2.33 | 3 |

**جدول ۱۲- مقایسات زوجی سایر زیر معیارها (پایداری) با بدترین زیر معیار (پایداری).**

**Table 12- Pairwise comparisons between each of the other sustainable sub criteria and the worst sustainable sub-criterion.**

| | | قرارداد کارگران (بدترین زیرمعیار) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| معیار | کارشناس / سناریو | 1 | 2 | 3 | میانگین |
| کاهش مصرف انرژی | اول | 1 | 2 | 3 | 2 |
| | دوم | 2 | 3 | 3 | 2.66 |
| | سوم | 4 | 3 | 4 | 3.66 |
| انتشار گازهای گلخانه‌ای | اول | 2 | 1 | 1 | 1.33 |
| | دوم | 2 | 1 | 2 | 1.66 |
| | سوم | 3 | 2 | 3 | 2 |
| ظرفیت مالی | اول | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | دوم | 2 | 1 | 2 | 1.66 |
| | سوم | 3 | 2 | 2 | 2.33 |
| استفاده از منابع تجدید پذیر | اول | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | دوم | 2 | 3 | 2 | 2.33 |
| | سوم | 2 | 2 | 2 | 2 |
| مدیریت پسماند | اول | 1 | 2 | 2 | 1.66 |
| | دوم | 2 | 2 | 3 | 2.33 |
| | سوم | 3 | 3 | 3 | 3 |
| قرارداد کارگران | اول | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | دوم | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | سوم | 1 | 1 | 1 | 1 |

**جدول ۱۳- مقایسات زوجی بهترین زیر معیار (تاب‌آوری) با سایر زیرمعیارها (تاب‌آوری).**

**Table 13- Pairwise comparisons between the best resilience sub-criterion and all other resilience sub-criteria.**

| کارشناس | معیار | تنوع منابع | | | قابلیت پاسخگویی | | | مسیریابی مجدد | | | منبع یابی | | | سطح ایمنی موجودی | | | همکاری و شفافیت | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | سناریو | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم | اول | دوم | سوم |
| 1 | سطح | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | ۲ | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 |
| 2 | ایمنی | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | ۲ | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 |
| 3 | موجودی | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | ۲ | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| | (بهترین زیرمعیار) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| میانگین | | 1.66 | 2.33 | 2 | 1.33 | 1 | 3 | 1.66 | 2 | 2.33 | 1 | ۲ | 2.66 | 1 | 1 | 1 | 1.66 | 2 | 4 |

**جدول ۱۴- مقایسات زوجی سایر زیر معیارها (تاب‌آوری) با بدترین زیر معیار (تاب‌آوری).**

**Table 14- Pairwise comparisons between each of the other resilience sub criteria and the worst resilience sub-criterion.**

| | | همکاری و شافیت (بدترین زیرمعیار) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| معیار | کارشناس / سناریو | 1 | 2 | 3 | میانگین |
| تنوع منابع | اول | 1 | 2 | 2 | 1.66 |
| | دوم | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | سوم | 2 | 2 | 3 | 2.33 |
| قابلیت پاسخگویی | اول | 3 | 3 | 2 | 2.66 |
| | دوم | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | سوم | 2 | 2 | 2 | 2 |
| مسیریابی مجدد | اول | 2 | 3 | 2 | 2.33 |
| | دوم | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | سوم | 3 | 3 | 2 | 2.33 |
| منبع یابی | اول | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | دوم | 3 | 3 | 2 | 2.66 |
| | سوم | 2 | 3 | 4 | 3 |
| سطح موجودی ایمنی | اول | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | دوم | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | سوم | 3 | 4 | 4 | 2.66 |
| همکاری و شفافیت | اول | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | دوم | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | سوم | 1 | 1 | 1 | 1 |

**جدول ۱۵- وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها.**

**Table 15- Final weight of criteria and sub-criteria.**

| معیار | وزن معیار | | زیر معیار | وزن اولیه معیار | وزن نهایی |
|---|---|---|---|---|---|
| عمومی | 0.329514 | 1 | هزینه | 0.269301 | 0.08604544 |
| | | 2 | کارایی | 0.19265 | 0.061554372 |
| | | 3 | زمان تحویل | 0.159933 | 0.051100833 |
| | | 4 | انعطاف‌پذیری | 0.167622 | 0.053557576 |
| | | 5 | کیفیت | 0.210494 | 0.06725578 |
| پایداری | 0.34593 | 6 | کاهش مصرف انرژی | 0.215287 | 0.074474232 |
| | | 7 | انتشار گازهای گلخانه‌ای | 0.190456 | 0.065884444 |
| | | 8 | ظرفیت مالی | 0.183066 | 0.063328021 |
| | | 9 | استفاده از منابع تجدیدپذیر | 0.160345 | 0.055468146 |
| | | 10 | مدیریت پسماند | 0.150125 | 0.051932741 |
| | | 11 | قرارداد کارگران | 0.110445 | 0.38206239 |
| تاب‌آوری | 0.33583 | 12 | تنوع منابع | 0.16146 | 0.054221768 |
| | | 13 | قابلیت پاسخگویی | 0.183564 | 0.061646665 |
| | | 14 | مسیریابی مجدد | 0.151385 | 0.050839927 |
| | | 15 | منبع‌یابی | 0.170245 | 0.057173719 |
| | | 16 | سطح موجودی ایمنی | 0.196745 | 0.066073267 |
| | | 17 | همکاری و شفافیت | 0.14535 | 0.048813181 |

### ۵-۲- نتایج حاصل از روش ویکور تصادفی

در این بخش، امتیازدهی تامین‌کنندگان بر اساس معیارهای مطرح‌شده در مساله تحقیق و با بهره‌گیری از روش ویکور تصادفی انجام شده است. به‌منظور اجرای این فرآیند، در ابتدا ماتریس تصمیم با استفاده از داده‌های استخراج‌شده و نظرات خبرگان حوزه تشکیل گردید. سپس، با اعمال روش مذکور، امتیاز و رتبه‌ی هر یک از تامین‌کنندگان تعیین شد. در مطالعه حاضر، در مجموع هفت تامین‌کننده شامل چهار تامین‌کننده اصلی و سه تامین‌کننده پشتیبان مورد ارزیابی قرار گرفتند که جزئیات آن در جدول مربوطه ارایه شده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده از مدل ویکور تصادفی، در میان تامین‌کنندگان اصلی، گزینه‌های دوم و پنجم و در میان تامین‌کنندگان پشتیبان، گزینه دوم بالاترین امتیازات را کسب کرده‌اند. این یافته‌ها حاکی از اولویت نسبی این تامین‌کنندگان در زمینه معیارهای تعریف‌شده پژوهش می‌باشد.

