Journal of Quality Engineering and Management

www.pqprc.ir

J. Qual. Eng. Manag. Vol. 14, No. 3 (2024) 224–243.

Paper Type: Original Article

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

Shahab Bayatzadeh[1], Hamidreza Talaei[2], Ali Sorourkhah[3,4*]

[1] Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabatabaei University, Tehran, Iran; shahabbayatzadeh@gmail.com.
[2] Department of Industrial Management, Faculty of Administrative Sciences and Economics, Arak University, Arak, Iran; h-talaie@araku.ac.ir.
[3] Department of Management, Aindegan Institute of Higher Education, Tonekabon, Iran; sorourkhah@aihe.ac.ir.
[4] Morvarid Intelligent Industrial Systems Research Group, Iran.

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 Iranian rubber industry supply chain 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. A sensitivity analysis was also conducted to assess the robustness of the results across varying criterion weights.

Findings: The digital supply chain model ranks highest in digitalization quality, with "technology integration" as the most critical criterion. The sensitivity analysis confirms the rankings' robustness and stability 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).

مهندسی و مدیریت کیفیت

www.pqprc.ir

دوره ۱۴، شماره(۳)، (۱۴۰۳)، ۲۴۳-۲۲۴

نوع مقاله: پژوهشی

تحلیلی بر کیفیت دیجیتالی‌سازی مدل‌های همکاری زنجیره‌تامین با رویکرد ترکیبی Fuzzy BWM-TOPSIS

شهاب بیات زاده[۱]، حمیدرضا طلایی[۲] علی سرورخواه[۳،۴*]

[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.

[۴] گروه تحقیقاتی سامانه‌های هوشمند صنعتی مروارید، 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 به‌دلیل 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/ارزش‌افزوده 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 بهره برده 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[1]، هوش مصنوعی[2]، بلاک‌چین، سیستم‌های سایبر–فیزیکی[3] 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 قابل‌توجهی 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 قابل‌توجهی 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، نه‌تنها شامل دیجیتالی‌کردن 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 کاراتر 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 قابل‌توجهی برای بهبود همکاری در زنجیره‌تامین صنعت لاستیک ارایه 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 قابل‌توجه 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 فناورانه 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 قابل‌توجه است. اجرای موفق این فناوری‌ها می‌تواند منجر به افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها، تقویت تاب‌آوری زنجیره‌تامین و بهبود پایداری شود. پرداختن به چالش‌ها از طریق سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های لازم، توسعه مهارت‌های نیروی کار و تنظیم سیاست‌های حمایتی، برای بهره‌گیری کامل از

[1] Internet of Things (IoT)
[2] Artificial Intelligence (AI)
[3] Cyber-Physical Systems (CPS)

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 [17–15]، نه انتخاب و تصمیم‌گیری میان گزینه‌های اجرایی همکاری. این در حالی است که در فضای واقعی تصمیم‌گیری در صنایع، انتخاب میان مدل‌های همکاری قابل‌اجرا 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، به‌دلیل 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 بزند.

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 نه‌تنها 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 آنی 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 درنتیجه، 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 به‌هم‌پیوسته 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، نه‌تنها 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].

۳-۲- 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.

۳-۲-۱- زنجیره‌تامین مشارکتی

زنجیره‌تامین مشارکتی بر همکاری نزدیک میان ذینفعان زنجیره‌تامین تاکید دارد و شامل اشتراک‌گذاری اطلاعات، برنامه‌ریزی مشترک و مدیریت ریسک به‌صورت 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].

۳-۲-۲- 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 به‌طور 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- زنجیره‌تامین دیجیتال

زنجیره‌تامین دیجیتال بر پایه یکپارچه‌سازی فناوری‌های دیجیتال در تمام بخش‌های زنجیره‌تامین استوار است. در این مدل، سازمان‌ها از فناوری‌هایی مانند بلاک‌چین، همزاد دیجیتال و سیستم‌های سایبر–فیزیکی استفاده می‌کنند تا زنجیره‌تامین را به‌صورت یکپارچه و داده‌محور مدیریت کنند. این مدل موجب افزایش شفافیت، بهبود قابلیت ردیابی، کاهش هزینه‌های لجستیکی و بهینه‌سازی فرآیندهای تامین، تولید و توزیع می‌شود [27]. همزاد دیجیتال (*Digital Twin*) به‌عنوان ابزاری نوآورانه برای مدل‌سازی، شبیه‌سازی و پایش بلادرنگ زنجیره‌تامین شناخته می‌شود. این فناوری می‌تواند نقش کلیدی در ارتقای کیفیت دیجیتال‌سازی ایفا کرده و امکان ارزیابی بهتر مدل‌های همکاری را فراهم آورد [28]. زنجیره‌تامین دیجیتال نیز با چالش‌هایی همچون نیاز به سرمایه‌گذاری بالا در فناوری‌های دیجیتال و زیرساخت‌های فناورانه مواجه است. خطرات امنیت سایبری و حملات هکری به داده‌های زنجیره‌تامین از دیگر دغدغه‌های مهم در این مدل هستند. علاوه بر این، مشکلات مربوط به استانداردسازی داده‌ها و ایجاد یکپارچگی میان سیستم‌های دیجیتال مختلف می‌تواند مانع از پیاده‌سازی کامل زنجیره‌تامین دیجیتال شود. مقاومت برخی شرکت‌ها و کارکنان در برابر تغییر نیز به دلیل پیچیدگی و هزینه‌های اجرایی بالا از دیگر چالش‌های پیش روی این مدل است [29].

