




Paper Type: Original Article

Analyzing the Quality of Digitalization in Supply Chain Collaboration Models Using an Integrated Fuzzy BWM-TOPSIS Approach

Shahab Bayatzadeh¹ , Hamidreza Talaei² , Ali Sorourkhah^{3,*} 

¹ Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabatabaie University, Tehran, Iran; shahabbayatzadeh@gmail.com.

² Department of Industrial Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, Arak University, Arak, Iran; h-talaei@araku.ac.ir.

³ Department of Management, Aindegan Institute of Higher Education, Tonekabon, Iran; sorourkhah@aihe.ac.ir.

Citation:

Received: 28 December 2023

Revised: 17 March 2024

Accepted: 03 May 2024

Bayatzadeh, Sh., Talaei, H., & Sorourkhah, A. (2024). Analyzing the quality of digitalization in supply chain collaboration models using an integrated fuzzy BWM-TOPSIS approach. *Journal of Quality Engineering and Management*, 14(3), 224-243.

Abstract

Purpose: This study aims to evaluate and rank collaboration models in the rubber industry supply chain of Iran from the perspective of digitalization quality. Digitalization quality refers to the effective use of Industry 4.0 technologies to improve transparency, integration, agility, resilience, and sustainability. The rubber industry was selected due to its operational complexity and urgent need for digital transformation.


Methodology: A multi-criteria decision-making approach was adopted, combining the Fuzzy Best-Worst Method (BWM) for weighting the evaluation criteria and TOPSIS for ranking the collaboration models. Sensitivity analysis was also conducted to test the robustness of the results under varying criteria weights.

Findings: Results indicate that the digital supply chain model ranks highest in terms of digitalization quality, with "technology integration" emerging as the most critical criterion. The sensitivity analysis confirms the robustness and stability of the rankings across different weight scenarios.

Originality/Value: This research uniquely addresses the comparative assessment of collaboration models in the rubber industry based on digitalization quality. The use of a Fuzzy BWM-TOPSIS hybrid method and comprehensive sensitivity analysis provides a novel, practical framework for strategic decision-making in digital supply chain transformation.

Keywords: Rubber industry, Industry 4.0, Digital supply chain, Best-worst fuzzy, Supply chain quality.

 Corresponding Author: sorourkhah@aihe.ac.ir

 10.48313/jqem.2025.516446.1513



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>).



تحلیلی بر کیفیت دیجیتالی سازی مدل های همکاری زنجیره تامین با رویکرد ترکیبی Fuzzy

BWM-TOPSIS

شهاب بیات زاده^۱، حمیدرضا طلایی^۲، علی سرورخواه^۳^۱ گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.^۲ گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اراک، اراک، ایران.^۳ گروه مدیریت، موسسه آموزش عالی آیندگان، تنکابن، ایران.

چکیده

هدف: هدف این پژوهش، ارزیابی و رتبه‌بندی مدل‌های همکاری در زنجیره‌تامین صنعت لاستیک ایران از منظر کیفیت دیجیتال‌سازی است. منظور از کیفیت دیجیتال‌سازی، میزان بهره‌گیری موثر از فناوری‌های صنعت ۴/۰ برای ارتقای شفافیت، یکپارچگی، چابکی، تاب‌آوری و پایداری در زنجیره‌تامین است. انتخاب صنعت لاستیک به دلیل پیچیدگی‌های عملیاتی و نیاز مبرم به تحول دیجیتال در این صنعت بوده است. روش‌شناسی پژوهش: در این پژوهش، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره با ترکیب بهترین-بدترین فازی (Fuzzy BWM) و TOPSIS استفاده شده است. ابتدا با نظر خبرگان، وزن معیارهای کلیدی تعیین شد و سپس مدل‌های مختلف همکاری رتبه‌بندی شدند. برای بررسی پایداری نتایج، تحلیل حساسیت روی تغییر وزن معیارها نیز انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل زنجیره‌تامین دیجیتال دارای بالاترین کیفیت دیجیتال‌سازی است و معیار "یکپارچگی فناوری" بیشترین اهمیت را دارد. همچنین تحلیل حساسیت نشان داد که مدل دیجیتال در اکثر سناریوهای تغییر وزن، پایداری بالایی در رتبه‌بندی دارد و نتایج از استحکام مناسبی برخوردارند.

اصالت/ارزش افزوده علمی: این پژوهش با تمرکز بر صنعت لاستیک ایران، به تحلیل تطبیقی مدل‌های همکاری از منظر کیفیت دیجیتال‌سازی پرداخته و از ترکیب Fuzzy BWM و TOPSIS به‌عنوان روشی قابل تکرار برای انتخاب مدل همکاری بهینه بهره‌برده است. همچنین، تحلیل حساسیت انجام‌شده، شفافیت بالاتری به تصمیم‌گیری می‌بخشد.

کلیدواژه‌ها: صنعت لاستیک، صنعت ۴/۰، زنجیره‌تامین دیجیتال، بهترین-بدترین فازی، کیفیت زنجیره‌تامین.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، صنعت لاستیک در ایران با چالش‌های متعددی همچون نوسانات قیمت مواد اولیه، تغییرات تقاضا، مشکلات تامین مواد اولیه و نیاز به بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و توزیع مواجه بوده است. این صنعت، به‌عنوان یکی از صنایع حیاتی در بخش خودروسازی و حمل‌ونقل، نیازمند

اتخاذ رویکردهای نوین برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها است. در این میان، فناوری‌های صنعت ۴/۰ نظیر اینترنت اشیا^۱، هوش مصنوعی^۲، بلاک‌چین، سیستم‌های سایبر-فیزیکی^۳ و کلان‌داده، امکان بهینه‌سازی زنجیره‌تامین این صنعت را فراهم کرده‌اند. این فناوری‌ها می‌توانند با افزایش شفافیت، بهبود هماهنگی میان تامین‌کنندگان و تولیدکنندگان و کاهش تاخیرهای ناشی از عدم تطابق عرضه و تقاضا، نقش بسزایی در بهبود عملکرد صنعت لاستیک داشته باشند [1]. این تحول به‌طور قابل توجهی به مدل‌های همکاری گسترش می‌یابد و بر نحوه برقراری روابط خریدار و تامین‌کننده، تبادل اطلاعات و مدیریت همکاری کلی تاثیر می‌گذارد [2]. صنعت لاستیک، با زنجیره‌های تامین پیچیده و پراکنده جغرافیایی، به‌طور قابل توجهی از پذیرش فناوری‌های صنعت ۴/۰ و مدل‌های همکاری مرتبط با آن‌ها سود می‌برد. شبکه پیچیده تامین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و کاربران نهایی این صنعت، نیازمند همکاری موثر برای اطمینان از عملیات کارآمد و برآورده کردن تقاضاهای بازار است. پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴/۰ می‌تواند همکاری را در کل زنجیره ارزش افزایش دهد و شفافیت، قابلیت ردیابی و کارایی را بهبود بخشد [3].

کیفیت دیجیتال‌سازی به میزان توانمندی یک زنجیره‌تامین در به‌کارگیری موثر فناوری‌های صنعت ۴/۰ برای بهبود فرآیندهای کلیدی، افزایش انعطاف‌پذیری، پاسخ‌گویی سریع‌تر به نیاز مشتری و ارتقای کنترل کیفیت در بستر دیجیتال اطلاق می‌شود [4]. این مفهوم، نه تنها شامل دیجیتال‌سازی کردن فعالیت‌های سنتی کنترل کیفیت است، بلکه به یکپارچگی داده‌ها، خودکارسازی فرآیندها و توسعه قابلیت‌های تصمیم‌گیری بلادرنگ در سراسر چرخه ارزش نیز توجه دارد [5]. مدل‌های همکاری در زنجیره‌تامین به‌عنوان یک راهکار اساسی برای افزایش کارایی در این صنعت مطرح شده‌اند. همکاری موثر میان تامین‌کنندگان مواد اولیه، تولیدکنندگان لاستیک، توزیع‌کنندگان و مصرف‌کنندگان نهایی، می‌تواند به کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش سرعت تحویل و بهبود کیفیت محصولات منجر شود [6]. در این راستا، فناوری‌های صنعت ۴/۰ می‌توانند زمینه‌ساز تحول در نحوه همکاری میان این بازیگران باشند [7]، [8]. به‌عنوان مثال، استفاده از هوش مصنوعی در پیش‌بینی تقاضا و بلاک‌چین در افزایش شفافیت تراکنش‌ها، از جمله کاربردهای این فناوری‌ها در زنجیره‌تامین لاستیک محسوب می‌شوند [9].

تامین و خرید مواد اولیه، به‌عنوان یکی از مراحل حیاتی در زنجیره‌تامین صنعت لاستیک، نقشی کلیدی در حرکت به‌سوی اهداف پایداری ایفا می‌کند. در این راستا، به‌کارگیری فناوری‌های توانمندساز صنعت ۴/۰ نظیر اینترنت اشیا می‌تواند موجب تحول در زیرساخت‌های تامین شده و فرآیندها را هوشمندتر، شفاف‌تر و کارا تر سازد. به‌طور خاص، ردیابی لحظه‌ای منابع و مواد اولیه از طریق حسگرهای متصل به *IoT*، امکان مدیریت دقیق‌تر موجودی، کاهش مصرف منابع و بهبود تاب‌آوری زنجیره‌تامین را فراهم می‌آورد [10].

در حالی که ادغام فناوری‌های صنعت ۴/۰ فرصت‌های قابل توجهی برای بهبود همکاری در زنجیره‌تامین صنعت لاستیک ارائه می‌دهد، چالش‌های متعددی نیز برای اجرای موفق این فناوری‌ها وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرند. یکی از چالش‌های اساسی، یکپارچه‌سازی داده‌ها و قابلیت همکاری سیستم‌ها است. ادغام داده‌ها از منابع مختلف زنجیره‌تامین پیچیده بوده و نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجه در زیرساخت‌ها و استانداردسازی است. عدم سازگاری بین سیستم‌های مختلف می‌تواند مانع تبادل روان داده‌ها و همکاری اثربخش شود. علاوه بر این، ریسک‌های امنیت سایبری با افزایش وابستگی به فناوری‌های دیجیتال افزایش می‌یابد که مستلزم تدابیر امنیتی قوی برای حفاظت از داده‌های حساس و جلوگیری از اختلالات است. نقض امنیت داده‌ها می‌تواند اعتماد بین شرکای زنجیره‌تامین را کاهش داده و همکاری را تحت تاثیر منفی قرار دهد [11].

یکی از چالش‌های اساسی در مسیر دیجیتال‌سازی زنجیره‌تامین، میزان آمادگی فناوری‌ها و الزامات سرمایه‌گذاری اولیه است. پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴/۰ مستلزم ایجاد زیرساخت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مناسب، نوسازی سامانه‌های اطلاعاتی و ارتقای امنیت داده‌هاست [12]، [13].

با وجود این چالش‌ها، فرصت‌های ناشی از فناوری‌های صنعت ۴/۰ در بهبود همکاری‌های زنجیره‌تامین صنعت لاستیک بسیار قابل توجه است. اجرای موفق این فناوری‌ها می‌تواند منجر به افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها، تقویت تاب‌آوری زنجیره‌تامین و بهبود پایداری شود. پرداختن به

¹ Internet of Things (IoT)

² Artificial Intelligence (AI)

³ Cyber-Physical Systems (CPS)

چالش‌ها از طریق سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های لازم، توسعه مهارت‌های نیروی کار و تنظیم سیاست‌های حمایتی، برای بهره‌گیری کامل از ظرفیت‌های صنعت ۴/۰ در تحول زنجیره‌تامین لاستیک ضروری است.

مطالعات متعددی بر اهمیت دیجیتال‌سازی زنجیره‌تامین تاکید کرده‌اند [14]. به‌عنوان مثال، پژوهش چینواتاناسوک و همکاران [1] تاثیر فناوری‌های دیجیتال را بر پایداری زنجیره‌تامین صنعت لاستیک بررسی کرده، اما بر مدل‌های همکاری متمرکز نبوده‌اند. همچنین، پژوهش هروگا [3] مدل مفهومی زنجیره‌تامین دیجیتال را مطرح کرده ولی از منظر مقایسه میان مدل‌های همکاری در یک صنعت خاص بررسی صورت نگرفته است. در این مطالعات هم بعد تطبیقی و تصمیم‌محور همکاری‌های دیجیتال مغفول مانده است.