**جدول ۱۶- امتیازهای ارزیابی به‌صورت‌کنندگان.**
**Table 16- Supplier evaluation scores.**

| تامین‌کننده | شاخص ویکور | امتیاز |
|---|---|---|
| تامین‌کننده اصلی اول | 0.294563 | 0.705437 |
| تامین‌کننده اصلی دوم | 0.13456 | 0.86544 |
| تامین‌کننده اصلی سوم | 0.53671 | 0.46329 |
| تامین‌کننده اصلی چهارم | 0.74523 | 0.25477 |
| تامین‌کننده اصلی پنجم | 0.21784 | 0.78216 |
| تامین‌کننده پشتیبان اول | 0.43567 | 0.56433 |
| تامین‌کننده پشتیبان دوم | 0.36245 | 0.63755 |
| تامین‌کننده پشتیبان سوم | 0.53478 | 0.46522 |

### ۵-۳-الگوریتم جنگل تصادفی

همان‌گونه که در بخش‌های ابتدایی تحقیق اشاره شد، در این پژوهش به‌منظور پیش‌بینی عملکرد آینده تامین‌کنندگان از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شده است. الگوریتم جنگل تصادفی یکی از روش‌های قدرتمند یادگیری ماشین در حوزه رگرسیون و طبقه‌بندی است که به دلیل قابلیت‌های برجسته‌ای همچون مقابله با داده‌های نویزی، جلوگیری از بیش‌برازش و توانایی مدلسازی روابط غیرخطی پیچیده، انتخاب مناسبی برای پیش‌بینی عملکرد آینده تامین‌کنندگان در این پژوهش محسوب می‌شود. این الگوریتم با ترکیب خروجی چندین درخت تصمیم مستقل که هر یک بر نمونه‌ای تصادفی از داده‌ها و ویژگی‌ها آموزش دیده‌اند، ضمن افزایش پایداری مدل، دقت پیش‌بینی را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا می‌بخشد [73].

**مرحله ۱**- پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها

در مرحله‌ی گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها، ابتدا داده‌های مرتبط با عملکرد تامین‌کنندگان طی چندین سال متوالی جمع‌آوری شدند که شامل شاخص‌های کیفی و کمی مهم در فرآیند زنجیره‌تامین می‌باشند. هر مجموعه داده به‌صورت دیکشنری در زبان برنامه‌نویسی پایتون ذخیره‌شده و سپس با استفاده از کتابخانه‌ی *Pandas* به دیتافریم‌های ساختاریافته تبدیل گردید. این دیتافریم‌ها شامل ستون‌هایی هستند که ویژگی‌های ورودی و متغیر هدف را در بر می‌گیرند. ویژگی‌های ورودی شامل پنج معیار کلیدی است که به‌عنوان عوامل موثر بر عملکرد تامین‌کنندگان انتخاب شده‌اند: هزینه[1]، کیفیت[2]، سطح موجودی ایمنی[3]، انتشار گازهای گلخانه‌ای[4] و کاهش مصرف انرژی[5]. متغیر هدف نیز کارایی[6] تامین‌کنندگان است که مدل یادگیری ماشین وظیفه دارد آن را پیش‌بینی نماید. در مرحله‌ی پاکسازی و آماده‌سازی داده‌ها، تمامی داده‌ها از نظر وجود مقادیر گمشده، نویز و ناسازگاری‌ها

[1] Cost
[2] Quality
[3] Safety stock level
[4] Greenhouse gas emissions
[5] Energy consumption reduction
[6] Performance

بررسی شدند؛ مقادیر گمشده اصلاح شده و داده‌های طبقه‌ای تامین عددی تبدیل گردیدند. همچنین، در صورت نیاز، داده‌ها نرمال‌سازی شدند تا عملکرد مدل جنگل تصادفی بهینه شود و دقت پیش‌بینی افزایش یابد.

**مرحله ۲**- تقسیم داده‌ها به مجموعه‌های آموزش و آزمون

در مرحله ۲ الگوریتم جنگل تصادفی، پس از اتمام فرآیند پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها، مجموعه داده‌های موجود به دو بخش اصلی تقسیم می‌شوند: مجموعه آموزش[1] و مجموعه آزمون[2]. این تقسیم‌بندی به‌منظور ارزیابی صحیح و دقیق عملکرد مدل در پیش‌بینی داده‌هایی است که قبلا مدل آن‌ها را ندیده است. معمول‌ترین و متداول‌ترین نسبت تقسیم، ۸۰% داده‌ها برای آموزش و ۲۰% باقی‌مانده برای آزمون است اما این نسبت می‌تواند بر اساس اندازه داده‌ها و ماهیت مساله تغییر کند.

برای اطمینان از ثبات و تکرارپذیری نتایج، پارامتر *random_state* در تابع تقسیم‌بندی داده‌ها تنظیم می‌شود. این پارامتر باعث می‌شود در هر بار اجرای الگوریتم، مجموعه داده‌ها به همان شیوه تقسیم شوند و نتایج مدل قابل مقایسه باشند. به این ترتیب، امکان بررسی دقیق اثر تنظیمات مدل و تغییرات دیگر در فرآیند آموزش فراهم می‌گردد. این تفکیک داده‌ها دارای اهمیت بالایی است، چرا که مدل ابتدا باید بر پایه داده‌های آموزش، الگوها و روابط میان ویژگی‌ها و متغیر هدف را یاد بگیرد. اگر مدل مستقیما بر روی تمام داده‌ها آموزش ببیند و سپس همان داده‌ها را برای ارزیابی استفاده کند، احتمال وقوع بیش‌برازش بسیار زیاد است، به این معنی که مدل عملکرد بسیار خوبی روی داده‌های آموزش دارد ولی توانایی تعمیم و پیش‌بینی داده‌های جدید را از دست می‌دهد. با استفاده از داده‌های آزمون که به‌طور کامل از فرآیند آموزش جدا شده‌اند، می‌توان توانایی واقعی مدل در پیش‌بینی و تعمیم‌پذیری را سنجید. این مرحله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا دقت و کارایی مدل بر اساس پیش‌بینی بر روی داده‌های آزمون اندازه‌گیری می‌شود و معیاری برای اثربخشی الگوریتم جنگل تصادفی در مساله انتخاب و پیش‌بینی عملکرد تامین‌کنندگان محسوب می‌شود.

**مرحله ۳**- ساخت مدل اولیه جنگل تصادفی

در مرحله ۳، یک مدل اولیه از نوع جنگل تصادفی تعریف می‌گردد که در این مرحله صرفا ایجاد ساختار مدل بدون اجرای فرآیند آموزش صورت می‌پذیرد. به‌عبارتی، هیچ خروجی مستقیمی تولید نمی‌شود، بلکه مدل تنها برای آموزش بر روی داده‌های ورودی و پیش‌بینی متغیر هدف در مراحل بعدی آماده‌سازی می‌شود. این مرحله، زمینه‌ساز استفاده از مدل در گام‌های آتی برای تحلیل و پیش‌بینی عملکرد تامین‌کنندگان است.