۴-۳-۲- زنجیره‌تامین پایدار

زنجیره‌تامین پایدار با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی زنجیره‌تامین طراحی شده است [30]. این مدل از فناوری‌های صنعت ۴٫۰ مانند بلاک‌چین، اینترنت اشیا و تحلیل داده‌های کلان برای پایش عملکرد زیست‌محیطی، کاهش ضایعات، افزایش بهره‌وری منابع و بهبود مسئولیت‌پذیری اجتماعی شرکت‌ها استفاده می‌کند [30]، [31]. زنجیره‌تامین پایدار سازمان‌ها را قادر می‌سازد تا در عین حفظ مزیت رقابتی، استانداردهای زیست‌محیطی و مقررات بین‌المللی را رعایت کنند [32]. در زنجیره‌تامین پایدار، یکی از چالش‌های اصلی، ایجاد تعادل بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی است که ممکن است هزینه‌های تولید را افزایش دهد [33]. نیاز به شفافیت بالا و قابلیت ردیابی نیز مستلزم بهره‌گیری از زیرساخت‌های پیشرفته فناوری است که اجرای آن را دشوار می‌کند. علاوه بر این، پیاده‌سازی مقررات زیست‌محیطی و هماهنگی با استانداردهای بین‌المللی از دیگر چالش‌های این مدل به شمار می‌آید. در نهایت، مقاومت برخی از ذینفعان زنجیره‌تامین در برابر پذیرش تغییرات پایدار به دلیل افزایش هزینه‌ها و پیچیدگی اجرایی، یکی دیگر از موانع پیش روی توسعه این مدل همکاری است [34].

در **جدول ۱** جمع‌بندی و مقایسه این مدل‌ها به‌صورت خلاصه بیان شده است.

جدول ۱- مقایسه مدل‌های همکاری در زنجیره‌تامین.
Table 1- Comparison of supply chain collaboration models.

مدل همکاری	نماد	تمرکز اصلی	فناوری‌های کلیدی صنعت ۴٫۰	چالش‌ها
مشارکتی	S1	همکاری و اشتراک‌گذاری اطلاعات	اینترنت اشیا، پردازش ابری و تحلیل داده‌ها	نیاز به اعتماد بالا و یکپارچه‌سازی پیچیده
پویا	S2	انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات بازار	هوش مصنوعی، کلان‌داده و یادگیری ماشین	مدیریت پیچیدگی و نیاز به متخصصان ماهر
دیجیتال	S3	یکپارچه‌سازی کامل زنجیره‌تامین	بلاک‌چین، همزاد دیجیتال و اینترنت اشیا	هزینه‌های بالا و امنیت داده
پایدار	S4	کاهش اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی	بلاک‌چین و اینترنت اشیا	توازن بین سود اقتصادی و پایداری

۴-۲- معیارهای ارزیابی مدل‌های همکاری در زنجیره‌تامین

معیارهای رتبه‌بندی مدل‌های همکاری در زنجیره‌تامین بر اساس اثربخشی آن‌ها در بهره‌گیری از فناوری‌های صنعت ۴٫۰ شامل چندین عامل کلیدی است که بسته به صنعت، شرایط کسب‌وکار و اهداف موردنظر می‌تواند متفاوت باشد. هیچ مدل واحدی به‌عنوان بهترین وجود ندارد و انتخاب بهینه به نیازها و اولویت‌های خاص سازمان بستگی دارد. بااین‌حال، بر اساس مطالعات انجام‌شده، معیارهای زیر می‌توانند برای ارزیابی و رتبه‌بندی مدل‌های همکاری مورد استفاده قرار گیرند.