از سوی دیگر، در اغلب تحقیقات پیشین، اولویت با شناسایی و تحلیل روابط علی میان معیارها با استفاده از روش‌هایی مانند *fuzzy DEMATEL* یا *DANP* بوده است [15-17]، نه انتخاب و تصمیم‌گیری میان گزینه‌های اجرایی همکاری. این در حالی است که در فضای واقعی تصمیم‌گیری در صنایع، انتخاب میان مدل‌های همکاری قابل اجرا که بتوانند کیفیت دیجیتال‌سازی زنجیره‌تامین را بهینه کنند، از اهمیت بالاتری برخوردار است. به بیان دیگر، صرف تحلیل ساختاری روابط معیارها، پاسخگوی نیاز مدیران برای انتخاب راهکارهای مناسب در پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال نخواهد بود.

بر همین اساس، این پژوهش به شکاف تحقیقاتی موجود در تحلیل تطبیقی مدل‌های همکاری زنجیره‌تامین در صنعت لاستیک، با تمرکز بر سنجش کیفیت دیجیتال‌سازی در هر مدل پاسخ می‌دهد. منظور از کیفیت دیجیتال‌سازی در اینجا، میزان بهره‌گیری موثر از فناوری‌های صنعت ۴/۰ در ارتقای شاخص‌هایی مانند یکپارچگی فناوری، شفافیت اطلاعات، کارایی عملیاتی، تاب‌آوری و پایداری زنجیره است. برای دستیابی به این هدف، از ترکیب روش بهترین-بدترین فازی (*Fuzzy BWM*) برای وزن‌دهی معیارها و روش *TOPSIS* برای رتبه‌بندی مدل‌ها استفاده شده است. این ترکیب، به دلیل مزایایی همچون تعداد کمتر مقایسه‌های زوجی، سادگی کاربرد در فضای قضاوت خبرگان و مناسب بودن برای ارزیابی کیفیت عملکرد گزینه‌ها در شرایط عدم قطعیت انتخاب شده است [18]. این رویکرد کمک می‌کند تا تصمیم‌گیرندگان صنعت لاستیک بتوانند با دقت و اطمینان بیشتر، مدل همکاری مناسبی را انتخاب کنند که بالاترین سطح از کیفیت دیجیتال‌سازی را در زنجیره‌تامین رقم بزنند.

۲- مبانی نظری پژوهش

۲-۱- صنعت ۴/۰ و زنجیره‌تامین

یکی از ویژگی‌های کلیدی زنجیره‌تامین ۴/۰، ادغام فناوری‌های نوین در تمام سطوح زنجیره‌تامین است که منجر به بهینه‌سازی عملیات و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. در این رویکرد، فرآیندهای سنتی تامین، تولید و توزیع با ابزارهای دیجیتال جایگزین شده و فرآیندهای هوشمند نظیر پردازش و انتقال داده‌های پیشرفته، استفاده از چاپ سه‌بعدی، اتوماسیون مبتنی بر رباتیک و تحلیلات پیش‌بینی‌کننده به محیط‌های تولید و توزیع اضافه شده است. این امر نه تنها انعطاف‌پذیری و پاسخگویی زنجیره‌تامین را در برابر تغییرات و اختلالات افزایش می‌دهد بلکه باعث کاهش تاخیرها، بهینه‌سازی استفاده از منابع و افزایش بهره‌وری کلی سیستم نیز می‌شود [18].

اصطلاح زنجیره‌تامین ۴/۰ یا زنجیره‌تامین هوشمند به‌طور خاص بر تحول دیجیتالی زنجیره‌های تامین سنتی دلالت دارد و نشان‌دهنده یکپارچگی فناوری‌های صنعت ۴/۰ در تمامی بخش‌های زنجیره‌تامین است [18]. در این مدل، همگام‌سازی بین شبکه‌های دیجیتال، سخت‌افزار و نرم‌افزار از طریق داده‌های عظیم، هوش مصنوعی و ارتباطات آبی بین ذینفعان مختلف امکان‌پذیر شده است [19]. این سطح از اتصال و هوشمندی، سازمان‌ها را قادر می‌سازد تا همکاری قوی‌تر، تصمیم‌گیری سریع‌تر و عملکرد کارآمدتری در زنجیره‌تامین داشته باشند و در نتیجه، سازگاری بیشتری با تغییرات بازار و نیازهای مشتریان به دست آورند [20].

۲-۲- همکاری در زنجیره‌تامین

همکاری در زنجیره‌تامین یک رویکرد استراتژیک است که به شرکت‌ها امکان می‌دهد تا از منابع و دانش شرکای خود برای بهبود عملکرد و افزایش مزیت رقابتی بهره‌مند شوند [21]، [22]. این همکاری شامل هفت عنصر کلیدی به هم پیوسته است: ۱- اشتراک‌گذاری اطلاعات، ۲- هم‌راستایی

اهداف، ۳- هماهنگی تصمیم‌گیری، ۴- تطابق مشوق‌ها، ۵- اشتراک منابع، ۶- ارتباطات تعاملی و ۷- ایجاد دانش مشترک. گرچه همکاری در زنجیره‌تامین می‌تواند منجر به بهبود عملکرد سازمان‌ها شود، اما بسیاری از این ابتکارات به دلیل پیچیدگی‌های موجود در اجرا با چالش‌هایی مواجه می‌شوند. مقایسه و ارزیابی شیوه‌های همکاری در زنجیره‌تامین با دیگر زنجیره‌های تامین موفق می‌تواند به شناسایی نقاط ضعف و فرصت‌های بهبود کمک کند [23].

با پیشرفت فناوری‌های نرم‌افزاری بین‌سازمانی و سیستم‌های ارتباطی، روش‌های متعددی برای پشتیبانی از مدیریت زنجیره‌تامین مبتنی بر همکاری توسعه یافته‌اند. از جمله مزایای کلیدی این همکاری می‌توان به کاهش هزینه‌ها، افزایش بازده دارایی‌ها، بهبود قابلیت اطمینان و افزایش انعطاف‌پذیری در پاسخگویی به نیازهای بازار اشاره کرد. با این حال، مدیران باید هنگام اجرای سیستم‌های همکاری، نه تنها هزینه‌های کلی مالکیت فناوری را در نظر بگیرند، بلکه هزینه فرصت‌های از دست‌رفته ناشی از انتخاب یک مدل خاص از همکاری را نیز ارزیابی کنند [24].

۲-۳- مدل‌های همکاری در زنجیره‌تامین مبتنی بر فناوری‌های صنعت ۴/۰

در صنعت ۴/۰، مدل‌های همکاری در زنجیره‌تامین با استفاده از فناوری‌های دیجیتال پیشرفته دچار تحول شده‌اند. این فناوری‌ها شامل اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، بلاک‌چین، پردازش ابری و تحلیل داده‌های کلان (*Big Data*) هستند که موجب افزایش شفافیت، سرعت، دقت و انعطاف‌پذیری در زنجیره‌تامین می‌شوند. در این بخش، چهار مدل کلیدی همکاری در زنجیره‌تامین در صنعت ۴/۰ شامل زنجیره‌تامین مشارکتی، زنجیره‌تامین پویا، زنجیره‌تامین دیجیتال و زنجیره‌تامین پایدار بررسی می‌شود.

۱-۳-۲- زنجیره‌تامین مشارکتی

زنجیره‌تامین مشارکتی بر همکاری نزدیک میان ذینفعان زنجیره‌تامین تأکید دارد و شامل اشتراک‌گذاری اطلاعات، برنامه‌ریزی مشترک و مدیریت ریسک به صورت هماهنگ است. این مدل با استفاده از فناوری‌های صنعت ۴/۰ مانند اینترنت اشیا، پردازش ابری و تحلیل داده‌های کلان، امکان تبادل داده‌های لحظه‌ای و تصمیم‌گیری هوشمند را برای شرکای زنجیره‌تامین فراهم می‌کند. زنجیره‌تامین مشارکتی منجر به بهبود شفافیت، کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش هماهنگی میان بخش‌های مختلف زنجیره‌تامین می‌شود [2].

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، نیاز به اعتماد بالا میان شرکای زنجیره‌تامین برای اشتراک‌گذاری اطلاعات حساس است. علاوه بر این، مشکلات مربوط به یکپارچه‌سازی سیستم‌های اطلاعاتی و تفاوت در استانداردهای داده‌ای می‌تواند مانعی جدی در اجرای این مدل باشد. نگرانی‌های امنیتی ناشی از تبادل گسترده داده‌های دیجیتال و پیچیدگی در مدیریت و هماهنگی میان شرکای متعدد نیز از دیگر چالش‌های زنجیره‌تامین مشارکتی به شمار می‌روند [23].

۲-۳-۲- زنجیره‌تامین پویا

زنجیره‌تامین پویا بر انعطاف‌پذیری و قابلیت انطباق سریع با تغییرات محیطی، نوسانات بازار و عدم قطعیت‌های تامین تمرکز دارد. این مدل از فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های کلان بهره می‌برد تا امکان پیش‌بینی تقاضا، شناسایی ریسک‌های احتمالی و واکنش سریع به تغییرات را برای سازمان‌ها فراهم کند. زنجیره‌تامین پویا به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد که فرآیندهای خود را به طور مداوم بهینه‌سازی کنند و در برابر اختلالات و چالش‌های غیرمنتظره مقاوم باشند [25].

در زنجیره‌تامین پویا، نیاز به سیستم‌های پیشرفته تحلیل داده و پیش‌بینی یکی از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود که ممکن است هزینه‌های بالایی را به سازمان‌ها تحمیل کند. همچنین، هماهنگ‌سازی فرآیندهای زنجیره‌تامین با تغییرات سریع بازار به دلیل ماهیت پویا و غیرقابل پیش‌بینی آن، کاری دشوار است. وابستگی زیاد به فناوری‌های دیجیتال نیز باعث افزایش آسیب‌پذیری در برابر حملات سایبری می‌شود. علاوه بر این، ایجاد فرهنگ سازمانی که پذیرای تغییرات مداوم و تصمیم‌گیری‌های سریع باشد، یکی دیگر از چالش‌های مهم در پیاده‌سازی این مدل است [26].

۳-۲-۳- زنجیره تامین دیجیتال

زنجیره تامین دیجیتال بر پایه یکپارچه سازی فناوری های دیجیتال در تمام بخش های زنجیره تامین استوار است. در این مدل، سازمان ها از فناوری هایی مانند بلاک چین، همزاد دیجیتال و سیستم های سایبر-فیزیکی استفاده می کنند تا زنجیره تامین را به صورت یکپارچه و داده محور مدیریت کنند. این مدل موجب افزایش شفافیت، بهبود قابلیت ردیابی، کاهش هزینه های لجستیکی و بهینه سازی فرآیندهای تامین، تولید و توزیع می شود [27]. همزاد دیجیتال (*Digital Twin*) به عنوان ابزاری نوآورانه برای مدل سازی، شبیه سازی و پایش بلادرنگ زنجیره تامین شناخته می شود. این فناوری می تواند نقش کلیدی در ارتقای کیفیت دیجیتال سازی ایفا کرده و امکان ارزیابی بهتر مدل های همکاری را فراهم آورد [28].

زنجیره تامین دیجیتال نیز با چالش هایی همچون نیاز به سرمایه گذاری بالا در فناوری های دیجیتال و زیرساخت های فناورانه مواجه است. خطرات امنیت سایبری و حملات هکری به داده های زنجیره تامین از دیگر دغدغه های مهم در این مدل هستند. علاوه بر این، مشکلات مربوط به استانداردهای داده ها و ایجاد یکپارچگی میان سیستم های دیجیتال مختلف می تواند مانع از پیاده سازی کامل زنجیره تامین دیجیتال شود. مقاومت برخی شرکت ها و کارکنان در برابر تغییر نیز به دلیل پیچیدگی و هزینه های اجرایی بالا از دیگر چالش های پیش روی این مدل است [29].