**مرحله ۴**- تنظیم پارامترها[3]

مرحله تنظیم هایپرپارامترها یکی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین مرحله در فرآیند ساخت و آموزش مدل‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه الگوریتم جنگل تصادفی است. این مرحله با هدف یافتن بهترین ترکیب پارامترهای قابل تنظیم مدل انجام می‌شود تا عملکرد پیش‌بینی افزایش یافته و از مشکلاتی مانند بیش‌برازش جلوگیری شود. در این پژوهش، برای بهینه‌سازی هایپرپارامترهای الگوریتم جنگل تصادفی از روش جست‌وجوی شبکه‌ای[4] استفاده شده است. این روش تامین سیستماتیک تمام ترکیبات ممکن پارامترهای مورد نظر را ارزیابی می‌کند. سپس با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع[5] که داده‌ها را به چند زیرمجموعه تقسیم و مدل را چندین‌بار با داده‌های مختلف آموزش و ارزیابی می‌کند، بهترین تنظیمات انتخاب می‌شود. این کار باعث می‌شود که مدل نه‌تنها روی داده‌های آموزش عملکرد مناسبی داشته باشد، بلکه قابلیت تعمیم و پیش‌بینی دقیق بر روی داده‌های ناشناخته را نیز بهبود بخشد. الگوریتم جنگل تصادفی چندین هایپرپارامتر دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

[1] Training set
[2] Test set
[3] Hyperparameter tuning
[4] GridSearchCV
[5] Cross-validation

۱. *n_estimators*: تعداد کل درختان تصمیمی که در جنگل ساخته می‌شود. افزایش این عدد معمولا باعث افزایش دقت مدل می‌شود، اما هزینه محاسباتی و زمان آموزش نیز افزایش می‌یابد. در این پژوهش، بازه‌ای از مقادیر معمول مانند ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ بررسی شده است تا تعادل مناسبی بین دقت و کارایی برقرار شود.

۲. *max_depth*: بیشینه عمق هر درخت تصمیم که کنترل‌کننده میزان پیچیدگی مدل است. عمق بیشتر می‌تواند به مدل اجازه دهد الگوهای پیچیده‌تری را بیاموزد اما خطر بیش‌برازش را افزایش می‌دهد. بازه‌ای از عمق‌ها مانند ۵، ۱۰، ۲۰ و مقادیر نامحدود مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳. *min_samples_split*: حداقل تعداد نمونه‌های لازم در یک گره داخلی برای انجام تقسیم‌بندی بیشتر. این پارامتر به جلوگیری از ساخت گره‌های بسیار کوچک و کاهش نویز کمک می‌کند. مقادیر ۲، ۵ و ۱۰ معمولا آزمایش می‌شوند. حداقل تعداد نمونه‌ها برای تقسیم یک گره داخلی که در این مدل مقدار آن برابر ۵ می‌باشد.

۴. *min_samples_leaf*: حداقل تعداد نمونه‌هایی که باید در برگ یک درخت وجود داشته باشد. این پارامتر باعث می‌شود برگ‌های مدل بسیار کوچک و بیش‌برازش‌کننده ساخته نشوند. مقادیر ۱، ۲ و ۴ در تنظیمات معمول هستند. حداقل تعداد نمونه‌ها در برگ‌ها که مقدار آن برابر ۲ نمونه مکی باشد.

**مرحله ۵**- ارزیابی مدل

پس از ساخت و آموزش مدل جنگل تصادفی، مرحله مهم ارزیابی عملکرد مدل انجام می‌شود تا میزان دقت و صحت پیش‌بینی‌های انجام‌شده بر روی داده‌های آزمون مشخص گردد. در این پژوهش، برای ارزیابی مدل از سه معیار استاندارد و پرکاربرد استفاده شده است که هر یک جنبه‌ای از خطا و کیفیت پیش‌بینی را مورد بررسی قرار می‌دهد:

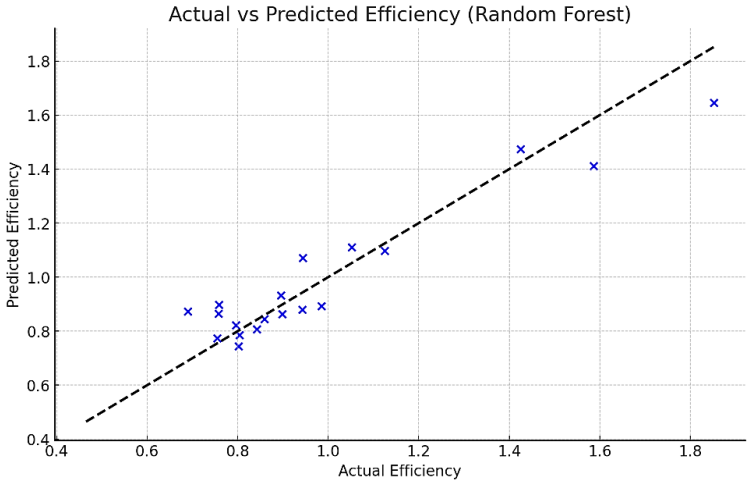
۱. *MSE*: میانگین مربعات اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده است. این معیار میزان خطای کلی مدل را نشان می‌دهد و به دلیل مجذورشدن اختلاف‌ها، خطاهای بزرگ‌تر وزن بیشتری می‌گیرند. مقدار *MSE* نزدیک به صفر بیانگر دقت بالای مدل است. در این پژوهش مقدار *MSE* برابر با ۰٫۰۰۹۵ گزارش شده که نشان از عملکرد بسیار خوب مدل دارد.

۲. ریشه میانگین مربعات خطا[1]: *RMSE* جذر *MSE* است و به واحد اصلی داده‌ها بازمی‌گردد. این معیار به دلیل هم‌سطح بودن با واحد داده، درک بهتری از میزان خطا برای خوانندگان فراهم می‌کند. مقدار *RMSE* برابر با ۰٫۰۹۷۶ است که نشان‌دهنده خطای متوسط بسیار پایین پیش‌بینی‌ها نسبت به مقادیر واقعی است. مقدار *RMSE* کمتر از ۰٫۱ در حوزه‌های پیش‌بینی عملکرد، عددی مطلوب تلقی می‌شود.

۳. *MAE*: *MAE* میانگین قدر مطلق اختلاف بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده است. این معیار به حساسیت کمتری نسبت به خطاهای بزرگ دارد و خطای متوسط مدل را به‌صورت خطی اندازه‌گیری می‌کند. مقدار *MAE* برابر با ۰٫۰۷۷۲ نشانگر دقت قابل قبول و ثبات مدل است.

در **شکل ۲** نمودار مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل جنگل تصادفی در مقابل مقادیر واقعی کارایی تامین‌کنندگان نمایش داده شده است. این نمودار به‌صورت یک نمودار پراکندگی است که محور افقی نشان‌دهنده مقادیر واقعی و محور عمودی نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل می‌باشد. نزدیک بودن نقاط داده به خط مورب ۴۵ درجه بیانگر دقت بالای پیش‌بینی‌های مدل است، زیرا در حالت ایده‌آل هر نقطه دقیقا روی این خط قرار می‌گیرد که نشان می‌دهد مقدار پیش‌بینی‌شده برابر با مقدار واقعی است. در این نمودار، مشاهده می‌شود که اکثر نقاط به‌صورت فشرده و نزدیک به این خط قرار گرفته‌اند و پراکندگی کمی در اطراف آن وجود دارد. این موضوع بیانگر توانایی بالای مدل در یادگیری روابط پیچیده بین ویژگی‌های ورودی و عملکرد تامین‌کنندگان و نیز پیش‌بینی دقیق عملکرد آینده آن‌ها است. علاوه‌بر این، عدم وجود نقاط پرت یا انحرافات بزرگ در نمودار نشان می‌دهد که مدل نه‌تنها در پیش‌بینی میانگین عملکرد، بلکه در شناسایی تغییرات مختلف نیز عملکرد قابل قبولی دارد.