۴-۲-۱- 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، احتمالا در دستیابی به نتایج مطلوب موفق‌تر خواهند بود. این نه‌تنها شامل پذیرش فناوری، بلکه توانایی بهره‌برداری از داده‌های تولیدشده توسط این فناوری‌ها برای بهبود تصمیم‌گیری را نیز در بر می‌گیرد [33].

۴-۲-۲- شفافیت و قابلیت مشاهده زنجیره‌تامین

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

۳-۴-۲- کارایی و چابکی زنجیره‌تامین

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

۴-۴-۲- تاب‌آوری زنجیره‌تامین

مدل‌هایی که تاب‌آوری زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین است [33]، [36].

۵-۴-۲- ملاحظات پایداری

مدل‌هایی که ملاحظات پایداری از جمله تاثیرات زیست‌محیطی، مسئولیت اجتماعی و تامین منابع اخلاقی را در طراحی و اجرای خود لحاظ می‌کنند، به‌طور فزاینده‌ای اهمیت پیدا کرده‌اند. این شامل پایش عملکرد زیست‌محیطی و اجتماعی در سراسر زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین.

Table 2- Criteria for evaluating supply chain collaboration models.

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

۳- پیشینه پژوهش

مقاله هروگا [3] به بررسی مدل جدید زنجیره‌تامین همکاری دیجیتال[1] مبتنی بر فناوری‌های نوین صنعت ۴٫۰ پرداخته، به نقش مهم فناوری‌های دیجیتال مانند بلاک‌چین، اینترنت اشیا و رایانش ابری (*CC*) در بهبود عملکرد و همکاری‌های زنجیره‌تامین اشاره دارد. این تحقیق ابتدا با تحلیل دقیق نحوه تاثیر این فناوری‌ها بر مکانیزم‌های همکاری در زنجیره‌تامین شروع می‌شود و سپس عوامل اصلی تاثیرگذار بر عملکرد *CSC* شناسایی و بررسی می‌شود. هدف نهایی، طراحی مدلی دیجیتال است که با استفاده از این فناوری‌ها، شفافیت، ردیابی و اعتماد را در همکاری‌های زنجیره‌تامین دیجیتال افزایش دهد. این مدل مفهومی می‌تواند به‌عنوان راهنمای مرجع برای تشویق و ترغیب بازیگران زنجیره‌تامین به همکاری در یک سیستم هوشمند و امن دیجیتال استفاده شود.

مطالعه اسماعیل و همکاران [38] به تحلیل تغییرات عمده‌ای که در زنجیره‌تامین و نحوه عملکرد بنگاه‌ها در پاسخ به چالش‌های پیچیده محیط کسب‌وکار، جهانی‌شدن، بحران‌ها و پاندمی‌ها ایجاد شده، پرداخته است. با توجه به این تغییرات و فشارهای اقتصادی و اجتماعی، نیاز به تبدیل

[1] Construction Supply Chain (CSC)

زنجیره‌تامین به یک زنجیره‌تامین مقاوم و پایدار بیش‌ازپیش احساس می‌شود. در این راستا، این پژوهش به استفاده از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی و تجزیه‌وتحلیل داده‌های کلان به‌عنوان بخش‌های اصلی از تکنیک‌های هوشمند در صنعت ۴٫۰ و ۵٫۰ می‌پردازد. مدل ارزیابی پیشنهادی برای ارزیابی بنگاه‌هایی که از این فناوری‌ها در زنجیره‌تامین خود بهره می‌برند، استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که امنیت داده‌ها به‌عنوان شاخص کلیدی برتر در نظر گرفته می‌شود و شفافیت به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی در ارزیابی تاثیرگذار است.