۳-۲-۴- زنجیره تامین پایدار

زنجیره تامین پایدار با هدف کاهش اثرات زیست محیطی و اجتماعی زنجیره تامین طراحی شده است [30]. این مدل از فناوری های صنعت ۴/۰ مانند بلاک چین، اینترنت اشیا و تحلیل داده های کلان برای پایش عملکرد زیست محیطی، کاهش ضایعات، افزایش بهره وری منابع و بهبود مسئولیت پذیری اجتماعی شرکت ها استفاده می کند [30]، [31]. زنجیره تامین پایدار سازمان ها را قادر می سازد تا در عین حفظ مزیت رقابتی، استانداردهای زیست محیطی و مقررات بین المللی را رعایت کنند [32].

در زنجیره تامین پایدار، یکی از چالش های اصلی، ایجاد تعادل بین اهداف اقتصادی و زیست محیطی است که ممکن است هزینه های تولید را افزایش دهد [33]. نیاز به شفافیت بالا و قابلیت ردیابی نیز مستلزم بهره گیری از زیرساخت های پیشرفته فناوری است که اجرای آن را دشوار می کند. علاوه بر این، پیاده سازی مقررات زیست محیطی و هماهنگی با استانداردهای بین المللی از دیگر چالش های این مدل به شمار می آید. در نهایت، مقاومت برخی از ذینفعان زنجیره تامین در برابر پذیرش تغییرات پایدار به دلیل افزایش هزینه ها و پیچیدگی اجرایی، یکی دیگر از موانع پیش روی توسعه این مدل همکاری است [34].

در جدول ۱ جمع بندی و مقایسه این مدل ها به صورت خلاصه بیان شده است.

جدول ۱- مقایسه مدل های همکاری در زنجیره تامین.

Table 1- Comparison of supply chain collaboration models.

مدل همکاری	نماد	تمرکز اصلی	فناوری های کلیدی صنعت ۴/۰	چالش ها
مشارکتی	S1	همکاری و اشتراک گذاری اطلاعات	اینترنت اشیا، پردازش ابری و تحلیل داده ها	نیاز به اعتماد بالا و یکپارچه سازی پیچیده
پویا	S2	انعطاف پذیری در برابر تغییرات بازار	هوش مصنوعی، کلان داده و یادگیری ماشین	مدیریت پیچیدگی و نیاز به متخصصان ماهر
دیجیتال	S3	یکپارچه سازی کامل زنجیره تامین	بلاک چین، همزاد دیجیتال و اینترنت اشیا	هزینه های بالا و امنیت داده
پایدار	S4	کاهش اثرات زیست محیطی و اجتماعی	بلاک چین و اینترنت اشیا	توازن بین سود اقتصادی و پایداری

۴-۲- معیارهای ارزیابی مدل های همکاری در زنجیره تامین

معیارهای رتبه بندی مدل های همکاری در زنجیره تامین بر اساس اثربخشی آن ها در بهره گیری از فناوری های صنعت ۴/۰ شامل چندین عامل کلیدی است که بسته به صنعت، شرایط کسب و کار و اهداف مورد نظر می تواند متفاوت باشد. هیچ مدل واحدی به عنوان بهترین وجود ندارد و انتخاب بهینه

به نیازها و اولویتهای خاص سازمان بستگی دارد. با این حال، بر اساس مطالعات انجام شده، معیارهای زیر می‌توانند برای ارزیابی و رتبه‌بندی مدل‌های همکاری مورد استفاده قرار گیرند.

۲-۴-۱- یکپارچگی فناوری‌های صنعت ۴/۰

مدل‌هایی که طیف وسیع‌تری از فناوری‌های صنعت ۴/۰ از جمله اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده و بلاک‌چین را به‌طور موثر ادغام کرده‌اند، احتمالاً در دستیابی به نتایج مطلوب موفق‌تر خواهند بود. این نه تنها شامل پذیرش فناوری، بلکه توانایی بهره‌برداری از داده‌های تولیدشده توسط این فناوری‌ها برای بهبود تصمیم‌گیری را نیز در بر می‌گیرد [33].

۲-۴-۲- شفافیت و قابلیت مشاهده زنجیره‌تأمین

مدل‌هایی که دید بهتر و شفافیت بیشتری در عملیات زنجیره‌تأمین فراهم می‌کنند، امکان پایش بهتر، مدیریت ریسک موثرتر و تصمیم‌گیری دقیق‌تر را مهیا می‌سازند. این معیار به‌ویژه در زنجیره‌های تأمین پیچیده و پویا از اهمیت بالایی برخوردار است [35].

۲-۴-۳- کارایی و چابکی زنجیره‌تأمین

مدل‌هایی که منجر به بهبود قابل توجه در کارایی زنجیره‌تأمین، افزایش چابکی و پاسخگویی به تغییرات بازار می‌شوند، دارای ارزش بالایی هستند که شامل کاهش زمان تحویل، کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد تحویل به موقع است [36].

۲-۴-۴- تاب‌آوری زنجیره‌تأمین

مدل‌هایی که تاب‌آوری زنجیره‌تأمین را در برابر اختلالات و عدم قطعیت‌ها، از جمله بحران‌های ناشی از پاندمی‌ها، بلایای طبیعی یا رویدادهای ژئوپلیتیکی افزایش می‌دهند، در محیط ناپایدار جهانی امروز از اهمیت بالایی برخوردارند. این امر شامل ایجاد افزونگی، انعطاف‌پذیری و قابلیت انطباق در زنجیره‌تأمین است [33]، [36].

۲-۴-۵- ملاحظات پایداری

مدل‌هایی که ملاحظات پایداری از جمله تاثیرات زیست‌محیطی، مسئولیت اجتماعی و تأمین منابع اخلاقی را در طراحی و اجرای خود لحاظ می‌کنند، به‌طور فزاینده‌ای اهمیت پیدا کرده‌اند. این شامل پایش عملکرد زیست‌محیطی و اجتماعی در سراسر زنجیره‌تأمین و اتخاذ شیوه‌هایی است که اثرات منفی را به حداقل می‌رسانند [37].

این معیارها به همراه نماد مربوطه در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲- معیارهای ارزیابی مدل‌های همکاری در زنجیره‌تأمین.

Table 2- Criteria for evaluating supply chain collaboration models.

نماد	معیار
C1	یکپارچگی با فناوری‌های صنعت ۴/۰
C2	شفافیت و قابلیت مشاهده زنجیره‌تأمین
C3	کارایی و چابکی زنجیره‌تأمین
C4	تاب‌آوری زنجیره‌تأمین
C5	ملاحظات پایداری

۳- پیشینه پژوهش

مقاله هروگا [3] به بررسی مدل جدید زنجیره تامین همکاری دیجیتال^۱ مبتنی بر فناوری های نوین صنعت ۴/۰ پرداخته، به نقش مهم فناوری های دیجیتال مانند بلاک چین، اینترنت اشیا و رایانش ابری (CC) در بهبود عملکرد و همکاری های زنجیره تامین اشاره دارد. این تحقیق ابتدا با تحلیل دقیق نحوه تاثیر این فناوری ها بر مکانیزم های همکاری در زنجیره تامین شروع می شود و سپس عوامل اصلی تاثیرگذار بر عملکرد CSC شناسایی و بررسی می شود. هدف نهایی، طراحی مدلی دیجیتال است که با استفاده از این فناوری ها، شفافیت، ردیابی و اعتماد را در همکاری های زنجیره تامین دیجیتال افزایش دهد. این مدل مفهومی می تواند به عنوان راهنمای مرجع برای تشویق و ترغیب بازیگران زنجیره تامین به همکاری در یک سیستم هوشمند و امن دیجیتال استفاده شود.

مطالعه اسماعیل و همکاران [38] به تحلیل تغییرات عمده ای که در زنجیره تامین و نحوه عملکرد بنگاه ها در پاسخ به چالش های پیچیده محیط کسب و کار، جهانی شدن، بحران ها و پاندمی ها ایجاد شده، پرداخته است. با توجه به این تغییرات و فشارهای اقتصادی و اجتماعی، نیاز به تبدیل زنجیره تامین به یک زنجیره تامین مقاوم و پایدار بیش از پیش احساس می شود. در این راستا، این پژوهش به استفاده از فناوری های نوین مانند هوش مصنوعی و تجزیه و تحلیل داده های کلان به عنوان بخش های اصلی از تکنیک های هوشمند در صنعت ۴/۰ و ۵/۰ می پردازد. مدل ارزیابی پیشنهادی برای ارزیابی بنگاه هایی که از این فناوری ها در زنجیره تامین خود بهره می برند، استفاده می کند. نتایج نشان می دهد که امنیت داده ها به عنوان شاخص کلیدی برتر در نظر گرفته می شود و شفافیت به عنوان یکی از شاخص های اصلی در ارزیابی تاثیرگذار است.

مطالعه ازبک و ایلدیز [39] به بررسی تاثیر تحولات دیجیتال و فناوری های نوین در صنعت ۴/۰ بر مدیریت زنجیره تامین می پردازد. با پیشرفت های اخیر در تکنولوژی های دیجیتال و تولید، صنعت ۴/۰ به طور قابل توجهی بر بهبود فرآیندهای تولید و مهندسی، بهینه سازی روابط مشتریان و سازمان ها، ایجاد فرصت های جدید کسب و کار و افزایش بهره وری اقتصادی تاثیر گذاشته است. یکی از بخش هایی که تحت تاثیر این تغییرات قرار گرفته، مدیریت زنجیره تامین است. صنعت ۴/۰ با فراهم کردن زنجیره تامین دیجیتال و ایجاد ارتباط هوشمند میان تامین کنندگان، تولید، لجستیک و مشتریان، عملکرد شرکت های مادر را بهبود بخشیده است. هدف این تحقیق، انتخاب بهترین تامین کنندگان دیجیتال از میان تامین کنندگان یک شرکت مادر در صنعت پوشاک با استفاده از فناوری های صنعت ۴/۰ است.

مطالعه لیو و همکاران [40] بر انتخاب بهترین شریک برای همکاری در یک زنجیره تامین دو مرحله ای از طریق تحلیل مرزی داده ها تمرکز دارد تا عملکرد سیستم های همکاری را ارزیابی کند. در این تحقیق، دو سطح مختلف همکاری در زنجیره تامین تفکیک شده اند: ۱- همکاری زنجیره به زنجیره و ۲- همکاری مرحله به مرحله. در سطح همکاری زنجیره به زنجیره، انتخاب شریک درون همان زنجیره تامین و در دو مرحله مختلف صورت می گیرد، در حالی که در سطح همکاری مرحله به مرحله، شریک ها از زنجیره های تامین مختلف انتخاب می شوند. اثر یادگیری فناوری و سه درجه همکاری (کم، متوسط و زیاد) برای هر دو سطح همکاری معرفی شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که همکاری زیاد در سطح مرحله به مرحله عملکرد بهتری به همراه دارد. همچنین، یک مثال عددی و یک مطالعه موردی واقعی برای نمایش مدل ها و یافته ها ارائه شده که نشان می دهد روش پیشنهادی مزایای بیشتری نسبت به روش های موجود دارد و گزینه های انعطاف پذیری بیشتری برای بهینه سازی روابط همکاری در محیط های پیچیده زنجیره تامین چند مرحله ای فراهم می آورد.

مطالعه ژو و همکاران [41] به بررسی نقش چابکی زنجیره تامین به عنوان یک قابلیت کلیدی برای شرکت ها در دستیابی به عملکرد برتر در محیط های کسب و کار نامطمئن می پردازد. چابکی زنجیره تامین دستیابی به آن دشوار است، زیرا نیازمند همکاری نزدیک و درعین حال منعطف شرکت ها و شرکای زنجیره تامین آن ها در مرزهای سازمانی است. این تحقیق با گسترش ادبیات شی مرزی به زمینه زنجیره تامین، مکانیسمی را که از طریق آن سیستم های بین سازمانی^۲ که به طور گسترده برای عبور از مرزهای سازمانی از طریق ارتباطات دیجیتال میان شرکتی به کار گرفته می شوند، چابکی

¹ Construction Supply Chain (CSC)

² Inter-Organizational Systems (IOS)

زنجیره‌تامین را در محیط‌های نامطمئن تقویت می‌کنند، معرفی می‌کنند. مفهوم همکاری در زنجیره‌تامین به‌عنوان مکانیزم میانجی بین دو ویژگی کلیدی *IOS* (یعنی استانداردسازی و سازگاری) و چابکی زنجیره‌تامین معرفی شده است. عدم اطمینان محیطی به‌عنوان شرایط زمینه‌ای در نظریه‌پردازی زمینه‌ای *IOS* به‌عنوان شی‌مرزی در نظر گرفته می‌شود. فرضیات حاصل از این مطالعه از طریق یک نظرسنجی دو موجی از مدیران ارشد کسب‌وکار و فناوری اطلاعات در ۱۵۶ شرکت تولیدی آزمایش شده است. نتایج تجربی از فرضیات بیشتر حمایت می‌کنند و پیامدهایی برای توسعه نظریه و کاربردهای حرفه‌ای در این زمینه مطرح می‌شود.