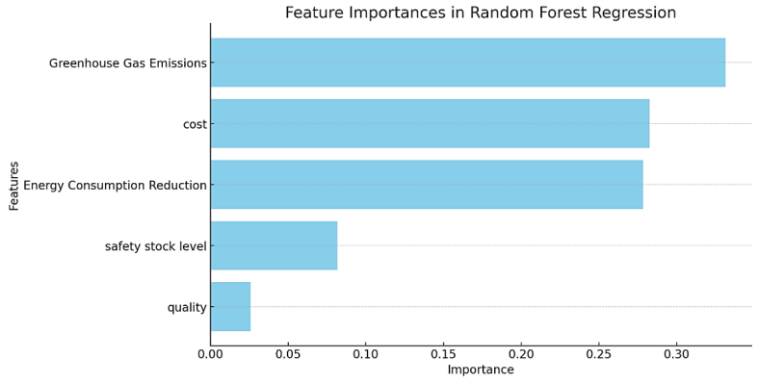
[1] Root Mean Squared Error (RMSE)




**شکل ۲- مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر واقعی.**
**Figure 2- Predicted vs. actual values.**

**مرحله ۶-** تحلیل اهمیت ویژگی‌ها

نمودار در الگوریتم جنگل تصادفی، تحلیل اهمیت ویژگی‌ها یکی از مراحل کلیدی است که نقش اساسی در تفسیر نتایج مدل و شناخت عوامل موثر بر پیش‌بینی عملکرد تامین‌کنندگان ایفا می‌کند. در این پژوهش، پس از آموزش مدل جنگل تصادفی و انجام پیش‌بینی‌ها، اهمیت نسبی هر یک از ویژگی‌های ورودی بر اساس تاثیر آن‌ها در کاهش خطای پیش‌بینی محاسبه شده است. این تحلیل بر مبنای روش‌های داخلی الگوریتم جنگل تصادفی انجام می‌گیرد که به هر ویژگی، امتیازی اختصاص می‌دهد که نشان‌دهنده سهم آن ویژگی در تصمیم‌گیری مدل است. نمودار اهمیت ویژگی‌ها نمایانگر سهم هر یک از پنج ویژگی کلیدی است که به‌ترتیب بر اساس مقدار اهمیت مرتب شده‌اند. در این نمودار، ویژگی انتشار گازهای گلخانه‌ای با ۳۳.۱% بیشترین اهمیت را دارد که این نشان‌دهنده نقش بسیار قوی این شاخص زیست‌محیطی در تعیین عملکرد تامین‌کنندگان است. در رتبه دوم، ویژگی هزینه با ۲۸.۲% قرار دارد که به خوبی بیانگر تاثیر عوامل اقتصادی بر کارایی و انتخاب تامین‌کننده است. ویژگی کاهش مصرف انرژی نیز با ۲۷.۸% اهمیت، جایگاه سوم را به خود اختصاص داده است که به دلیل الزامات روزافزون زیست‌محیطی و تلاش برای بهره‌وری انرژی در زنجیره‌تامین اهمیت یافته است. همچنین، سطح موجودی ایمنی با ۸.۲% و کیفیت با ۲.۶% اهمیت کمتری نسبت به سه ویژگی اول دارند، اما همچنان در پیش‌بینی عملکرد نقش موثری ایفا می‌کنند. این تحلیل اهمیت ویژگی‌ها به‌صورت شفاف نشان می‌دهد که عوامل زیست‌محیطی و اقتصادی (مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، هزینه و کاهش مصرف انرژی) بیشترین تاثیر را در تعیین کارایی تامین‌کنندگان دارند و بنابراین باید در فرآیند تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری‌های زنجیره‌تامین، توجه ویژه‌ای به این ابعاد معطوف شود. این نتایج، با یافته‌های پژوهش‌های پیشین در حوزه پایداری و تاب‌آوری زنجیره‌تامین همخوانی دارد و تاکید می‌کند که ترکیب معیارهای اقتصادی و زیست‌محیطی می‌تواند راهنمای موثری برای انتخاب تامین‌کنندگان مطلوب باشد.




**شکل ۳- اهمیت ویژگی‌ها.**
**Figure 3- Feature importance.**

## ۶- بررسی کارایی مدل تصمیم‌گیری ارایه شده

در این قسمت، اثربخشی مدل تصمیم‌گیری ارایه شده با بهره‌گیری از شاخص‌های ارزیابی مشخص و از طریق مقایسه تطبیقی با سایر رویکردها بررسی می‌گردد.

### ۶-۱- SBWM

در این بخش، به ارزیابی کارایی *SBWM* پرداخته می‌شود. به‌منظور تحلیل عملکرد این روش، از معیار ارزش راه‌حل تصادفی[1] بهره گرفته شده که یکی از شاخص‌های رایج در ادبیات پژوهش برای سنجش اثربخشی مدل‌های تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت به شمار می‌رود. به‌منظور ارزیابی مقایسه‌ای، نتایج حاصل از این مدل با خروجی‌های روش تحلیل سلسله مراتبی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. معیار ارزش راه‌حل تصادفی با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید که در آن *SV* و *EV* به‌ترتیب برابر با مقدار تابع هدف در *SBWM* و نرخ ناسازگاری در روش تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد. در این رابطه، مقدار مثبت *VSS* بیانگر آن است که SV < EV ، به این معنا که نرخ ناسازگاری مدل تصادفی کمتر از مدل قطعی است. طبق نتایج نمایش‌داده‌شده در **شکل ۴**، در تمامی مراحل تحلیل مقدار *VSS* مثبت بوده است. این یافته حاکی از برتری و عملکرد مطلوب روش تصادفی پیشنهادی در مقایسه با روش تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد.

$$VSS = EV - SV.$$

**شکل ۴- مقایسه روش‌ها بر مبنای معیار ارزش راه‌حل تصادفی.**

**Figure 4- Method comparison using the value of stochastic solution criterion.**

### ۶-۲- روش ویکور فازی

در این مرحله، برای ارزیابی کارایی روش ویکور تصادفی، نتایج آن با دو نسخه سنتی و فازی روش ویکور مقایسه شد. در تمامی سه روش، اولویت‌بندی تامین‌کنندگان روند مشابهی را نشان داد که نشان‌دهنده‌ی سازگاری و پایداری تصمیم‌گیری است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ویکور تصادفی با حفظ دقت بالا، توانایی مقابله با عدم قطعیت در داده‌های تصمیم‌گیری را نیز دارا می‌باشد.

