



Analysis of Barriers, Requirements, and Outcomes of Supply Chain Digitalization Using a Fuzzy Cognitive Mapping Approach Based on Nonlinear Hebbian Algorithm

Mahdiyeh Haghighat 

Department of Operations Management and Information Technology, Faculty of Management, Kharazmi University, Tehran, Iran

Mojtaba Farrokh *

Department of Operations Management and Information Technology, Faculty of Management, Kharazmi University, Tehran, Iran

Omid Mahdi Ebadati 

Department of Operations Management and Information Technology, Faculty of Management, Kharazmi University, Tehran, Iran

Abstract

With the rapid expansion of technologies like the Internet of Things and Artificial Intelligence, the digital supply chain has become a core pillar of value creation. Despite its importance, Iranian industries remain in the early stages of digital transformation. This study employs Fuzzy Cognitive Mapping (FCM) supported by Active Hebbian Learning (AHL) and Nonlinear Hebbian Learning (NHL) algorithms to analyze causal relationships among barriers, requirements, and outcomes of supply chain digitalization. Data were collected through expert interviews and questionnaires. Findings reveal that while AHL and NHL differ in estimating causal intensity, their structural patterns remain consistent. Scenario-based analysis demonstrates that coordinated strategies encompassing managerial and technological initiatives significantly improve performance indicators. By proposing an integrated framework, this study supports the transition toward digital supply chains and provides actionable insights for policymakers. This research fills the gap in expert-based cognitive modeling for digital transformation in developing economies, offering a robust tool for strategic decision-making.

* Corresponding Author: farrokh@khu.ac.ir

How to Cite: Haghighat, M., Farrokh, M., Ebadati, O. M. (2026). Analysis of Barriers, Requirements, and Outcomes of Supply Chain Digitalization Using a Fuzzy Cognitive Mapping Approach Based on Nonlinear Hebbian Algorithm, *Industrial Management Studies*, 24(80), 43-86.

Introduction

Accordingly, this study seeks to answer the following research question: How do managers and analysts cognitively interpret the causal relationships among barriers, strategic actions, and outcomes of supply chain digitalization, and which actions can most effectively improve digital supply chain performance? The transformations brought about by the Fourth Industrial Revolution—driven by technologies such as the Internet of Things, Artificial Intelligence, Blockchain, and Big Data—have profoundly reshaped organizational processes. These technologies have enabled the emergence of intelligent, data-driven ecosystems where decisions are made with greater speed and precision. In such environments, organizations are increasingly compelled to move toward digital integration. Among all organizational domains, the supply chain has been significantly influenced, giving rise to the concept of the digital supply chain, which seeks to enhance agility and transparency in complex environments. Despite these advantages, industries in developing countries such as Iran remain in the early stages of digitalization. Challenges, including technological limitations, infrastructure deficiencies, and lack of digital culture have hindered progress. While previous research primarily focused on technological dimensions, limited attention has been paid to the subjective perceptions of managers. Strategic decisions are strongly influenced by managers' cognitive perceptions of barriers and requirements. Analyzing these causal relationships can provide valuable insights for designing effective managerial strategies. FCM, as a soft modeling technique, enables the analysis of complex causal structures in uncertain environments. By integrating fuzzy logic with network structures, this approach facilitates modeling human perceptions. Despite the expanding literature, several research gaps remain. First, prior studies often examined barriers and outcomes separately, ignoring feedback-driven relationships. Second, limited research has explicitly modeled expert cognition in this field. Third, the use of advanced learning mechanisms like AHL and NHL for optimizing causal weights has received limited attention in supply chain digitalization research. To address these gaps, this study develops an integrated FCM model to analyze the causal relationships among digitalization components in Iranian industries. The main contributions include developing an integrated causal framework, modeling expert cognition, and comparing AHL and NHL algorithms to improve model robustness.

Methodology

This study employs a mixed-method approach to model digitalization components. In the qualitative phase, key concepts were extracted via content

analysis of expert insights. In the quantitative phase, these concepts were modeled using FCM, and causal relationships were optimized through NHL algorithms implemented in Python. The FCMPy toolkit was used to simulate and refine the model, enabling parameter estimation and scenario-based analysis. Initial weight matrices were constructed from expert evaluations using fuzzy linguistic scales. Defuzzification was performed via the center of gravity method, and NHL was applied to enhance accuracy and stability. Intervention scenarios were then analyzed, leading to the final stabilization of the cognitive model structure.