در میان فناوری‌های توانمندساز صنعت ۴/۰، فناوری بلاک‌چین به‌عنوان ابزاری تحول‌آفرین در همکاری‌های زنجیره‌تامین شناخته می‌شود. پژوهش کوئرز و همکاران [42] با مرور نظام‌مند مطالعات، نشان می‌دهد که ادغام بلاک‌چین با زنجیره‌تامین (*Blockchain-SCM integration*) هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارد، اما پتانسیل بالایی برای بازنگری مدل‌های سنتی تعامل میان بازیگران زنجیره دارد. ویژگی‌هایی چون شفافیت بالا، قابلیت ردیابی، حذف واسطه‌ها و قراردادهای هوشمند، امکان ایجاد همکاری‌های امن‌تر و بدون اصطکاک را فراهم می‌آورند.

در حالی که تمامی این مطالعات بر اهمیت فناوری‌های صنعت ۴/۰ و تاثیر آن‌ها بر همکاری و شفافیت در زنجیره‌تامین تاکید دارند، تحقیق ما بر مدل خاصی برای صنعت لاستیک ایران متمرکز است و تلاش دارد تا با استفاده از ترکیب بلاک‌چین و اینترنت اشیا یک مدل مفهومی ایجاد کند که به‌طور خاص به نیازهای این صنعت پاسخ دهد. همچنین، در حالی که بسیاری از مطالعات دیگر به بررسی جنبه‌های کلی‌تر همکاری در زنجیره‌تامین پرداخته‌اند، پژوهش ما بر تحلیل و ارزیابی عوامل تاثیرگذار در صنعت لاستیک به‌ویژه از منظر فناوری‌های صنعت ۴/۰ تاکید دارد.

۴- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، تحلیلی با نتایجی کاربردی و از لحاظ گردآوری اطلاعات، در دسته پژوهش‌های توصیفی-پیمایشی قرار می‌گیرد. در این پژوهش به شناسایی و رتبه‌بندی مدل‌های همکاری دیجیتال در زنجیره‌تامین صنعت لاستیک ایران با استفاده از فناوری‌های صنعت ۴/۰ پرداخته شده است. ابتدا معیارهای ارزیابی این مدل‌ها از طریق مطالعه ادبیات پژوهش شناسایی شده‌اند. برای وزن‌دهی به معیارها از روش بهترین-بدترین فازی و برای رتبه‌بندی مدل‌ها از روش تاپسیس استفاده شده است. نمونه‌گیری در این پژوهش به‌صورت هدفمند و قضاوتی انجام شده و شامل ۱۰ خبره است که به‌طور مستقیم با موضوع پژوهش آشنایی دارند. مشخصات خبرگان در جدول ۳ نمایش داده شده است. این خبرگان از تجربه و تخصص کافی در زمینه مدیریت زنجیره‌تامین، فناوری‌های دیجیتال و صنعت لاستیک برخوردارند. نتایج پژوهش با تحلیل داده‌های حاصل از پرسشنامه‌های توزیع شده میان این خبرگان به‌دست آمده و معیارهای ارزیابی وزن‌دهی شده و مدل‌ها بر اساس اولویت‌های شناسایی شده رتبه‌بندی گردیده‌اند. در نهایت، نتایج به‌همراه پیشنهادهای برای استفاده عملی از این مدل‌ها در بهبود همکاری‌های دیجیتال در زنجیره‌تامین صنعت لاستیک ایران ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات خبرگان.

Table 3- Expert profiles.

شماره	تخصص و سمت	مدرک تحصیلی	سابقه کاری (سال)	حوزه تخصصی	تجربه در صنعت لاستیک
1	استاد دانشگاه	دکتری مهندسی صنایع	15	مدیریت زنجیره‌تامین	بهینه‌سازی زنجیره‌تامین در صنایع مختلف
2	استاد دانشگاه	دکتری مهندسی صنایع	12	فناوری اطلاعات و مدیریت زنجیره‌تامین	پژوهش در کاربرد فناوری در صنایع تولید از جمله لاستیک
3	مدیر تحقیق و توسعه	کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک	18	تولید و بهینه‌سازی فرآیندها	۱۲ سال تجربه در صنعت لاستیک
4	مشاور ارشد فناوری اطلاعات	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع	8	تحلیل داده و مدل‌سازی	تخصص در استفاده از فناوری در صنایع خودروسازی و لاستیک
5	مدیر فروش و بازاریابی	کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی	6	بازاریابی و استراتژی فروش	آشنایی با بازارهای لاستیک و ارتباطات با تامین‌کنندگان

جدول ۳- ادامه.
Table 3- Continued.

شماره	تخصص و سمت	مدرک تحصیلی	سابقه کاری (سال)	حوزه تخصصی	تجربه در صنعت لاستیک
6	استاد دانشگاه	دکتری مدیریت صنعتی	14	فناوری‌های دیجیتال و صنعتی	تدریس و پژوهش در زمینه پیاده‌سازی صنعت ۴/۰ در صنایع تولیدی
7	مدیر تولید	کارشناس ارشد مهندسی صنایع	12	مدیریت عملیات	۵ سال تجربه در کارخانه تولید لاستیک
8	مشاور فناوری اطلاعات	دکتری علوم کامپیوتر	10	هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها	استفاده از تحلیل داده در بهبود فرآیندهای تولید در صنایع مختلف
9	مدیر فنی و مهندسی	کارشناس ارشد مهندسی مواد	7	مهندسی و تولید لاستیک	تجربه در طراحی و تولید قطعات لاستیکی
10	مدیر پروژه‌های صنعتی	کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی	9	فناوری‌های صنعت ۴/۰	پیاده‌سازی و پژوهش در زمینه پیاده‌سازی صنعت ۴/۰

۴-۱- بهترین-بدترین فازی

روش بهترین-بدترین یکی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در آن ابتدا تصمیم‌گیرنده بهترین و بدترین معیار را از میان معیارها تعیین می‌کند. سپس سایر معیارها به صورت مقایسه‌های زوجی با این دو معیار (بهترین و بدترین) ارزیابی می‌شوند. پس از انجام این مقایسه‌ها، یک مدل ریاضی به شکل حداکثر-حداقل تنظیم شده و با حل آن، وزن نهایی معیارها محاسبه می‌شود. این روش به دلیل نیاز به تعداد کمتر مقایسه و دقت بالاتر در وزندهی نسبت به سایر روش‌های مشابه، از محبوبیت بالایی برخوردار است [43]، [44]. گو و ژائو [45] روش بهترین-بدترین فازی را به منظور کاهش چالش‌های ناشی از عدم قطعیت و افزایش دقت و انعطاف‌پذیری در فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره معرفی کردند. این رویکرد به ساده‌تر شدن محاسبات کمک می‌کند و به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که قضاوت‌های خود را به طور طبیعی‌تر و دقیق‌تر در شرایط پیچیده و نامطمئن اعمال کنند. ترکیب مدل فازی با روش بهترین-بدترین، ابزاری کارآمد برای بهبود مدیریت تصمیم‌گیری در محیط‌های با عدم قطعیت بالا ایجاد می‌کند [46].

گام‌های این روش به شرح زیر است [47]:

گام ۱- شناسایی معیارهای ارزیابی. فرض کنید مجموعه‌ای از معیارهای تصمیم‌گیری $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ وجود دارد که هر یک به بررسی جنبه‌های خاصی از گزینه‌ها پرداخته و در فرآیند تصمیم‌گیری منطقی و موثر کمک می‌کنند. این معیارها به طور کلی به تحلیل و ارزیابی ویژگی‌ها و عملکردهای مختلف گزینه‌ها پرداخته و به تصمیم‌گیرنده امکان می‌دهند تا بهترین انتخاب را با توجه به نیازها و اولویت‌های خود انجام دهد.

گام ۲- در این مرحله، تصمیم‌گیرندگان باید از میان مجموعه معیارهای شناسایی شده، مهم‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین معیارها را تفکیک کنند. این فرآیند به آن‌ها این امکان را می‌دهد که تمرکز خود را بر معیارهایی که بیشترین تاثیر را بر تصمیم نهایی دارند، بگذارند و معیارهایی که اهمیت کمتری دارند را در ارزیابی‌ها کمتر مدنظر قرار دهند. این شناسایی در فرآیند مقایسه‌ها و تخصیص وزن به هر معیار نقش اساسی ایفا خواهد کرد.

مهم‌ترین (بهترین) معیار به عنوان c_B و کم‌اهمیت‌ترین (بدترین) معیار به عنوان c_W نشان داده می‌شوند و به عنوان نقاط مرجع در مقایسه‌های زوجی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

گام ۳- اجرای مقایسه مرجع فازی برای معیار بهترین-بدترین فازی اهمیت ویژه‌ای دارد و شامل دو مرحله جداگانه است: ۱- مقایسه زوجی \tilde{a}_{ij} در شرایطی که i به عنوان بهترین معیار c_B انتخاب شده است و ۲- مقایسه زوجی \tilde{a}_{ij} زمانی که j کم‌اهمیت‌ترین معیار c_W باشد.

در این گام، مرحله اول که مقایسه بهترین معیار با سایر معیارها است، انجام می‌شود. با استفاده از متغیرهای زبانی تعریف شده در جدول ۴، ترجیحات فازی برای بهترین معیار نسبت به سایر معیارها مشخص می‌گردد. سپس این ترجیحات با استفاده از قوانین خاص به اعداد فازی سه‌گانه تبدیل می‌شوند. رابطه (۱) نیز بردار فازی ترجیحات مربوط به بهترین معیار در مقایسه با سایر معیارها را نمایش می‌دهد.

$$\tilde{A}_B = (\tilde{a}_{B1}, \tilde{a}_{B2}, \dots, \tilde{a}_{Bn}), \tag{1}$$

که در رابطه (۱)، \tilde{A}_B نمایانگر مقایسه فازی مهم‌ترین معیار c_B نسبت به معیار c_j است. واضح می‌باشد که مقدار $\tilde{a}_{BB} = (1,1,1)$ می‌باشد.

جدول ۴- متغیرهای زبانی و شاخص سازگاری برای روش بهترین-بدترین فازی.

Table 4- Linguistic variables and compatibility index for the best-worst fuzzy method.

متغیر زبانی	اهمیت یکسان EI	اهمیت کم WI	اهمیت نسبی FI	اهمیت زیاد VI	اهمیت خیلی زیاد AI
\tilde{a}_{BW}	(1,1,1)	(0.67,1,1.5)	(1.5,2,2.5)	(2.5,3,3.5)	(3.5,4,4.5)
CI	3	3.80	5.29	6.69	8.04

گام ۴- در این مرحله، مقایسه مرجع فازی برای کم‌اهمیت‌ترین معیار یا بدترین معیار انجام می‌شود. در این فرآیند، تمام معیارها نسبت به معیار کم‌اهمیت یا بدترین معیار c_w مقایسه می‌شوند. برای این منظور، از ارزیابی‌های زبانی که توسط تصمیم‌گیرندگان ارائه شده و در جدول ۴ ذکر گردیده، استفاده می‌شود. این ارزیابی‌ها سپس با کمک قوانین خاص به اعداد فازی سه‌گانه تبدیل شده و در مراحل محاسباتی بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رابطه (۲) نیز بردار فازی ترجیحات معیارها نسبت به بدترین معیار را نشان می‌دهد.

$$\tilde{A}_W = (\tilde{a}_{1W}, \tilde{a}_{2W}, \dots, \tilde{a}_{nW}), \tag{2}$$

که در رابطه (۲)، \tilde{A}_W نمایانگر مقایسه فازی معیار c_j نسبت به بدترین یا کم‌اهمیت‌ترین معیار c_w است. واضح می‌باشد که مقدار $\tilde{a}_{WW} = (1,1,1)$ می‌باشد.