[1] Value of Stochastic Solution (VSS)

جدول ۱۷ - رتبه نهایی تامین‌کنندگان.
Table 17- Final ranking of suppliers.

| | شاخص ویکور سنتی | رتبه | شاخص ویکور فازی | رتبه | شاخص ویکور تصادفی | رتبه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| اصلی اول | 0.32 | 3 | 0.30 | 3 | 0.294563 | 3 |
| اصلی دوم | 0.12 | 1 | 0.13 | 1 | 0.13456 | 1 |
| اصلی سوم | 0.51 | 6 | 0.54 | 6 | 0.53671 | 6 |
| اصلی چهارم | 0.76 | 8 | 0.74 | 8 | 0.74523 | 8 |
| اصلی پنجم | 0.24 | 2 | 0.21 | 2 | 0.21784 | 2 |
| پشتیبان اول | 0.46 | 5 | 0.44 | 5 | 0.43567 | 5 |
| پشتیبان دوم | 0.39 | 4 | 0.36 | 4 | 0.36245 | 4 |
| پشتیبان سوم | 0.53 | 7 | 0.55 | 7 | 0.53478 | 7 |

## ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در پاسخ به چالش‌های فزاینده‌ای که زنجیره‌های تامین در دنیای امروز با آن‌ها مواجه هستند. از جمله نوسانات بازار، بحران‌های زیست‌محیطی، الزامات اجتماعی و تهدیدات ناشی از اختلالات غیرمنتظره. این پژوهش با هدف طراحی یک مدل تصمیم‌گیری داده‌محور و چندمرحله‌ای جهت ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان پایدار و تاب‌آور در صنعت خودروسازی انجام شد. مدل پیشنهادی با رویکردی آینده‌نگر، سه بعد اساسی پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی)، تاب‌آوری و معیارهای عمومی را به‌صورت یکپارچه در فرآیند ارزیابی لحاظ کرده است. در مرحله نخست، با استفاده از *SBWM*، وزن معیارها و زیرمعیارها تحت سناریوهای مختلف عدم قطعیت استخراج شد که نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری مدل در مواجهه با محیط‌های پرریسک است. در مرحله دوم، ارزیابی گزینه‌های تصمیم با بهره‌گیری از روش ویکور تصادفی صورت گرفت که ضمن رتبه‌بندی دقیق تامین‌کنندگان، توانست ابعاد چندمعیاره و سناریومحور مساله را پوشش دهد. در نهایت، مدل جنگل تصادفی به‌عنوان ابزار یادگیری ماشین، برای پیش‌بینی کارایی آینده تامین‌کنندگان مورد استفاده قرار گرفت و عملکرد بسیار دقیقی را از خود نشان داد($RMSE = 0.0976$) که بیانگر قابلیت بالای مدل در تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و آینده‌نگر است. یافته‌های تجربی پژوهش حاکی از آن است که معیارهای مرتبط با محیط‌زیست و انعطاف‌پذیری عملیاتی نظیر انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش مصرف انرژی، سطح موجودی ایمنی و هزینه، بیشترین تاثیر را بر کارایی تامین‌کنندگان دارند. همچنین وزن نهایی به‌دست‌آمده برای ابعاد اصلی پایداری، تاب‌آوری و معیارهای عمومی تقریبا هم‌تراز بود که نشان‌دهنده ضرورت توجه یکسان به جنبه‌های محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و عملیاتی در تصمیم‌گیری‌های راهبردی است. از منظر نظری، این پژوهش با ارایه یک چارچوب سه‌لایه‌ای مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی و تصادفی و تلفیق آن با یادگیری ماشین، نوآوری قابل‌توجهی را در حوزه ارزیابی تامین‌کنندگان در شرایط عدم‌قطعیت رقم زده است. در مجموع، این تحقیق با پرداختن همزمان به ابعاد پایداری و تاب‌آوری، پاسخ علمی مناسبی به شکاف‌های موجود در ادبیات و نیازهای صنعتی ارایه کرده است. شایان ذکر است، هرچند این پژوهش به‌صورت مطالعه موردی در صنعت خودروسازی (شرکت سایپا کاشان) اجرا شده است، اما مدل پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده که از قابلیت تعمیم‌پذیری بالایی برخوردار باشد. انعطاف‌پذیری ساختار مدل به‌گونه‌ای است که محققان و مدیران صنایع دیگر نیز می‌توانند با تغییر معیارها و زیرمعیارهای ورودی بر اساس نیاز و شرایط صنعت خود، از این چارچوب برای ارزیابی تامین‌کنندگان استفاده نمایند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، تعمیم‌پذیری این مدل در صنایع دیگری همچون صنایع الکترونیک، دارویی، غذایی و انرژی نیز موردبررسی و تایید تجربی قرار گیرد. بر مبنای دستاوردهای این پژوهش، مسیرهای متعددی برای توسعه‌های آتی پیشنهاد می‌شود:

۱. اعتبارسنجی مدل در صنایع گوناگون: پیشنهاد می‌شود مدل ارایه‌شده در صنایع دیگر مانند داروسازی، الکترونیک، غذا و نوشیدنی و انرژی مورد ارزیابی قرار گیرد تا قابلیت تعمیم و کاربردپذیری آن سنجیده شود.
۲. ادغام فناوری‌های نوین اطلاعاتی: استفاده از فناوری‌های نوظهور همچون بلاک‌چین و *IoT* می‌تواند سطح شفافیت، قابلیت ردیابی و تاب‌آوری عملیاتی را به طرز معناداری افزایش دهد و در مدل‌های تصمیم‌گیری آینده لحاظ گردد.
۳. گسترش دامنه جغرافیایی مدل: پیشنهاد می‌شود نسخه‌های توسعه‌یافته مدل برای زنجیره‌های تامین جهانی طراحی شوند تا عوامل بین‌المللی نظیر تنوع فرهنگی، ریسک‌های سیاسی، تفاوت‌های قانونی و نوسانات ارزی نیز در مدل لحاظ شوند.

۴. به‌کارگیری یادگیری عمیق: استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر در یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی عمیق[1] می‌تواند به مدلسازی دقیق‌تر روابط غیرخطی و پیچیده میان معیارهای تصمیم‌گیری و بهبود قدرت پیش‌بینی کمک کند.

۵. تحلیل حساسیت و سناریوسازی پیشرفته: توسعه سناریوهای پیچیده‌تر و تحلیل حساسیت پارامترها می‌تواند به درک عمیق‌تری از پایداری تصمیمات در مواجهه با شوک‌های محیطی مانند همه‌گیری‌ها، بحران‌های انرژی یا اختلالات ژئوپلتیک منجر شود.

۶. ترکیب با مدل‌های بهینه‌سازی تخصیص سفارش: مدل پیشنهادی می‌تواند با مدل‌های تخصیص سفارش[2] در زنجیره‌تامین یکپارچه شود تا علاوه بر ارزیابی، تصمیم‌گیری در مورد نحوه توزیع بهینه سفارش‌ها نیز انجام گیرد.

## مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در تمامی مراحل انجام این پژوهش، از طراحی تا تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله، نقش فعال داشته‌اند. نسخه نهایی مقاله توسط تمامی نویسندگان مطالعه و تایید شده است.

## تقدیر و تشکر

صمیمانه از تمام افرادی که در انجام این پژوهش همکاری داشته‌اند، به‌ویژه کارشناسان محترم شرکت سایپا و داوران ارجمند نشریه که با نظرات اصلاحی و دقیق خود به بهبود کیفیت مقاله کمک کردند، قدردانی می‌شود.

## منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی از هیچ نهاد، سازمان یا موسسه‌ای انجام شده است. کلیه هزینه‌ها به‌صورت شخصی توسط پژوهشگران تامین شده‌اند.

## دسترسی به داده‌ها

اطلاعات و داده‌های مورد استفاده در این مطالعه بر پایه داده‌های واقعی استخراج‌شده از سامانه‌های مرتبط با صنعت خودرو بوده و در صورت درخواست موجه پژوهشگران دیگر، امکان دسترسی به داده‌های استفاده‌شده از طریق نویسنده مسئول فراهم خواهد بود.

## تضاد منافع

نویسندگان گواهی می‌کنند که در ارتباط با این پژوهش هیچ‌گونه تضاد منافع مالی، سازمانی یا شخصی وجود ندارد و تمامی یافته‌ها به‌صورت مستقل و بی‌طرفانه گزارش شده‌اند.

## منابع

[1] Azaron, A., Venkatadri, U., & Doost, A. F. (2019). Designing profitable and responsive supply chains under uncertainty. *IFAC-papersonline*, *52*(13), 2816–2820. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.635

[2] Subramanian, B., Mishra, A., Ramkumar, B. V., Mandala, G., Kathamuthu, N. D., & Srithar, S. (2025). Big data and fuzzy logic for demand forecasting in supply chain management: A data-driven approach. *Journal of fuzzy extension and applications*, *6*(2), 260–283. https://doi.org/10.22105/jfea.2025.488816.1703

[1] Deep Neural Networks (DNN)

[2] Order allocation models

[3] Elbaz, J., & Iddik, S. (2020). Culture and green supply chain management (GSCM) A systematic literature review and a proposal of a model. *Management of environmental quality: An international journal*, *31*(2), 483–504. https://doi.org/10.1108/MEQ-09-2019-0197

[4] Fattahi, M., Govindan, K., & Keyvanshokooh, E. (2017). Responsive and resilient supply chain network design under operational and disruption risks with delivery lead-time sensitive customers. *Transportation research part E: Logistics and transportation review*, *101*, 176–200. https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.02.004

[5] Asadi, Z., Aghajani, H., Valipourkhatir, M., & Babaee Tirkolaee, E. (2024). A hybrid fuzzy decision-making approach for evaluating the suppliers based on industry 5.0 and viable supply chain dimensions: A case study in medical devices manufacturing. *Journal of decisions and operations research*, *9*(2), 399-418. (**In Persian**). https://doi.org/10.22105/dmor.2023.408308.1773

[6] Bayatzadeh, S., & Talaie, H. (2024). Identifying and evaluating of sustainable and resilient supplier selection criteria according to industry 5.0 concepts (Case study: Steel industry). *Journal of decisions and operations research*, *9*(4), 1045-1063. (**In Persian**). https://doi.org/10.22105/dmor.2025.498734.1904

[7] Hesami, F. (2024). A hybrid ANP-TOPSIS method for strategic supplier selection in RL under rough uncertainty: A case study in the electronics industry. *Uncertainty discourse and applications*, *1*(1), 41–65. (**In Persian**). https://doi.org/10.22105/dmor.2025.498734.1904

[8] Tushar, Z. N., Bari, A. B. M. M., & Khan, M. A. (2022). Circular supplier selection in the construction industry: A sustainability perspective for the emerging economies. *Sustainable manufacturing and service economics*, *1*, 100005. https://doi.org/10.22105/dmor.2025.498734.1904

[9] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2022). A global-responsive supply chain considering sustainability and resiliency: Application in the medical devices industry. *Socio-economic planning sciences*. https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101303

[10] Hoseini, S. A., Fallahpour, A., Wong, K. Y., Mahdiyar, A., Saberi, M., & Durdyev, S. (2021). Sustainable supplier selection in construction industry through hybrid fuzzy-based approaches. *Sustainability*, *13*(3), 1413. https://doi.org/10.3390/su13031413

[11] Fallahiarezoudar, E., Alami, F., & Ahmadipourroudposht, M. (2022). Developing a multi-objective mathematical model of green closed-loop supply chain In terms of selling returned products using the Epsilon-constraint method approach. *Journal of quality engineering and management*, *11*(4), 351-376. (**In Persian**). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23221305.1400.11.4.3.2

[12] Silva, A. C., Marques, C. M., & Sousa, J. P. De. (2023). A simulation approach for the design of more sustainable and resilient supply chains in the pharmaceutical industry. *Sustainability*, *15*(9), 7254. https://doi.org/10.3390/su15097254

[13] Echefaj, K., Charkaoui, A., Cherrafi, A., Garza-Reyes, J. A., Khan, S. A. R., & Chaouni Benabdellah, A. (2023). Sustainable and resilient supplier selection in the context of circular economy: An ontology-based model. *Management of environmental quality: an international journal*, *34*(5), 1461–1489. https://doi.org/10.1108/MEQ-02-2023-0037

[14] Solgi, O., Gheidar-Kheljani, J., Dehghani, E., & Taromi, A. (2021). Resilient supplier selection in complex products and their subsystem supply chains under uncertainty and risk disruption: A case study for satellite components. *Scientia iranica*, *28*(3), 1802–1816. https://doi.org/10.24200/sci.2019.52556.2773

[15] Hosseini Dehshiri, S. J., & Aghaei, M. (2021). Identifying and ranking technological capabilities to enhance resilience of the supply chain. *Innovation management and operational strategies*, *2*(3), 229-243. (**In Persian**). https://doi.org/10.22105/imos.2021.288228.1101

[16] Li, Y. L., Tsang, Y. P., Wu, C. H., & Lee, C. K. M. (2024). A multi-agent digital twin–enabled decision support system for sustainable and resilient supplier management. *Computers & industrial engineering*, *187*, 109838. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109838

[17] Hasani, A., & Khosrojerdi, A. (2016). Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study. *Transportation research part E: Logistics and transportation review*, *87*, 20–52. https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.009

[18] Arji, G., Ahmadi, H., Avazpoor, P., & Hemmat, M. (2023). Identifying resilience strategies for disruption management in the healthcare supply chain during COVID-19 by digital innovations: A systematic literature review. *Informatics in medicine unlocked*, *38*, 101199. https://doi.org/10.1016/j.imu.2023.101199

[19] Gökler, S. H., & Boran, S. (2025). A novel resilient and sustainable supplier selection model based on D-AHP and DEMATEL methods. *Journal of engineering research*, *13*(1), 57–67. https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.07.015

[20] Rezaei, A., Aghsami, A., & Rabbani, M. (2021). Supplier selection and order allocation model with disruption and environmental risks in centralized supply chain. *International journal of system assurance engineering and management*, *12*(6), 1036–1072.