مطالعه ازبک و ایلدیز [39] به بررسی تاثیر تحولات دیجیتال و فناوری‌های نوین در صنعت ۴٫۰ بر مدیریت زنجیره‌تامین می‌پردازد. با پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی‌های دیجیتال و تولید، صنعت ۴٫۰ به‌طور قابل‌توجهی بر بهبود فرآیندهای تولید و مهندسی، بهینه‌سازی روابط مشتریان و سازمان‌ها، ایجاد فرصت‌های جدید کسب‌وکار و افزایش بهره‌وری اقتصادی تاثیر گذاشته است. یکی از بخش‌هایی که تحت تاثیر این تغییرات قرار گرفته، مدیریت زنجیره‌تامین است. صنعت ۴٫۰ با فراهم کردن زنجیره‌تامین دیجیتال و ایجاد ارتباط هوشمند میان تامین‌کنندگان، تولید، لجستیک و مشتریان، عملکرد شرکت‌های مادر را بهبود بخشیده است. هدف این تحقیق، انتخاب بهترین تامین‌کنندگان دیجیتال از میان تامین‌کنندگان یک شرکت مادر در صنعت پوشاک با استفاده از فناوری‌های صنعت ۴٫۰ است. مطالعه لیو و همکاران [40] بر انتخاب بهترین شریک برای همکاری در یک زنجیره‌تامین دو مرحله‌ای از طریق تحلیل مرزی داده‌ها تمرکز دارد تا عملکرد سیستم‌های همکاری را ارزیابی کند. در این تحقیق، دو سطح مختلف همکاری در زنجیره‌تامین تفکیک شده‌اند: ۱- همکاری زنجیره به زنجیره و ۲- همکاری مرحله‌به‌مرحله. در سطح همکاری زنجیره به زنجیره، انتخاب شریک درون همان زنجیره‌تامین و در دو مرحله مختلف صورت می‌گیرد، درحالی‌که در سطح همکاری مرحله‌به‌مرحله، شریک‌ها از زنجیره‌های تامین مختلف انتخاب می‌شوند. اثر یادگیری فناوری و سه درجه همکاری (کم، متوسط و زیاد) برای هر دو سطح همکاری معرفی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که همکاری زیاد در سطح مرحله‌به‌مرحله عملکرد بهتری به همراه دارد. همچنین، یک مثال عددی و یک مطالعه موردی واقعی برای نمایش مدل‌ها و یافته‌ها ارایه شده که نشان می‌دهد روش پیشنهادی مزایای بیشتری نسبت به روش‌های موجود دارد و گزینه‌های انعطاف‌پذیری بیشتری برای بهینه‌سازی روابط همکاری در محیط‌های پیچیده زنجیره‌تامین چندمرحله‌ای فراهم می‌آورد.

مطالعه ژو و همکاران [41] به بررسی نقش چابکی زنجیره‌تامین به‌عنوان یک قابلیت کلیدی برای شرکت‌ها در دستیابی به عملکرد برتر در محیط‌های کسب‌وکار نامطمئن می‌پردازد. چابکی زنجیره‌تامین دستیابی به آن دشوار است، زیرا نیازمند همکاری نزدیک و درعین‌حال منعطف شرکت‌ها و شرکای زنجیره‌تامین آن‌ها در مرزهای سازمانی است. این تحقیق با گسترش ادبیات شی مرزی به زمینه زنجیره‌تامین، مکانیسمی را که از طریق آن سیستم‌های بین‌سازمانی[1] که به‌طور گسترده برای عبور از مرزهای سازمانی از طریق ارتباطات دیجیتال میان‌شرکتی به‌کار گرفته می‌شوند، چابکی زنجیره‌تامین را در محیط‌های نامطمئن تقویت می‌کنند، معرفی می‌کند. مفهوم همکاری در زنجیره‌تامین به‌عنوان مکانیزم میانجی بین دو ویژگی کلیدی *IOS* (یعنی استانداردسازی و سازگاری) و چابکی زنجیره‌تامین معرفی شده است. عدم‌اطمینان محیطی به‌عنوان شرایط زمینه‌ای در نظریه‌پردازی زمینه‌ای *IOS* به‌عنوان شی مرزی درنظر 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.

درحالی‌که 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

[1] Inter-Organizational Systems (IOS)

به‌طور خاص به نیازهای این صنعت پاسخ دهد. همچنین، درحالی‌که 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 توزیع‌شده میان این خبرگان به‌دست آمده و معیارهای ارزیابی وزن‌دهی شده و مدل‌ها بر اساس اولویت‌های شناسایی‌شده رتبه‌بندی گردیده‌اند. در نهایت، نتایج به همراه پیشنهاداتی برای استفاده عملی از این مدل‌ها در بهبود همکاری‌های دیجیتال در زنجیره‌تامین صنعت لاستیک ایران ارایه 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
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

۱-۴- 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 به‌صورت 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 به‌منظور 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 به‌طور 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 $\{c_1, c_2, \cdots, c_n\}$ وجود دارد که هر یک به بررسی جنبه‌های خاصی از گزینه‌ها پرداخته و در فرآیند تصمیم‌گیری منطقی و موثر کمک می‌کنند. این معیارها به‌طورکلی 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 شناسایی‌شده، 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 به‌عنوان c_B و کم‌اهمیت‌ترین (بدترین) معیار به‌عنوان c_W نشان داده می‌شوند و به‌عنوان نقاط مرجع در مقایسه‌های زوجی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

گام ۳- اجرای مقایسه مرجع فازی برای معیار بهترین در روش بهترین-بدترین فازی اهمیت ویژه‌ای دارد و شامل دو مرحله جداگانه است: ۱- مقایسه زوجی $\tilde{a}_{ij}$ در شرایطی که i به‌عنوان 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 تعریف‌شده 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.