گام ۵- تعیین وزن‌های بهینه فازی $(\tilde{w}_1^*, \tilde{w}_2^*, \dots, \tilde{w}_n^*)$. این گام به منظور تعیین وزن‌هایی برای معیارها طراحی شده است که بیشترین هم‌خوانی را با ترجیحات فازی میان معیارهای مختلف بهینه‌سازی کند. در این فرآیند، وزن‌های محاسبه شده باید بیشترین تطابق را با مقایسه‌های فازی مرجع (بردارهای فازی مقایسه بهترین با سایر معیارها و مقایسه سایر معیارها با بدترین) داشته باشند. هدف این مرحله کاهش ناسازگاری‌ها در مقایسه‌های فازی و بهینه‌سازی وزن‌های معیارها است. با حل مدل (۳)، وزن‌های نهایی معیارها محاسبه شده و به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری برای ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌ها استفاده می‌شود.

$$\min \xi^*$$

$$s.t \left\{ \begin{aligned} & \left| \frac{(l_B^w, m_B^w, u_B^w)}{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)} - (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj}) \right| \leq (k^*, k^*, k^*), \\ & \left| \frac{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)}{(l_W^w, m_W^w, u_W^w)} - (l_{jW}, m_{jW}, u_{jW}) \right| \leq (k^*, k^*, k^*), \\ & \sum_{j=1}^n R(\tilde{w}_j) = 1, \\ & l_j^w \leq m_j^w \leq u_j^w, \\ & l_j^w \geq 0, \\ & j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \right. \tag{3}$$

که در این مدل $k^* = (k^*, k^*, k^*)$ و $R(\tilde{w}_j)$ مقدار فازی زدایی شده \tilde{w}_j می‌باشد که از رابطه (۴) به‌دست می‌آید.

$$R(\tilde{w}_j) = \frac{l_j + 4m_j + u_j}{6} \tag{4}$$

نرخ سازگاری در روش بهترین-بدترین فازی توسط رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

$$CR = \frac{k^*}{CI} \tag{5}$$

که در این رابطه k^* از حل مدل (۳) و CI (شاخص سازگاری) از جدول ۴ به دست می آید. هرچه نرخ سازگاری به صفر نزدیک تر باشد، مدل از نظر تطابق و دقت بیشتر بهینه شده است [48]. با وجود اینکه هیچ استاندارد مشخصی برای تعیین نرخ سازگاری وجود ندارد، در این مطالعه مقادیر کمتر از ۰/۱ به عنوان مقادیر قابل قبول در نظر گرفته می شوند.

۴-۲- روش تاپسیس^۱

روش تاپسیس یکی از روش های متداول تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM) است که برای ارزیابی و رتبه بندی گزینه ها با توجه به معیارهای مختلف به کار می رود [49]. این روش بر اساس مفهومی از نزدیکی به بهترین راه حل ممکن (ایده آل مثبت) و فاصله از بدترین راه حل ممکن (ایده آل منفی) عمل می کند. در تاپسیس، گزینه ای که کمترین فاصله را از ایده آل مثبت و بیشترین فاصله را از ایده آل منفی داشته باشد، به عنوان بهترین گزینه انتخاب می شود. این ویژگی، تاپسیس را به ابزاری موثر برای حل مسایل پیچیده تصمیم گیری در زمینه های مختلف تبدیل کرده است [47].

گام های روش تاپسیس به صورت زیر می باشد [46]:

گام ۱- کمی کردن و بی مقیاس سازی ماتریس تصمیم N می باشد. این کار از بی مقیاس سازی نرم یا اقلیدسی توسط رابطه (۶) انجام می شود.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad (6)$$

که در رابطه (۶) x_{ij} ، عملکرد گزینه i نسبت به معیار j و r_{ij} مقدار نرمال شده اقلیدسی x_{ij} می باشد.

گام ۲- وزن هر معیار را در ستون مربوط به آن معیار، در ماتریس نرمالایز شده ضرب می کنیم.

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \quad (7)$$

که در رابطه (۷) w_j ، وزن معیار j و v_{ij} مقدار وزن دار شده r_{ij} می باشد.

گام ۳- تعیین راه حل ایده آل مثبت و راه حل ایده آل منفی از طریق رابطه (۸):

$$\begin{aligned} A^* &= \{(\max_i v_{ij} \mid j \in J), (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \mid i = 1, 2, \dots, m \}, \\ A^* &= \{ v_1^*, v_2^*, \dots, v_j^*, \dots, v_n^* \}, \\ c &= \{(\min_i v_{ij} \mid j \in J), (\max_i v_{ij} \mid j \in J') \mid i = 1, 2, \dots, m \}, \\ A^- &= \{ v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^- \}. \end{aligned} \quad (8)$$

v_j^* ، بهترین مقدار معیار j از بین تمام گزینه ها و v_j^- بدترین مقدار معیار j از بین تمام گزینه ها می باشند. J نشان دهنده معیارهایی از جنس سود و J' نشان دهنده معیارهایی از جنس هزینه می باشند. A^* و A^- به ترتیب بهترین گزینه و بدترین گزینه و یا همان راه حل ایده آل مثبت و راه حل ایده آل منفی می باشند.

گام ۴- فاصله هندسی همه گزینه ها را نسبت به ایده آل مثبت و منفی را از طریق رابطه (۹) به دست می آوریم.

¹ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, i=1,2,\dots,m, \tag{9}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i=1,2,\dots,m,$$

که در رابطه (۹)، S_i^* فاصله گزینه i از راه حل ایده آل مثبت و S_i^- فاصله گزینه i از راه حل ایده آل منفی می باشند.

گام ۵- شاخص شباهت برای هر آلترناتیو را از طریق رابطه (۱۰) محاسبه می کنیم.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}, 0 \leq C_i^* \leq 1, i=1,2,\dots,m. \tag{10}$$

در رابطه (۱۰)، C_i^* شاخص شباهت گزینه i می باشد. واضح است که اگر $A^+ = A_i$ آنگاه $C_i^* = 1$ و اگر $A^- = A_i$ آنگاه $C_i^* = 0$ داریم.

به طور خلاصه هر گزینه ای به راه حل ایده آل نزدیک تر باشد C_i^* به ۱ نزدیک تر می شود.

گام ۶- با توجه به مقدار C_i^* گزینه ها را به صورت نزولی رتبه بندی می کنیم.

۴-۳- تحلیل حساسیت

به منظور ارزیابی پایداری مدل تصمیم گیری، تحلیل حساسیت با تغییر تدریجی در وزن معیارها انجام شد. برای این منظور، یک اختلال کنترل شده بر روی وزن معیارها ω_k در نظر گرفته شد که در آن k نمایانگر شماره معیار ($k = 1, 2, 3, \dots, m$) است و وزن هر معیار به صورت ω'_k تغییر می کند. نسبت بین وزن جدید ω'_k و وزن اولیه ω_k با عنوان نسبت واحدی β_k تعریف می شود [50].

$$\beta_k = \frac{\omega'_k}{\omega_k}. \tag{11}$$

در این پژوهش، با اعمال تغییرات هدفمند بر وزن هر معیار به صورت جداگانه، تاثیر این تغییرات بر نتایج نهایی رتبه بندی مدل های همکاری بررسی شده است. این تحلیل به تصمیم گیرندگان کمک می کند تا میزان تاثیر هر معیار را در انتخاب مدل های برتر همکاری در زنجیره تامین صنعت لاستیک ایران بهتر درک کنند. همچنین، نسبت واحدی β_k به عنوان شاخصی برای سنجش حساسیت مدل به تغییر وزن هر معیار مورد استفاده قرار گرفته است.

هرگونه تغییر در وزن یک معیار ω_k منجر به تغییر همزمان سایر وزن ها نیز می شود، چراکه مجموع کل وزن ها باید برابر با عدد یک باقی بماند؛ بنابراین، تغییرات اعمال شده بر یک معیار باعث باز تخصیص مقادیر وزن در سایر معیارها خواهد شد که این رابطه مطابق با رابطه (۱۲) محاسبه می شود.

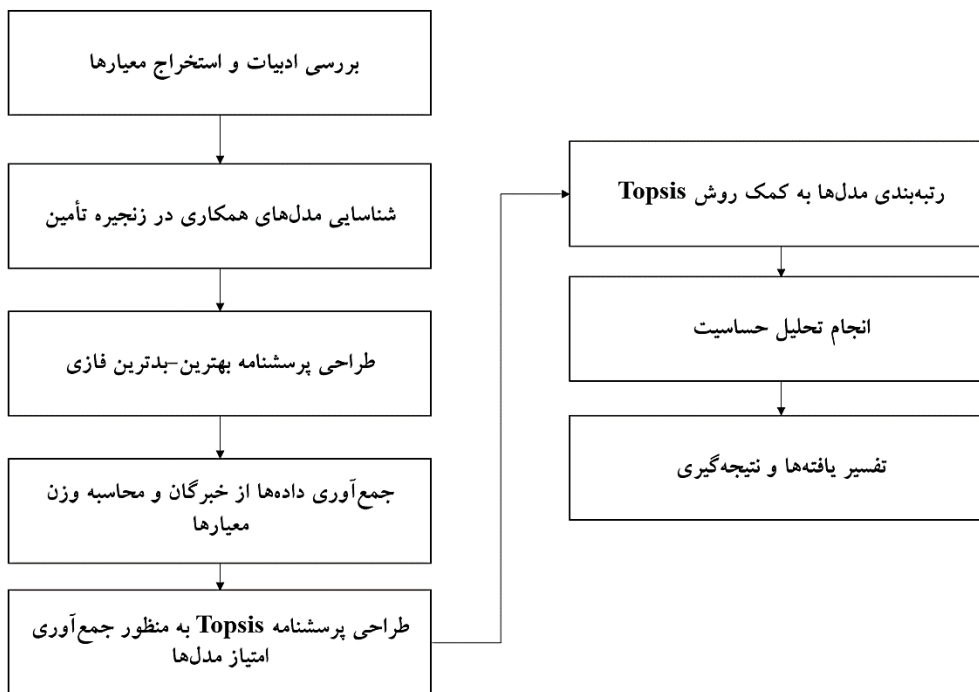
$$\omega'_n = \frac{\omega_n}{1 + (\gamma_k - 1)\omega_k}. \tag{12}$$

عبارت γ_k به عنوان نسبت تغییر اولیه تعریف می شود و به صورت زیر بیان می گردد:

$$\gamma_k = \frac{\beta_k - \beta_k \omega_k}{1 - \beta_k \omega_k}. \tag{13}$$

در این پژوهش، نه سناریو مختلف برای نسبت واحدی β_k مورد استفاده قرار گرفت که شامل مقادیر ۰٫۰۱، ۰٫۰۲، ۰٫۰۵، ۰٫۱، ۰٫۲، ۰٫۵، ۰٫۷۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ بود. پس از اعمال این ضرایب به وزن هر معیار، وزن ها مجدداً محاسبه شدند و به دنبال آن، امتیازات نهایی مدل ها و رتبه بندی ها نیز باز محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردیدند.

در ادامه، این فرآیند برای هر یک از معیارها به صورت جداگانه انجام شد و با القای تدریجی اختلال در وزن هر معیار، تغییرات حاصل در رتبه بندی مدل ها تحلیل گردید تا میزان حساسیت مدل تصمیم گیری نسبت به نوسانات وزن هر معیار مشخص شود.



شکل ۱- مراحل اجرای پژوهش.

Figure 1- Research implementation stages.