[21] Vahidi, F., Torabi, S. A., & Ramezankhani, M. J. (2018). Sustainable supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. *Journal of cleaner production*, *174*, 1351–1365. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.012

[22] Ivanov, D. (2021). Supply Chain Viability and the COVID-19 pandemic: A conceptual and formal generalisation of four major adaptation strategies. *International journal of production research*, *59*(12), 3535–3552. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1890852

[23] 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. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129830

[24] Kusi-Sarpong, S., Gupta, H., Khan, S. A., Chiappetta Jabbour, C. J., Rehman, S. T., & Kusi-Sarpong, H. (2023). Sustainable supplier selection based on industry 4.0 initiatives within the context of circular economy implementation in supply chain operations. *Production planning and control*, *34*(10), 999–1019. https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1980906

[25] Nasrollahi, M., Fathi, M. R., Sobhani, S. M., Khosravi, A., & Noorbakhsh, A. (2023). Modeling resilient supplier selection criteria in desalination supply chain based on fuzzy DEMATEL and ISM. In *Sustainable logistics systems using ai-based meta-heuristics approaches* (pp. 101–115). Routledge. http://dx.doi.org/10.4324/9781032634401-9

[26] Rezaei, A. R., & Qiong, L. (2024). Robust supply chain network design with resilient supplier selection under disruption risks. *Journal of applied research on industrial engineering*, *11*(3), 398–422. https://doi.org/10.22105/jarie.2023.417363.1564
[27] 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*, 1–24. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17851-2
[28] Ghamari, R., Mahdavi-Mazdeh, M., & Ghannadpour, S. F. (2022). Resilient and sustainable supplier selection via a new framework: A case study from the steel industry. *Environment, development and sustainability*, 1–39. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01872-5
[29] Nayeri, S., Khoei, M. A., Rouhani-Tazangi, M. R., GhanavatiNejad, M., Rahmani, M., & Tirkolaee, E. B. (2023). A data-driven model for sustainable and resilient supplier selection and order allocation problem in a responsive supply chain: A case study of healthcare system. *Engineering applications of artificial intelligence*, *124*, 106511. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106511
[30] Rahnamay Bonab, S., Haseli, G., Rajabzadeh, H., Ghoushchi, S., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Tomášková, 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), 153–185. http://dx.doi.org/10.31181/dmame12012023b
[31] Sheykhizadeh, M., Ghasemi, R., Vandchali, H. R., Sepehri, A., & Torabi, S. A. (2024). A hybrid decision-making framework for a supplier selection problem based on lean, agile, resilience, and green criteria: A case study of a pharmaceutical industry. *Environment, development and sustainability*, *26*(12), 30969–30996. https://doi.org/10.1007/s10668-023-04135-7
[32] Varchandi, S., Memari, A., & Jokar, M. R. A. (2024). An integrated best–worst method and fuzzy TOPSIS for resilient-sustainable supplier selection. *Decision analytics journal*, *11*, 100488. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100488
[33] Becerra, P., & Diaz, J. (2025). Supplier selection model considering sustainable and resilience aspects for mining industry. *Systems*, *13*(2), 81. https://doi.org/10.3390/systems13020081
[34] Laily, A. R. N., & Masruroh, N. A. (2025). Supplier selection model considering resilience and sustainability aspects. *AIP conference proceedings*. AIP Publishing. https://doi.org/10.1063/5.0231054
[35] Tajally, A., Babakhani, B., Jeyzanibrahimzade, E., Parvin, M., & Irani, S. (2025). Sustainable supplier selection and order allocation problem considering the agility and resilience dimensions: A novel multi-stage data-driven decision-making approach. *International journal of systems science: Operations & logistics*, *12*(1), 2458756. https://doi.org/10.1080/23302674.2025.2458756
[36] Tajally, A., Vamarzani, M. Z., Ghanavati-Nejad, M., Zeynali, F. R., Abbasian, M., & Bahengam, A. (2025). A hybrid machine learning-based decision-making model for viable supplier selection problem considering circular economy dimensions. *Environment, development and sustainability*, 1–33. https://doi.org/10.1007/s10668-025-06014-9
[37] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2023). Towards a responsive supply chain based on the industry 5.0 dimensions: A novel decision-making method. *Expert systems with applications*, *213*, 119267. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119267
[38] Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, *53*, 49–57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009
[39] Hosseini, Z. S., Flapper, S. D., & Pirayesh, M. (2022). Sustainable supplier selection and order allocation under demand, supplier availability and supplier grading uncertainties. *Computers and industrial engineering*, *165*, 107811. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107811
[40] Parsa Rad, A., Khalilzadeh, M., Banihashemi, S. A., Božanić, D., Milić, A., & Ćirović, G. (2024). Supplier selection in downstream oil and gas and petrochemicals with the Fuzzy BWM and gray COCOSO methods considering sustainability criteria and uncertainty conditions. *Sustainability*, *16*(2), 880. https://doi.org/10.3390/su16020880
[41] Amiri, M., Hashemi-Tabatabaei, M., Ghahremanloo, M., Keshavarz-Ghorabaee, M., Zavadskas, E. K., & Banaitis, A. (2021). A new fuzzy BWM approach for evaluating and selecting a sustainable supplier in supply chain management. *International journal of sustainable development & world ecology*, *28*(2), 125–142. DOI:10.1080/13504509.2020.1793424
[42] Noruzi, M., Naderan, A., Zakeri, J. A., & Rahimov, K. (2023). A novel decision-making framework to evaluate rail transport development projects considering sustainability under uncertainty. *Sustainability*, *15*(17), 13086. https://doi.org/10.3390/su151713086
[43] Liu, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2012). New machine learning algorithm: random forest. *International conference on information computing and applications* (pp. 246–252). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34062-8_32
[44] Wilson, V. H., NS, A. P., Shankharan, A., Kapoor, S., & Rajan, J. (2020). Ranking of supplier performance using machine learning algorithm of random forest. *International journal of advanced research in engineering and technology (IJARET)*, *11*(5), 298–308. https://doi.org/10.34218/IJARET.11.5.2020.031
[45] Advitha, G., Varaprasad, A. N., Khushi, K. V., Vijay, P., & Nayak, S. (2024). Cultivating clean skies: Unveiling the tapestry of air quality in Gujarat through innovative machine learning analysis. *Big data and computing visions*, *4*(4), 326–339. https://doi.org/10.22105/bdcv.2024.485515.1213
[46] Yunxia, G. (2017). *Application research of supplier evaluation based on random forest* [presentation]. Proceedings of the 6th international conference on software and computer applications (pp. 316–323). http://dx.doi.org/10.1145/3056662.3056718
[47] Kıran, M., Eşme, E., Torğul, B., & Paksoy, T. (2020). Supplier selection with machine learning algorithms. In *Logistics 4.0* (pp. 103–125). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780429327636-11
[48] Lahtinen, J. (2021). *Clustering and classification of material suppliers using machine learning algorithms*. https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021050328621
[49] Chaouni Benabdellah, A., Zekhnini, K., Cherrafi, A., Garza-Reyes, J. A., Kumar, A., & El Baz, J. (2023). Blockchain technology for viable circular digital supplychains: an integrated approach for evaluating the implementation barriers. *Benchmarking: An international journal*, *30*(10), 4397–4424. https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2022-0240