$$\tilde{A}_B = (\tilde{a}_{B1}, \tilde{a}_{B2}, \cdots, \tilde{a}_{Bn}), \qquad (۱)$$

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 ارایه 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.

$$\tilde{A}_W = (\tilde{a}_{1W}, \tilde{a}_{2W}, \cdots, \tilde{a}_{nW}), \quad (۲)$$

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 $(\tilde{w}_1^*, \tilde{w}_2^*, \cdots, \tilde{w}_n^*)$. این گام به‌منظور تعیین وزن‌هایی برای معیارها طراحی شده است که بیشترین هم‌خوانی را با ترجیحات فازی میان معیارهای مختلف بهینه‌سازی کند. در این فرآیند، وزن‌های محاسبه‌شده 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.

$$min\tilde{\xi}^*$$

$$s.t\begin{cases}\left|\dfrac{|\ l_B^w, m_B^w, u_B^w)}{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)} - (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj})\right| \le (k^*, k^*, k^*), \\ \left|\dfrac{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)}{(l_W^w, m_W^w, u_W^w)} - (l_{jW}, m_{jW}, u_{jW})\right| \le (k^*, k^*, k^*), \\ \sum_{j=1}^n R(\tilde{w}_j) = 1, \\ l_j^w \le m_j^w \le u_j^w, \\ l_j^w \ge 0, \\ j = 1,2,\cdots,n, \end{cases} \quad (۳)$$

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

$$R(\tilde{w}_j) = \frac{l_j + 4m_j + u_j}{6}. \quad (۴)$$

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

$$CR = \frac{k^*}{CI}, \quad (۵)$$

که در این رابطه k^* از حل **مدل (۳)** و CI (شاخص سازگاری) از **جدول ۴** به‌دست می‌آید. هرچه نرخ سازگاری به صفر نزدیک‌تر 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 به‌عنوان مقادیر قابل‌قبول درنظر گرفته می‌شوند.

۲-۴- روش تاپسیس[1]

روش تاپسیس یکی از روش‌های متداول تصمیم‌گیری چندمعیاره (*MCDM*) است که برای ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌ها با توجه به معیارهای مختلف به‌کار می‌رود [49]. این روش بر اساس مفهومی از نزدیکی به بهترین راه‌حل ممکن (ایده‌آل مثبت) و فاصله از بدترین راه‌حل ممکن (ایده‌آل منفی)

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

عمل می‌کند. در تاپسیس، گزینه‌ای که کمترین فاصله را از ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از ایده‌آل منفی داشته باشد، به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب می‌شود. این ویژگی، تاپسیس را به ابزاری موثر برای حل مسایل پیچیده تصمیم‌گیری در زمینه‌های مختلف تبدیل کرده است [47].

گام‌های روش تاپسیس به‌صورت زیر می‌باشد [46]:

گام ۱- کمی کردن و بی مقیاس سازی ماتریس تصمیم N می‌باشد. این کار از بی‌مقیاس سازی نرم یا اقلیدسی توسط **رابطه (۶)** انجام می‌شود.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}}, \qquad (۶)$$

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

گام ۲- وزن هر معیار را در ستون مربوط به آن معیار، در ماتریس نرمالایزشده ضرب می‌کنیم.

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \qquad (۷)$$

که در **رابطه (۷)** w_j ، وزن معیار j و v_{ij} مقدار وزن‌دار شده r_{ij} می‌باشد.

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

$$\begin{aligned} &A^* = \{(\max_i v_{ij} \mid j \in \mathcal{J}), (\min_i v_{ij} \mid j \in \mathcal{J}') \mid i = 1,2,...,m\}, \\ &A^* = \{v_1^*, v_2^*, ..., v_j^*, ..., v_n^*\}, \\ &c = \{(\min_i v_{ij} \mid j \in \mathcal{J}), (\max_i v_{ij} \mid j \in \mathcal{J}') \mid i = 1,2,....,m\}, \\ &A^- = \{v_1^-, v_2^-, ..., v_j^-, ..., v_n^-\}. \end{aligned} \qquad (۸)$$

v_j^* ، بهترین مقدار معیار j از بین تمام گزینه‌ها و v_j^- بدترین مقدار معیار j از بین تمام گزینه‌ها می‌باشند. $\mathcal{J}$ نشان‌دهنده معیارهایی از جنس سود و $\mathcal{J}'$ نشان‌دهنده معیارهایی از جنس هزینه می‌باشند. A^* و A^- به ترتیب بهترین گزینه و بدترین گزینه و یا همان راه‌حل ایده آل مثبت و راه‌حل ایده آل منفی می‌باشند.