۵- یافته‌های پژوهش

پس از شناسایی معیارهای ارزیابی مدل‌های همکاری در زنجیره‌تأمین مبتنی بر فناوری‌های صنعت ۴/۰ بر اساس مطالعات پیشین (جدول ۲)، یک پرسشنامه طراحی شد تا این معیارها توسط خبرگان با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی ارزیابی شوند. به‌منظور وزن‌دهی به معیارها، از ۱۰ خبره که دارای تجربه و تخصص در زمینه فناوری‌های صنعت ۴/۰، مدیریت زنجیره‌تأمین و صنعت لاستیک بودند (طبق جدول ۳)، خواسته شد تا با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی، ترتیب اولویت‌های هر معیار را مشخص کنند. مقایسات انجام‌شده توسط خبره اول در جدول ۵ نمایش داده شده است.

جدول ۵- ترجیحات معیارها توسط خبره شماره ۱.

Table 5- Criteria preferences by expert 1.

C5	C4	C3	C2	C1	بدترین معیار	بهترین معیار
AI	VI	FI	WI	EI		C1
EI	WI	FI	VI	AI	C5	

پس از حل این مدل طبق مقایسات جدول ۵ توسط نرم‌افزار LINGO18.0 وزن‌های فازی به‌دست می‌آید.

$$\tilde{w}_1^* = (0.336, 0.339, 0.385),$$

$$\tilde{w}_2^* = (0.248, 0.262, 0.348),$$

$$\tilde{w}_3^* = (0.160, 0.172, 0.228),$$

$$\tilde{w}_4^* = (0.101, 0.103, 0.128),$$

$$\tilde{w}_5^* = (0.092, 0.092, 0.105),$$

$$\tilde{\xi}^* = (0.297, 0.297, 0.297).$$

ضریب سازگاری با توجه به جدول ۴ و رابطه (۸) برابر است با

$$CR = \frac{0.297}{8.04} = 0.0368 < 0.1.$$

مقدار دی‌فازی وزن‌ها با استفاده از رابطه (۷) برابر است با

$$w_1^* = 0.346; w_2^* = 0.274; w_3^* = 0.179; w_4^* = 0.107; w_5^* = 0.094.$$

سایر محاسبات برای معیارها به همین روش انجام شد. تعداد ۱۰ مدل ریاضی با استفاده از نرم افزار LINGO 18.0 حل گردید. در نهایت، نظرات خبرگان با استفاده از میانگین هندسی تجمیع شده و اوزان نهایی معیارها مشخص شد که در جدول ۶ نمایش داده شده اند. این رویکرد منجر به ارایه نتایج دقیق تر و اطمینان از انعکاس نظر تمامی خبرگان در اوزان نهایی شد.

جدول ۶- وزن نهایی معیارهای ارزیابی مدل های همکاری در زنجیره تامین.

Table 6- Final weight of criteria for evaluating supply chain collaboration models.

وزن نهایی	خبره ۱۰	خبره ۹	خبره ۸	خبره ۷	خبره ۶	خبره ۵	خبره ۴	خبره ۳	خبره ۲	خبره ۱	
0.340	0.356	0.274	0.397	0.346	0.307	0.344	0.346	0.356	0.318	0.346	یکپارچگی با فناوری های صنعت ۴/۰ (C1)
0.284	0.293	0.349	0.188	0.274	0.315	0.268	0.274	0.293	0.324	0.274	شفافیت و قابلیت مشاهده زنجیره تامین (C2)
0.172	0.172	0.179	0.188	0.179	0.150	0.152	0.179	0.172	0.164	0.179	کارایی و چابکی زنجیره تامین (C3)
0.107	0.085	0.107	0.125	0.107	0.149	0.108	0.107	0.085	0.100	0.107	تاب آوری زنجیره تامین (C4)
0.096	0.094	0.094	0.103	0.094	0.079	0.128	0.094	0.094	0.084	0.094	ملاحظات پایداری (C5)
	C1	C2	C1	C1	C2	C1	C1	C1	C2	C1	بهترین معیار
	C5	C5	C5	C5	C5	C4	C5	C4	C5	C5	بدترین معیار
	0.027	0.037	0.027	0.037	0.021	0.043	0.037	0.027	0.027	0.037	نرخ ناسازگاری

در این مطالعه، به منظور ارزیابی و رتبه بندی مدل های همکاری در زنجیره تامین مبتنی بر فناوری های صنعت ۴/۰، از روش تصمیم گیری چندمعیاره تاپسیس استفاده شد. پنج معیار ارزیابی شامل یکپارچگی با فناوری های صنعت ۴/۰، شفافیت و قابلیت مشاهده زنجیره تامین، کارایی و چابکی زنجیره تامین، تاب آوری زنجیره تامین و ملاحظات پایداری در نظر گرفته شدند. این معیارها همگی از ماهیت کیفی برخوردارند. برای امتیازدهی به مدل ها نسبت به این معیارها، از دیدگاه ده خبره (مشخصات در جدول ۳) با تخصص های مرتبط استفاده شد. از هر خبره خواسته شد تا بر اساس طیف لیکرت ۱ تا ۹، به هر مدل همکاری نسبت به هر معیار نمره ای اختصاص دهد، به طوری که نمرات بالاتر بیانگر عملکرد بهتر مدل در آن معیار بود. نتایج و رتبه بندی مدل های همکاری در جدول ۷ و جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۷- ماتریس نهایی وزین شده مقایسات تاپسیس.

Table 7- Final weighted matrix of TOPSIS comparisons.

مدل همکاری	یکپارچگی با فناوری های صنعت ۴/۰	شفافیت و قابلیت مشاهده زنجیره تامین	کارایی و چابکی زنجیره تامین	تاب آوری زنجیره تامین	ملاحظات پایداری
مشارکتی	0.167	0.139	0.078	0.046	0.040
پویا	0.181	0.130	0.103	0.060	0.046
دیجیتال	0.187	0.165	0.091	0.053	0.046
پایدار	0.142	0.132	0.069	0.054	0.054

جدول ۸- رتبه بندی نهایی مدل ها.

Table 8- Final ranking of models.

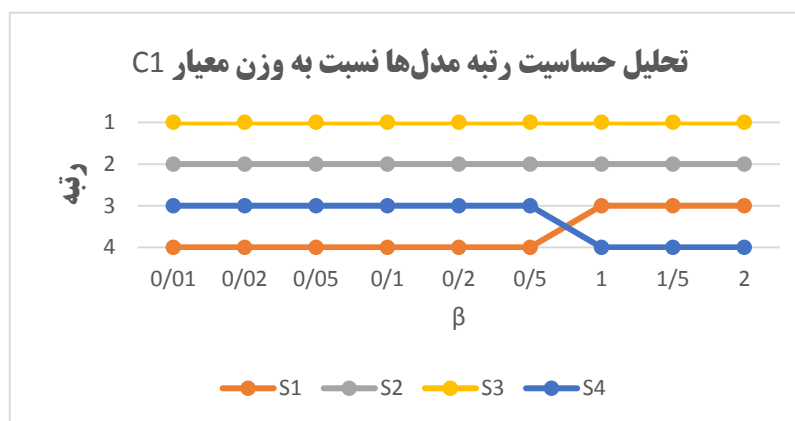
رتبه	شاخص شباهت	نماد	مدل همکاری
3	0.369	S1	مشارکتی
2	0.590	S2	پویا
1	0.763	S3	دیجیتال
4	0.242	S4	پایدار

برای بررسی میزان پایداری نتایج رتبه‌بندی، تحلیل حساسیت نسبت به تغییر وزن هر یک از معیارها به صورت جداگانه انجام شد. در ادامه، نتایج مربوط به معیار C1 اراپه شده است.

جدول ۹- تغییرات در وزن C1 و رتبه‌بندی متناسب با آن.

Table 9- Changes in C1 weight and corresponding ranking.

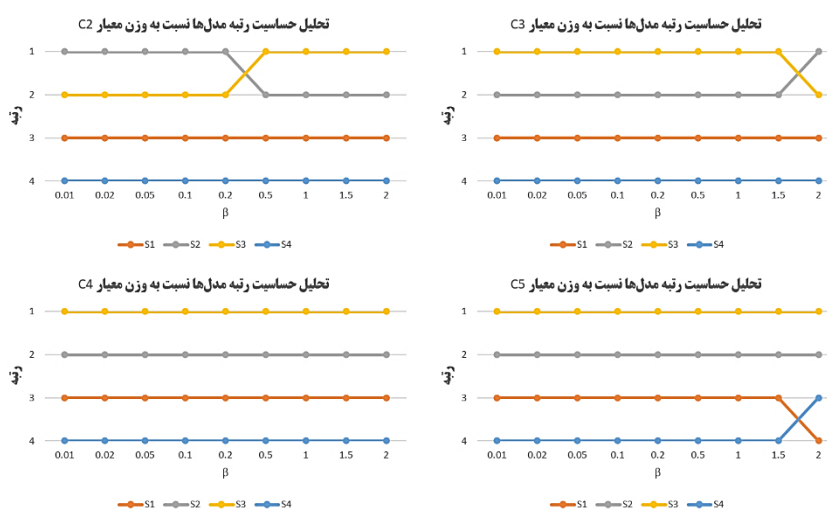
رتبه‌بندی	W5	W4	W3	W2	W1	β_1
S3>S2>S4>S1	0.145	0.162	0.260	0.429	0.003	0.01
S3>S2>S4>S1	0.144	0.161	0.259	0.427	0.007	0.02
S3>S2>S4>S1	0.143	0.159	0.256	0.423	0.017	0.05
S3>S2>S4>S1	0.141	0.157	0.252	0.416	0.034	0.10
S3>S2>S4>S1	0.136	0.151	0.243	0.401	0.068	0.20
S3>S2>S4>S1	0.121	0.135	0.216	0.357	0.170	0.50
S3>S2>S1>S4	0.096	0.107	0.172	0.284	0.340	1.00
S3>S2>S1>S4	0.071	0.079	0.128	0.211	0.510	1.50
S3>S2>S1>S4	0.047	0.052	0.083	0.138	0.680	2.00



شکل ۲- نمایش تغییرات رتبه‌بندی مدل‌ها با توجه به تغییرات در وزن C1.

Figure 2- Showing changes in the ranking of models according to changes in the C1 weight.

محاسبات برای معیارهای C2 تا C5 نیز انجام شد که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات رتبه‌بندی مدل‌ها نسبت به تغییرات وزنی معیارهای C2 تا C5.

Figure 3- Changes in the ranking of models relative to changes in the weights of criteria C2 to C5.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در فرآیند وزن‌دهی معیارها با استفاده از روش بهترین-بدترین فازی (Fuzzy BWM)، معیار یکپارچگی فناوری (CI) بالاترین وزن را به خود اختصاص داد. این موضوع را می‌توان ناشی از اهمیت بالای هماهنگی بین سیستم‌ها، پلتفرم‌ها و جریان اطلاعات در بستر دیجیتال‌سازی زنجیره‌تأمین دانست. از دیدگاه خبرگان صنعت لاستیک، بدون وجود یکپارچگی مناسب در زیرساخت‌های دیجیتال، حتی فناوری‌های پیشرفته مانند IoT یا هوش مصنوعی نیز نمی‌توانند به درستی عملکرد زنجیره را بهبود دهند؛ بنابراین، این معیار به‌عنوان زیرساخت و پیش‌نیاز سایر ابعاد دیجیتال‌سازی، نقش محوری دارد و به‌صورت طبیعی از بیشترین وزن برخوردار شده است.

در مقابل، معیار پایداری (C5) کمترین وزن را دریافت کرده است که با وجود روندهای جهانی و فشارهای ESG ممکن است در نگاه اول تعجب‌برانگیز باشد. با این حال، این نتیجه بازتاب‌دهنده واقعیت صنعت لاستیک ایران در شرایط کنونی است. بسیاری از تصمیم‌گیرندگان این صنعت، با چالش‌هایی چون محدودیت منابع مالی، نوسانات ارزی و فشار برای حفظ بقا مواجه‌اند؛ بنابراین، پایداری محیط‌زیستی و اجتماعی در اولویت‌های تصمیم‌گیری آن‌ها جایگاه پایین‌تری دارد. این یافته می‌تواند برای سیاست‌گذاران و نهادهای نظارتی مهم باشد، چراکه نشان می‌دهد بدون مشوق‌ها و حمایت‌های ساختاری، توجه به پایداری در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک جایگاهی نخواهد یافت.