[50] Eskandari-Khanghahi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Taleizadeh, A. A., & Amin, S. H. (2018). Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty. *Engineering applications of artificial intelligence*, *71*, 236–250. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.03.004

[51] 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*. https://doi.org/10.1108/JEIM-09-2019-0294

[52] Akbari-Kasgari, M., Khademi-Zare, H., Fakhrzad, M. B., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Honarvar, M. (2022). Designing a resilient and sustainable closed-loop supply chain network in copper industry. *Clean technologies and environmental policy*, 1–28. https://doi.org/10.1007/s10098-021-02266-x

[53] Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2023). Designing an IoT-enabled supply chain network considering the perspective of the fifth industrial revolution: Application in the medical devices industry. *Engineering applications of artificial intelligence*, *122*, 106113. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106113

[54] Fallahpour, A., Nayeri, S., Sheikhalishahi, M., Wong, K. Y., Tian, G., & Fathollahi-Fard, A. M. (2021). A hyper-hybrid fuzzy decision-making framework for the sustainable-resilient supplier selection problem: A case study of Malaysian Palm oil industry. *Environmental science and pollution research*. https://doi.org/10.1007/s11356-021-12491-y

[55] Urata, T., Yamada, T., Itsubo, N., & Inoue, M. (2017). Global supply chain network design and Asian analysis with material-based carbon emissions and tax. *Computers & industrial engineering*, *113*, 779–792. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.032

[56] Moheb-Alizadeh, H., & Handfield, R. (2019). Sustainable supplier selection and order allocation: A novel multi-objective programming model with a hybrid solution approach. *Computers & industrial engineering*, *129*, 192–209. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.011

[57] Muthuswamy., M., & Ali, A. (2023). Sustainable supply chain management in the age of machine intelligence: addressing challenges, capitalizing on opportunities, and shaping the future landscape. *Sustainable machine intelligence journal*, *3*, 1–4. https://doi.org/10.61185/SMIJ.2023.33103

[58] Ghazvinian, A., Feng, B., Feng, J., Talebzadeh, H., & Dzikuć, M. (2024). Lean, agile, resilient, green, and sustainable (LARGS) supplier selection using multi-criteria structural equation modeling under fuzzy environments. *Sustainability 2024*, *16*(4), 1594. https://doi.org/10.3390/SU16041594

[59] Asadi, Z., Aghajani, H., Khatir, M. V., & Tirkolaee, E. B. (2025). Viable-sustainable supplier selection and order allocation problem considering Industry 5.0 pillars under mixed uncertainty. *International journal of production research*, 1–26. https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2502848

[60] Nayeri, S., Zhain, V. M., Asadi, Z., Sazvar, Z., Javadian, N., & others. (2024). Raw material provider selection problem considering the digitalization, circular economy and resilience dimensions: a case study. *International journal of industrial engineering & production research*, *35*(3), 1–20. https://doi.org/10.22068/ijiepr.35.3.1997

[61] Sahebjamnia, N. (2020). Resilient supplier selection and order allocation under uncertainty. *Scientia iranica*, *27*(1 E). https://doi.org/10.24200/SCI.2018.5547.1337

[62] Zekhnini, K., Cherrafi, A., Bouhaddou, I., Benghabrit, Y., & Garza-Reyes, J. A. (2020). Supplier selection for smart supply chain: An adaptive fuzzy-neuro approach. *Proceedings of the international conference on industrial engineering and operations management.* IEOM Society International. https://www.researchgate.net/publication/352159349

[63] Agarwal, R., & Nishad, A. K. (2024). A fuzzy mathematical modeling for evaluation and selection of a best sustainable and resilient supplier by using EDAS technique. *Process integration and optimization for sustainability*, *8*(1), 71–80. https://doi.org/10.1007/s41660-023-00352-9

[64] Davoudabadi, R., Mousavi, S. M., Mohagheghi, V., & Vahdani, B. (2019). Resilient supplier selection through introducing a new interval-valued intuitionistic fuzzy evaluation and decision-making framework. *Arabian journal for science and engineering*, *44*(8), 7351–7360. https://doi.org/10.1007/s13369-019-03891-x

[65] Mansory, A., Nasiri, A., & Mohammadi, N. (2021). Proposing an integrated model for evaluation of green and resilient suppliers by path analysis, SWARA and TOPSIS. *Journal of applied research on industrial engineering*, *8*(2), 129–149. https://doi.org/10.22105/jarie.2021.256316.1206

[66] Chaouni Benabdellah, G., Bennis, K., Chaouni Benabdellah, A., & Zekhnini, K. (2022). *Resilient sustainable supplier selection criteria assessment for economics enhancement in industry 4.0 context* [presentation]. IFIP advances in information and communication technology. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94335-6_14

[67] Sun, L., Yu, C., Li, J., Yuan, Q., & Zhao, S. (2025). A two-stage decision model for sustainable-resilient supplier selection and order allocation under uncertain environment. *Kybernetes*, *54*(8), 4078–4113. https://doi.org/10.1108/K-11-2023-2347

[68] Kumar, D., Soni, G., Joshi, R., Jain, V., & Sohal, A. (2022). Modelling supply chain viability during COVID - 19 disruption : A case of an Indian automobile manufacturing supply chain. *Operations management research*, 1224–1240. https://doi.org/10.1007/s12063-022-00277-5

[69] Wilhelm, W., Liang, D., Rao, B., Warrier, D., Zhu, X., & Bulusu, S. (2005). Design of international assembly systems and their supply chains under NAFTA. *Transportation research part e: logistics and transportation review*, *41*(6), 467–493. https://doi.org/10.1016/j.tre.2005.06.002

[70] Zhao, P., Ji, S., & Xue, Y. (2023). An integrated approach based on the decision-theoretic rough set for resilient-sustainable supplier selection and order allocation. *Kybernetes*, *52*(3), 774–808. https://doi.org/10.1108/K-11-2020-0821

[71] Sazvar, Z., Tavakoli, M., Ghanavati-Nejad, M., & Nayeri, S. (In Press). Sustainable-resilient supplier evaluation for high-consumption drugs during COVID-19 pandemic using a data-driven decision-making approach. *Scientia iranica*. https://doi.org/10.24200/sci.2022.59789.6424

[72] Yadav, G., Kumar, A., Luthra, S., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V., & Batista, L. (2020). A framework to achieve sustainability in manufacturing organisations of developing economies using industry 4.0 technologies' enablers. *Computers in industry*, *122*, 103280. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103280

[73] Kumar, V. (2024). Income prediction using machine learning. *Soft computing fusion with applications*, *1*(3), 152–162. https://doi.org/10.22105/scfa.v1i3.46