گام ۴- فاصله هندسی همه گزینه‌ها را نسبت به ایده آل مثبت و منفی را از طریق **رابطه (۹)** به‌دست می‌آوریم.

$$\begin{aligned} &S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^*)^2}, i = 1,2,...,m, \\ &S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1,2,...,m, \end{aligned} \qquad (۹)$$

که در **رابطه (۹)**، S_i^* فاصله گزینه i از راه‌حل ایده آل مثبت و S_i^- فاصله گزینه i از راه‌حل ایده آل منفی می‌باشند.

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

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}, \ 0 \le C_i^* \le 1, \ i = 1,2,...,m. \qquad (۱۰)$$

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

به‌طور خلاصه هر گزینه‌ای به راه‌حل ایده آل نزدیک‌تر باشد C_i^* به ۱ نزدیک‌تر می‌شود.

گام ۶- با توجه به مقدار C_i^* گزینه‌ها را به‌صورت نزولی رتبه‌بندی می‌کنیم.

۳-۴- تحلیل حساسیت

به‌منظور ارزیابی پایداری مدل تصمیم‌گیری، تحلیل حساسیت با تغییر تدریجی در وزن معیارها انجام شد. برای این منظور، یک اختلال کنترل‌شده بر روی وزن معیارها ω_k درنظر گرفته شد که در آن k نمایانگر شماره معیار ($k = 1, 2, 3, \ldots, n$) است و وزن هر معیار به‌صورت ω'_k تغییر می‌کند. نسبت بین وزن جدید ω'_k و وزن اولیه ω_k با عنوان نسبت واحدی β_k تعریف می‌شود [50].

$$\beta_k = \frac{\omega'_k}{\omega_k}. \quad (۱۱)$$

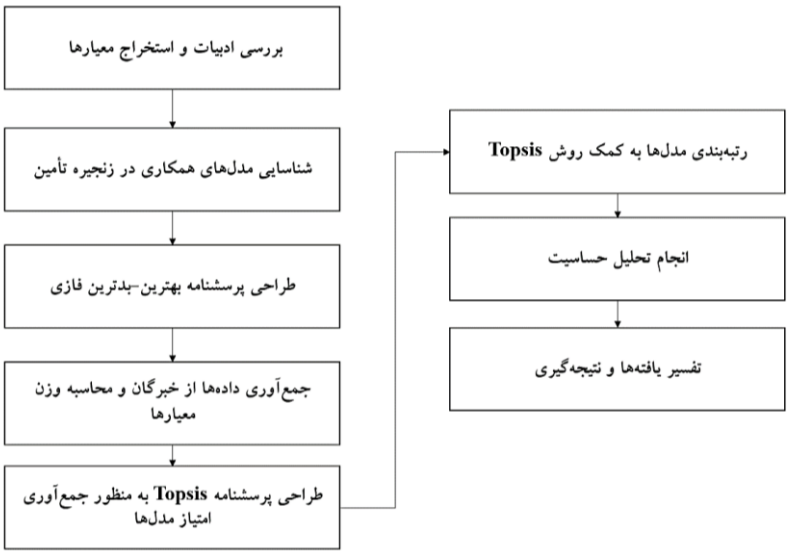
در این پژوهش، با اعمال تغییرات هدفمند بر وزن هر معیار به‌صورت جداگانه، تاثیر این تغییرات بر نتایج نهایی رتبه‌بندی مدل‌های همکاری بررسی شده است. این تحلیل به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا میزان تاثیر هر معیار را در انتخاب مدل‌های برتر همکاری در زنجیره‌تامین صنعت لاستیک ایران بهتر درک کنند. همچنین، نسبت واحدی β_k به‌عنوان 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 وزن‌ها نیز می‌شود، چراکه مجموع کل وزن‌ها باید برابر با عدد یک باقی بماند؛ بنابراین، تغییرات اعمال‌شده بر یک معیار باعث باز تخصیص مقادیر وزن در سایر معیارها خواهد شد که این رابطه مطابق با **رابطه (۱۲)** محاسبه می‌شود.

$$\omega'_n = \frac{\omega_n}{1 + (\gamma_k - 1)\omega_k}. \quad (۱۲)$$

عبارت γ_k به‌عنوان نسبت تغییر اولیه تعریف می‌شود و به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\gamma_k = \frac{\beta_k - \beta_k\omega_k}{1 - \beta_k\omega_k}. \quad (۱۳)$$

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، ۱، ۱/۵ و ۲ بود. پس از اعمال این ضرایب به وزن هر معیار، وزن‌ها مجددا محاسبه شدند و به دنبال آن، امتیازات نهایی مدل‌ها و رتبه‌بندی‌ها نیز باز محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردیدند. در ادامه، این فرآیند برای هر یک از معیارها به‌صورت جداگانه انجام شد و با القای تدریجی اختلال در وزن هر معیار، تغییرات حاصل در رتبه‌بندی مدل‌ها تحلیل گردید تا میزان حساسیت مدل تصمیم‌گیری 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 زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین 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.