زنجیره‌تأمین دیجیتال، با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند بلاک‌چین، اینترنت اشیا و سیستم‌های سایبر-فیزیکی، جایگاه اول را در این رتبه‌بندی به خود اختصاص داد. این مدل با تمرکز بر یکپارچه‌سازی داده‌ها و فرآیندها در تمامی بخش‌های زنجیره‌تأمین، شفافیت بالا، بهبود قابلیت ردیابی و کاهش هزینه‌های لجستیکی را به ارمغان می‌آورد. همچنین، استفاده از همزاد دیجیتال و تحلیل داده‌های کلان به شرکت‌ها کمک می‌کند تا تصمیمات بهینه‌تری اتخاذ کنند. از آنجا که این مدل توانسته است از پتانسیل‌های صنعت ۴/۰ به‌طور کامل بهره‌برداری کند و در مقایسه با سایر مدل‌ها قابلیت‌های بیشتری از نظر شفافیت، کارایی و تاب‌آوری ارائه دهد، توانسته است بالاترین رتبه را در این مطالعه به خود اختصاص دهد.

زنجیره‌تأمین پویا که بر انعطاف‌پذیری و توانایی انطباق با تغییرات محیطی و نوسانات بازار تأکید دارد، در رتبه دوم قرار گرفت. این مدل با استفاده از فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های کلان، سازمان‌ها را قادر می‌سازد تا به سرعت به اختلالات و تغییرات واکنش نشان دهند و فرآیندهای خود را به‌طور مداوم بهینه‌سازی کنند. از آنجا که این مدل با استفاده از پیش‌بینی تقاضا و شناسایی ریسک‌های احتمالی، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا در برابر نوسانات و اختلالات مقاوم‌تر شوند، توانسته است جایگاه مناسبی را در رتبه‌بندی کسب کند.

زنجیره‌تأمین مشارکتی که بر همکاری نزدیک و اشتراک‌گذاری اطلاعات بین شرکای زنجیره‌تأمین تأکید دارد، در رتبه سوم قرار گرفت. این مدل از فناوری‌های صنعت ۴/۰ برای تسهیل تبادل داده‌های لحظه‌ای و تصمیم‌گیری هوشمند میان شرکای زنجیره‌تأمین استفاده می‌کند. با وجود اینکه این مدل شفافیت و هماهنگی بالایی ایجاد می‌کند، چالش‌هایی مانند نیاز به اعتماد بالا میان شرکا و مشکلات مربوط به یکپارچه‌سازی سیستم‌های اطلاعاتی، مانع از این می‌شود که رتبه بالاتری نسبت به زنجیره‌تأمین‌های دیجیتال و پویا کسب کند. به‌ویژه، نگرانی‌های امنیتی و پیچیدگی مدیریت اطلاعات می‌تواند در بعضی شرایط محدودیت‌هایی ایجاد کند.

زنجیره‌تأمین پایدار که بر کاهش اثرات زیست‌محیطی و رعایت مسئولیت‌های اجتماعی تأکید دارد، در رتبه چهارم و پایین‌ترین جایگاه قرار گرفت. این مدل از فناوری‌های صنعت ۴/۰ مانند بلاک‌چین و تحلیل داده‌های کلان برای پایش عملکرد زیست‌محیطی و کاهش ضایعات استفاده می‌کند. با وجود اهمیت روزافزون مسایل زیست‌محیطی و اجتماعی در دنیای امروز، چالش‌هایی مانند تعادل بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی و نیاز به سرمایه‌گذاری بالا در زیرساخت‌های فناوری، موجب می‌شود که اجرای این مدل برای بسیاری از سازمان‌ها دشوار باشد. همچنین، هزینه‌های بالای پیاده‌سازی و مقاومت برخی ذینفعان در برابر تغییرات پایدار، باعث کاهش امتیاز این مدل در ارزیابی‌ها شده است.

تحلیل حساسیت انجام‌شده روی پنج معیار نشان می‌دهد که مدل دیجیتال (S3) در اغلب سناریوهای تغییر وزن، رتبه نخست خود را حفظ کرده و تنها در چند حالت خاص با وزن‌های غیرعادی بالا، دستخوش تغییرات جزئی شده است. به‌طور خاص معیار CI بر جابه‌جایی رتبه مدل‌های پایین‌تر S1 و S4 تأثیر داشت، اما رتبه اول مدل دیجیتال پایدار ماند. معیار C2 نقش مهمی در رقابت بین مدل‌های دیجیتال و پویا ایفا کرد؛ به‌طوری‌که در وزن‌های بالا، مدل پویا (S2) جایگاه اول را از مدل دیجیتال گرفت. در معیار C3 نیز همین الگو دیده شد تا وزن‌های بالا مدل دیجیتال صدرنشین

بود، اما در وزن ۲، مدل پویا برتری یافت. در مقابل، معیار C4 کمترین تاثیر را بر رتبه‌بندی داشت و نتایج کاملا پایدار باقی ماندند. در معیار C5 تاثیر در رتبه‌های پایین‌تر مشاهده شد؛ مدل پایدار (S4) تنها در وزن بالا توانست جای مدل مشارکتی را بگیرد.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل دیجیتال در برابر تغییرات متعارف وزندهی از پایداری و استحکام بالایی برخوردار است و در بیشتر سناریوها گزینه برتر باقی می‌ماند. با این حال، اگر سازمان‌ها تاکید بسیار زیادی بر معیارهایی مانند کارایی یا شفافیت داشته باشند، ممکن است مدل‌های دیگر مانند مدل پویا در رتبه‌بندی پیشی بگیرند. به‌طور کلی، تحلیل حساسیت انجام‌شده اعتبار و اتکاپذیری مدل ارایه‌شده را تقویت می‌کند و به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که بر اساس اولویت‌های استراتژیک خود، بهترین مدل همکاری را انتخاب کنند.

مدیران صنعت لاستیک می‌توانند با سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین مانند بلاک‌چین، اینترنت اشیا و سیستم‌های سایبر-فیزیکی، شفافیت و یکپارچگی در فرآیندهای تولید و تامین را افزایش دهند و اختلالات زنجیره‌تامین را کاهش دهند. همچنین، استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تقاضا و شناسایی ریسک‌ها می‌تواند تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری زنجیره‌تامین را بهبود بخشد.

توسعه همکاری‌های نزدیک‌تر با شرکای تجاری و تامین‌کنندگان، به‌ویژه در زمینه اشتراک‌گذاری داده‌ها و استانداردسازی اطلاعات، از دیگر اقداماتی است که می‌تواند به بهبود هماهنگی و کاهش هزینه‌ها کمک کند. همچنین، توجه به مسایل زیست‌محیطی و استفاده از فناوری‌هایی برای پایش عملکرد زیست‌محیطی، می‌تواند موجب تقویت مسئولیت اجتماعی و رقابت‌پذیری سازمان شود. برای موفقیت در این زمینه‌ها، مدیران باید نیروی انسانی خود را در استفاده از فناوری‌های نوین توانمند کنند و فرآیندهای تصمیم‌گیری را بهبود بخشند. ارزیابی مستمر مدل‌های زنجیره‌تامین برای مقایسه و بهینه‌سازی عملکرد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مطالعات پیشین نیز تاکید دارند که استفاده از فناوری‌های دیجیتال در بهبود عملکرد زنجیره‌تامین بسیار موثر است. هروگا [3] به اهمیت فناوری‌های صنعت ۴/۰ مانند بلاک‌چین و اینترنت اشیا در بهبود شفافیت و همکاری در زنجیره‌تامین اشاره کرده است که مشابه نتایج تحقیق ماست که فناوری‌های دیجیتال را به‌عنوان عامل کلیدی در افزایش همکاری‌ها و شفافیت شناسایی کرده‌ایم. همچنین، مطالعه اسماعیل و همکاران [38] بر لزوم تبدیل زنجیره‌تامین به مدل‌های مقاوم در برابر بحران‌ها تاکید کرده است که همسو با نتایج ماست که زنجیره‌تامین پویا و دیجیتال را به‌عنوان مدل‌های موثرتر در برابر اختلالات شناخته‌ایم. ازبک و ایلدیز [39] در پژوهش خود نیز بر تاثیر فناوری‌های صنعت ۴/۰ در بهینه‌سازی روابط تامین‌کنندگان و افزایش بهره‌وری تاکید دارند که نتایج مشابهی را با تحقیق ما در خصوص استفاده از فناوری‌های دیجیتال برای بهبود همکاری‌های زنجیره‌تامین می‌توان مشاهده کرد. در نهایت، مطالعه ژو و همکاران [41] به چابکی زنجیره‌تامین و همکاری نزدیک میان شرکای زنجیره اشاره دارد که در پژوهش ما نیز بر اهمیت این عوامل در ارزیابی و رتبه‌بندی مدل‌های همکاری تاکید شده است. در مجموع، نتایج این مطالعات و تحقیق ما هم‌راستا هستند و همگی به اهمیت فناوری‌های دیجیتال در بهبود عملکرد و همکاری‌های زنجیره‌تامین اشاره دارند.

برای پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود که مطالعاتی در صنایع مختلف لاستیک انجام شود تا تاثیرات عملی راهکارهای دیجیتال بر عملکرد زنجیره‌تامین بهتر ارزیابی گردد. همچنین، بررسی تعاملات پیچیده‌تر میان فناوری‌های صنعت ۴/۰ و عناصر مختلف زنجیره‌تامین می‌تواند به بهبود مدل‌های ارایه‌شده کمک کند. پژوهشگران می‌توانند به بررسی مدل‌های جدید همکاری در زنجیره‌تامین و تطبیق آن‌ها با ویژگی‌های خاص صنعت لاستیک بپردازند. تحلیل عمیق‌تری از چالش‌ها و فرصت‌های استفاده از فناوری‌های دیجیتال در شرایط بحران‌های جهانی و اختلالات زنجیره‌تامین نیز می‌تواند زمینه‌ساز تحقیقات آینده باشد.

محدودیت‌های این تحقیق شامل استفاده از تعداد محدود خبرگان و تمرکز بر صنعت لاستیک به‌طور خاص است که ممکن است نتایج به‌دست‌آمده به‌طور کامل قابل‌تعمیم به سایر صنایع نباشد. علاوه بر این، بررسی صرفاً بر روی راهکارهای دیجیتال و معیارهای خاصی انجام شده است و ممکن است برخی عوامل دیگر مانند عوامل انسانی، فرهنگی یا اقتصادی در این تحقیق نادیده گرفته شده باشد. همچنین، استفاده از روش‌های خاص تصمیم‌گیری چندمعیاره ممکن است برخی پیچیدگی‌های واقعی محیط‌های زنجیره‌تامین را که تحت تاثیر متغیرهای مختلف قرار دارند، به‌طور کامل مدل‌سازی نکند.

تشکر و قدردانی

سپاسگزاریم از همراهانی که با راهنمایی‌های ارزشمند و حمایت‌های بی‌دریغشان، تکمیل و ارایه این مقاله را ممکن ساختند.

منابع مالی

این پژوهش بدون استفاده از هیچ‌گونه حمایت یا منابع مالی تدوین شده است.

تعارض با منافع

نویسندگان در نگارش این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

منابع

- [1] Chienwattanasook, K., Tancho, N., Onputtha, S., Boonrattanakitbhum, C., Sriyakul, T., & Waiyawuththanapoom, P. (2022). The role of industry 4.0 in supply chain sustainability: Evidence from the rubber industry. *Uncertain supply chain management*, 10(4), 1243–1252. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2022.8.004>
- [2] Veile, J. W., Schmidt, M. C., Müller, J. M., & Voigt, K. I. (2024). The transformation of supply chain collaboration and design through Industry 4.0. *International journal of logistics research and applications*, 27(6), 986–1014. <https://doi.org/10.1080/13675567.2022.2148638>
- [3] Hrouga, M. (2024). Towards a new conceptual digital collaborative supply chain model based on Industry 4.0 technologies: A conceptual framework. *International journal of quality and reliability management*, 41(2), 628–655. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2022-0221>
- [4] Goswami, S. S., & Mondal, S. (2024). The role of 5G in enhancing IOT connectivity: A systematic review on applications, challenges, and future prospects. *Big data and computing visions*, 4(4), 314–325. <https://doi.org/10.22105/bdcv.2024.486159.1215>
- [5] Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., & Singh, R. K. (2021). Digitalization priorities of quality control processes for SMEs: A conceptual study in perspective of Industry 4.0 adoption. *Journal of intelligent manufacturing*, 32(6), 1679–1698. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01783-2>
- [6] Ajalli, M. (2024). Conceptual modeling of determining factors in the assessment of sustainability and resilience of the supply chain: a study of rubber industry suppliers in Iran. *Journal of rubber research*, 27(2), 259–274. <https://doi.org/10.1007/s42464-024-00257-3>
- [7] Ajalli, M., Azimi, H., & Zamani, F. (2024). The impact of blockchain technology on the internet of things in the fourth industrial revolution: Applications, opportunities, and challenges. *Modern research in performance evaluation*, 3(1), 60–73. **(In Persian)**. <https://doi.org/10.22105/mrpe.2024.201235>
- [8] Ebrahimi, M. (2024). Determining and ranking the indicators of evaluating the performance of wood industry-employees. *Journal of applied research on industrial engineering*, 11(2), 166–178. <https://doi.org/10.22105/jarie.2024.388802.1534>
- [9] Yadav, A., Sachdeva, A., Garg, R. K., Qureshi, K. M., Mewada, B. G., Al-Qahtani, M. M., & Qureshi, M. R. N. M. (2024). Challenges of blockchain adoption for manufacturing supply chain to achieve sustainability: A case of rubber industry. *Heliyon*, 10(20), e39448. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39448>
- [10] Pachouri, V., Singh, R., Gehlot, A., Pandey, S., Vaseem Akram, S., & Abbas, M. (2024). Empowering sustainability in the built environment: A technological Lens on industry 4.0 Enablers. *Technology in society*, 76, 102427. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102427>
- [11] Omrany, H., Al-Obaidi, K. M., Husain, A., & Ghaffarianhoseini, A. (2023). Digital Twins in the construction industry: A comprehensive review of current implementations, enabling technologies, and future directions. *Sustainability*, 15(14), 10908. <https://doi.org/10.3390/su151410908>
- [12] da Silva, T. H. H., & Sehnem, S. (2024). The utilization of Industry 4.0 technologies to enhance the circular economy through the engagement of stakeholders in Brazilian food technology companies. *Business strategy and the environment*, 34(1), 129–161. <https://doi.org/10.1002/bse.3954>
- [13] Bosman, L., Hartman, N., & Sutherland, J. (2020). How manufacturing firm characteristics can influence decision making for investing in Industry 4.0 technologies. *Journal of manufacturing technology management*, 31(5), 1117–1141. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0283>
- [14] Rezaei Manesh, B., Hamzavi, H., & Hosseini, S. M. (2025). Identifying and prioritizing drivers for optimizing sustainable performance of oil, gas, and petrochemical organizations with a futures research approach. *Modern research in performance evaluation*, 4(1), 11–26. **(In Persian)**. <https://doi.org/10.22105/mrpe.2025.506185.1146>
- [15] Heravi, A., Zamani Moghadam, A., Hashemi, S. A., Vakil Alroaia, Y., & Sajadi Jagharg, A. (2023). Evaluation of the influential factors in human resource development in state-owned enterprises using a mixed method. *Journal of applied research on industrial engineering*, 10(2), 238–255. <https://doi.org/10.22105/jarie.2021.284052.1322>
- [16] Czukor, G., Dinçer, H., Eti, S., Yüksel, S., & Pamucar, D. (2025). Integrating artificial intelligence into fuzzy decision analytics: A novel approach to mitigating stereotype threat in sustainable business environments. *Journal of fuzzy extension and applications*, 6(2), 371–390. <https://doi.org/10.22105/jfea.2025.480001.1641>

- [17] Siraj, M. T., Haque, M. R., Chowdhury, M. S., Islam, N., Biswas, B., & Chowdhury, M. K. H. (2024). Analyzing challenges in enterprise resource planning (ERP) implementation in a safety inspection company: An IVT2IF DEMATEL approach. *Optimality*, 1(2), 205–223. <https://doi.org/10.22105/opt.v1i2.50>
- [18] Bayatzadeh, S. and Amiri, M. (2024). Identifying and evaluating supplier selection criteria in Iran's steel industry according to Industry 4.0 technologies. *Innovation management and operational strategies*, 5(3), 306-330. **(In Persian)**. <https://doi.org/10.22105/imos.2024.472776.1379>
- [19] Thakur, R., Raj, M., & Malik, S. C. (2025). Correlation coefficient measures for probabilistic single valued neutrosophic hesitant fuzzy sets and its application in supply chain management. *Journal of fuzzy extension and applications*, 6(2), 391–409. <https://doi.org/10.22105/jfea.2025.475283.1602>
- [20] Adolph Groenewald, C., Garg, A., Santosh Yerasuri, S., Sharma, H., & Sibonghanoy Groenewald, E. (2024). Smart supply chain management optimization and risk mitigation with artificial intelligence. *Naturalista campano*, 28(1), 261–270. <https://museonaturalistico.it/index.php/journal/article/view/72>
- [21] Ekram Nosratiyan, N., & Taghavi Fard, M. T. (2023). A proposed model for the assessment of supply chain management using DEA and knowledge management. *Computational algorithms and numerical dimensions*, 2(3), 136–147. <https://doi.org/10.22105/cand.2023.191008>
- [22] Montazeri, F. Z., Sorourkhah, A., Marinković, D., & Lukovac, V. (2024). Robust-fuzzy-probabilistic optimization for a resilient, sustainable supply chain with an inventory management approach by the seller. *Big data and computing visions*, 4(2), 146–163. <https://doi.org/10.22105/bdcv.2024.481945.1208>
- [23] Shafique, M. N., Yeo, S. F., & Tan, C. L. (2024). Roles of top management support and compatibility in big data predictive analytics for supply chain collaboration and supply chain performance. *Technological forecasting and social change*, 199, 123074. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123074>
- [24] Silva, B. E., Vieira, J. G. V., & Yoshizaki, H. (2024). Motivating factors for blockchain technology adoption: A theoretical analysis from the perspective of supply chain collaboration. *Journal of global operations and strategic sourcing*, 18(1), 36–63. <https://doi.org/10.1108/JGOSS-04-2023-0033>
- [25] Kunkel, S., Matthes, M., Xue, B., & Beier, G. (2022). Industry 4.0 in sustainable supply chain collaboration: Insights from an interview study with international buying firms and Chinese suppliers in the electronics industry. *Resources, conservation and recycling*, 182, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106274>
- [26] Patrucco, A., Moretto, A., Trabucchi, D., & Golini, R. (2022). How do Industry 4.0 Technologies boost collaborations in buyer-supplier relationships? *Research technology management*, 65(1), 48–58. <https://doi.org/10.1080/08956308.2021.1999131>
- [27] Attaran, S., Attaran, M., & Celik, B. G. (2024). Digital twins and industrial internet of things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0. *Decision analytics journal*, 10, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>
- [28] Van Der Valk, H., Strobel, G., Winkelmann, S., Hunker, J., & Tomczyk, M. (2022). Supply chains in the era of digital twins - A review. *Procedia computer science*, 204, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.019>
- [29] Sedky, A. (2023). Digital supply chain: A proposed solution to the global supply chain disruption impact on business sustainability. In *Digital supply chain, disruptive environments, and the impact on retailers* (pp. 160–177). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7298-9.ch009>
- [30] Itiat, N. E., Ekanem, I. I., & Ikpe, A. E. (2024). A comprehensive review on green energy technologies: An approach for environmental sustainability and eco-friendliness. *Systemic analytics*, 2(2), 315–334. <https://doi.org/10.31181/sa22202427>
- [31] Bayatzadeh, S. and 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>
- [32] Esmaeilian, G., Fardoie, R. S., Hourali, M., & Farbod, E. (2024). Investigating the impact of blockchain technology adoption on integration and economic sustainability of the automotive supply chain: A bayesian structural equation modeling approach. *Transactions on quantitative finance and beyond*, 1(1), 1–14. <https://doi.org/10.22105/tqfb.v1i1.16>
- [33] Rezaei, A., Zare Mehrjerdi, Y., Owlia, M. S., & Khademizare, H. (2023). Identifying and prioritizing ecosystem indicators using Fuzzy Delphi and Fuzzy DEMATEL approaches. *Research in production and operations management*, 14(2), 51–82. **(In Persian)**. <https://doi.org/10.22108/pom.2023.134879.1462>
- [34] Yurtay, Y. (2025). Carbon footprint management with Industry 4.0 technologies and erp systems in sustainable manufacturing. *Applied sciences*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/app15010480>
- [35] Labaran, M. J., & Masood, T. (2023). Industry 4.0 driven green supply chain management in renewable energy sector: A critical systematic literature review. *Energies*, 16(19), 6977. <https://doi.org/10.3390/en16196977>
- [36] Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Foroughi, B., Tseng, M. L., Nikbin, D., & Khanfar, A. A. A. (2025). Industry 4.0 digital transformation and opportunities for supply chain resilience: A comprehensive review and a strategic roadmap. *Production planning & control*, 36(1), 61–91. <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2252376>
- [37] Mosleuzzaman, M., Arif, I., & Siddiki, A. (2024). Design and development of a smart factory using Industry 4.0 technologies. *Academic journal on business administration, innovation & sustainability*, 4(4). <https://doi.org/10.69593/ajbais.v4i04.131>
- [38] Ismail, M. M., Ahmed, Z., Abdel-Gawad, A. F., & Mohamed, M. (2024). Toward supply chain 5.0: An integrated multi-criteria decision-making models for sustainable and resilience enterprise. *Decision making: applications in management and engineering*, 7(1), 160–186. <https://doi.org/10.31181/dmame712024955>
- [39] Özek, A., & Yildiz, A. (2020). Digital supplier selection for a garment business using interval type-2 fuzzy TOPSIS. *Tekstil ve konfeksiyon*, 30(1), 61–72. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.569884>
- [40] Liu, L., Ang, S., Yang, F., & Zhang, X. (2025). Partner selection for supply chain collaboration: New data envelopment analysis models. *Omega (United Kingdom)*, 132, 103245. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103245>
- [41] Zhou, J., Xu, T., Chiao, Y., & Fang, Y. (2024). Interorganizational systems and supply chain agility in uncertain environments: The mediation role of supply chain collaboration. *Information systems research*, 35(1), 184–202. <https://doi.org/10.1287/isre.2023.1210>
- [42] Queiroz, M. M., Telles, R., & Bonilla, S. H. (2020). Blockchain and supply chain management integration: A systematic review of the literature. *Supply chain management*, 25(2), 241–254. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2018-0143>

- [43] Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- [44] Mi, X., Tang, M., Liao, H., Shen, W., & Lev, B. (2019). The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next? *Omega (United Kingdom)*, 87, 205–225. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.01.009>
- [45] Guo, S., & Zhao, H. (2017). Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. *Knowledge-based systems*, 121, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.01.010>
- [46] Ünver, M., & Aydoğan, B. (2025). Optimized climate change management: Integrating fuzzy CRITIC-TOPSIS approach with continuous function-valued fuzzy sets. *Risk assessment and management decisions*, 2(1), 1–27. <https://doi.org/10.48314/ramd.vi.34>
- [47] Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega (United Kingdom)*, 64, 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001>
- [48] Mohseni Andargoli, S., Arasteh, A. and Divsalar, A. (2024). A novel hybrid approach for smart locker location in delivery systems: A solution for enhancing urban logistics performance (Case study: Babol county). *Journal of decisions and operations research*, 9(4), 1021-1044. **(In Persian)**. <https://doi.org/10.22105/dmor.2025.489345.1890>
- [49] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. In *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey* (pp. 58–191). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- [50] Sulistiani, H., Pasaribu, A., Palupiningsih, P., Anwar, K., & Saputra, V. H. (2024). New TOPSIS: Modification of the TOPSIS method for objective determination of weighting. *International journal of intelligent engineering and systems*, 17(5), 991–1003. <https://doi.org/10.22266/ijies2024.1031.74>