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

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 **جدول ۵** 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 نرم‌افزار *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 شده‌اند. این رویکرد منجر به ارایه نتایج دقیق‌تر و اطمینان از انعکاس نظر تمامی خبرگان در اوزان نهایی شد.

جدول ۶- وزن نهایی معیارهای ارزیابی مدل‌های همکاری در زنجیره‌تامین.
Table 6- Final weight of criteria for evaluating supply chain collaboration models.

	خبره ۱	خبره ۲	خبره ۳	خبره ۴	خبره ۵	خبره ۶	خبره ۷	خبره ۸	خبره ۹	خبره ۱۰	وزن نهایی
یکپارچگی با فناوری‌های صنعت ۴٫۰ (C1)	0.346	0.318	0.356	0.346	0.344	0.307	0.346	0.397	0.274	0.356	0.340
شفافیت و قابلیت مشاهده زنجیره‌تامین (C2)	0.274	0.324	0.293	0.274	0.268	0.315	0.274	0.188	0.349	0.293	0.284
کارایی و چابکی زنجیره‌تامین (C3)	0.179	0.164	0.172	0.179	0.152	0.150	0.179	0.188	0.179	0.172	0.172
تاب‌آوری زنجیره‌تامین (C4)	0.107	0.100	0.085	0.107	0.108	0.149	0.107	0.125	0.107	0.085	0.107

جدول ۶- ادامه.
Table 6- Continued.

	خبره ۱	خبره ۲	خبره ۳	خبره ۴	خبره ۵	خبره ۶	خبره ۷	خبره ۸	خبره ۹	خبره ۱۰	وزن نهایی
ملاحظات پایداری (C5)	0.094	0.084	0.094	0.094	0.128	0.079	0.094	0.103	0.094	0.094	0.096
بهترین معیار	C1	C2	C1	C1	C1	C2	C1	C1	C2	C1	
بدترین معیار	C5	C5	C4	C5	C4	C5	C5	C5	C5	C5	
نرخ ناسازگاری	0.037	0.027	0.027	0.037	0.043	0.021	0.037	0.027	0.037	0.027	

در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی و رتبه‌بندی مدل‌های همکاری در زنجیره‌تامین مبتنی بر فناوری‌های صنعت ۴٫۰، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس استفاده شد. پنج معیار ارزیابی شامل یکپارچگی با فناوری‌های صنعت ۴٫۰، شفافیت و قابلیت مشاهده زنجیره‌تامین، کارایی و چابکی زنجیره‌تامین، تاب‌آوری زنجیره‌تامین و ملاحظات پایداری درنظر گرفته شدند. این معیارها همگی از ماهیت کیفی برخوردارند. برای امتیازدهی به مدل‌ها نسبت به این معیارها، از دیدگاه ده خبره (مشخصات در **جدول ۳**) با تخصص‌های مرتبط استفاده شد. از هر خبره خواسته شد تا بر اساس طیف لیکرت ۱ تا ۹، به هر مدل همکاری نسبت به هر معیار نمره‌ای اختصاص دهد، به‌طوری‌که نمرات بالاتر بیانگر عملکرد بهتر مدل در آن معیار بود. نتایج و رتبه‌بندی مدل‌های 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 فناوری‌های صنعت ۴٫۰	شفافیت و قابلیت مشاهده زنجیره‌تامین	کارایی و چابکی زنجیره‌تامین	تاب‌آوری زنجیره‌تامین	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

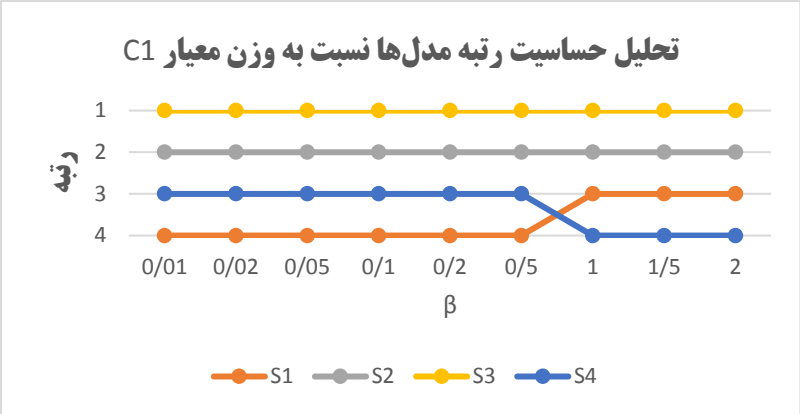
جدول ۸- رتبه‌بندی نهایی مدل‌ها.
Table 8- Final ranking of models.

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

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

جدول ۹- تغییرات در وزن C1 و رتبه‌بندی متناسبت با آن.
Table 9- Changes in C1 weight and corresponding ranking.

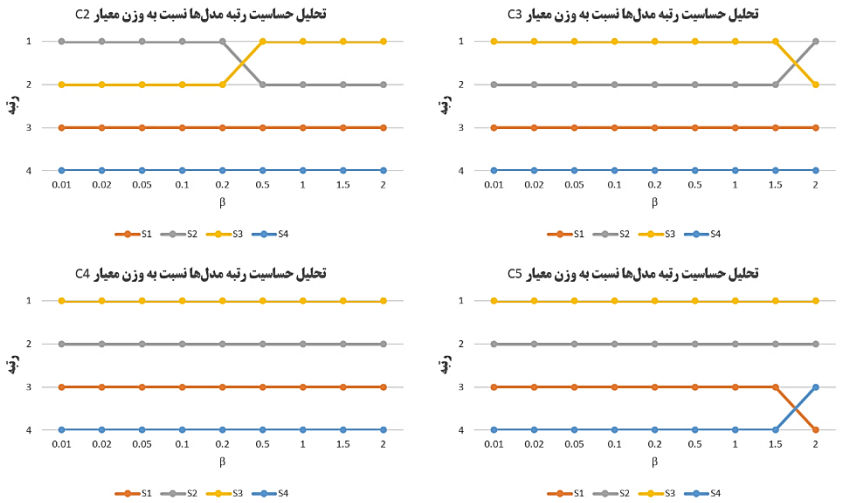
β_1	W1	W2	W3	W4	W5	رتبه‌بندی
0.01	0.003	0.429	0.260	0.162	0.145	S3>S2>S4>S1
0.02	0.007	0.427	0.259	0.161	0.144	S3>S2>S4>S1
0.05	0.017	0.423	0.256	0.159	0.143	S3>S2>S4>S1
0.10	0.034	0.416	0.252	0.157	0.141	S3>S2>S4>S1
0.20	0.068	0.401	0.243	0.151	0.136	S3>S2>S4>S1
0.50	0.170	0.357	0.216	0.135	0.121	S3>S2>S4>S1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



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 (*C1*) 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 زنجیره‌تامین دانست. از دیدگاه خبرگان صنعت لاستیک، بدون وجود یکپارچگی مناسب در زیرساخت‌های دیجیتال، حتی فناوری‌های پیشرفته مانند *IoT* یا هوش مصنوعی نیز نمی‌توانند به‌درستی 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. زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین، 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 ارایه دهد، توانسته است بالاترین رتبه را در این مطالعه به خود اختصاص دهد.

زنجیره‌تامین پویا که بر انعطاف‌پذیری و توانایی انطباق با تغییرات محیطی و نوسانات بازار تاکید 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. زنجیره‌تامین مشارکتی که بر همکاری نزدیک و اشتراک‌گذاری اطلاعات بین شرکای زنجیره‌تامین تاکید دارد، در رتبه سوم قرار گرفت. این مدل از فناوری‌های صنعت ۴٫۰ برای تسهیل تبادل داده‌های لحظه‌ای و تصمیم‌گیری هوشمند میان شرکای زنجیره‌تامین 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 زنجیره‌تامین‌های دیجیتال و پویا کسب کند. به‌ویژه، نگرانی‌های امنیتی و پیچیدگی در مدیریت اطلاعات می‌تواند در بعضی شرایط محدودیت‌هایی ایجاد کند.

زنجیره‌تامین پایدار که بر کاهش اثرات زیست‌محیطی و رعایت مسئولیت‌های اجتماعی تاکید 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 جزیی شده است. به‌طور خاص معیار *C1* بر جابه‌جایی رتبه مدل‌های پایین‌تر *S1* و *S4* تاثیر 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 صرفا 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 منافعی ندارند.

منابع

[1] Chienwattanasook, K., Tancho, N., Onputtha, S., Boonrattanakittibhumi, 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 Nosratian, 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., Matthess, 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 indicatorsusing 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