Findings

Simulation results identified seven key influential factors with the highest impact on digital performance: connectivity, lack of R&D capabilities, scalability, technological inaccessibility, sustainability, insufficient employee competence, and supply chain resilience. In contrast, political instability showed the least influence on performance outcomes. Scenario-based analysis revealed that scenarios focusing on organizational agility, digital skills, and organizational security had the strongest impact on flexibility and competitiveness. Conversely, scenarios targeting only policy and infrastructure barriers showed weaker performance, highlighting that policy interventions alone are insufficient without integration with operational components. These findings offer a practical framework for prioritizing digital transformation initiatives, emphasizing the need to focus on high-impact enablers to achieve measurable improvements in key performance indicators.

Discussion and conclusion

This study utilized an FCM framework to model the relationships among digitalization enablers and outcomes. The application of the NHL algorithm proved effective in balancing accuracy and stability, making it a powerful tool for analyzing nonlinear systems. Theoretically, the findings demonstrate that FCM offers a robust alternative to linear models, enabling nuanced exploration of interdependencies. Practically, results highlight that successful transformation depends on high-impact enablers such as connectivity, R&D capabilities, and employee competence. Scenario analysis revealed that interventions targeting agility and decision-making processes were more effective than those focused solely on infrastructure, emphasizing the need for multidimensional strategies. Future research is encouraged to develop localized frameworks for implementing digital supply chains in the Iranian context. Special attention to managerial perceptions and cultural resistance will be essential for shaping effective policies. Finally, decision-support tools based on FCM and intelligent learning algorithms

can assist managers in evaluating intervention scenarios and selecting optimal transformation pathways.

Keywords: Digital Supply Chain, Fuzzy Cognitive Mapping, NHL Algorithm, Barriers and Requirements, Digitalization.



تحلیل موانع، الزامات و نتایج دیجیتال سازی زنجیره تأمین به کمک رویکرد نگاشت شناختی فازی مبتنی بر الگوریتم هب غیر خطی

گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران

مهدیه حقیقت ^{ID}

گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران

مجتبی فرخ ^{ID} *

گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران

امید مهدی عبادتی ^{ID}

چکیده

با گسترش فناوری های نوین در عصر انقلاب صنعتی چهارم، از جمله اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، بلاک چین و کلان داده، زنجیره تأمین به عنوان یکی از ارکان اصلی خلق ارزش، دستخوش تحولی بنیادین شده و مفهوم زنجیره تأمین دیجیتال را پدید آورده است. با وجود اهمیت این تحول، صنایع ایران هنوز در مراحل ابتدایی گذار به زنجیره تأمین دیجیتال قرار دارند و با چالش هایی نظیر کمبود زیرساخت، محدودیت های فناورانه و فقدان فرهنگ دیجیتال مواجه اند. مطالعات پیشین عمدتاً بر جنبه های فنی و ساختاری تمرکز داشته اند و کمتر به ادراکات و تفسیرهای خبرگان و مدیران توجه کرده اند. پژوهش حاضر باهدف پر کردن این خلأ، با بهره گیری از رویکرد نگاشت شناختی فازی (FCM) و استفاده از الگوریتم یادگیری هب غیرخطی (NHL) به تحلیل روابط علی میان مفاهیم کلیدی مربوط به سازه های شناختی در فرایند دیجیتالی سازی زنجیره تأمین در صنایع ایران می پردازد. سازه های شناختی شامل موانع، الزامات و نتایج دیجیتالی سازی است که با مطالعه ادبیات و نظر خبرگان گردآوری شده است. داده ها از طریق مصاحبه های نیمه ساخت یافته با خبرگان و پرسش نامه تخصصی گردآوری شده اند. نتایج نشان داد که هر الگوریتم در بازنمایی شدت و جهت روابط میان مفاهیم عملکرد متفاوتی دارد، اما الگوهای کلی روابط از سازگاری قابل توجهی برخوردارند. همچنین، تحلیل سناریوهای مداخله ای نشان داد که ترکیب راهبردهای مدیریتی، فناورانه و منابع انسانی می تواند اثربخشی بیشتری در بهبود شاخص های عملکردی زنجیره تأمین داشته باشد. این پژوهش با ارائه چارچوبی مفهومی، مسیر گذار به زنجیره تأمین دیجیتال را برای صنایع ایران تسهیل می نماید و می تواند راهنمایی کاربردی برای مدیران و سیاست گذاران فراهم آورد.

کلیدواژه ها: زنجیره تأمین دیجیتال، نگاشت شناختی فازی، الگوریتم NHL، موانع و الزامات دیجیتال سازی.

مقدمه

تحولات ناشی از انقلاب صنعتی چهارم، با بهره‌گیری از فناوری‌هایی چون اینترنت اشیا^۱، هوش مصنوعی^۲، بلاک‌چین^۳، رایانش ابری^۴ و کلان‌داده^۵، دگرگونی عمیقی در شیوه‌های تولید، مدیریت و تصمیم‌گیری سازمان‌ها ایجاد کرده است (Mirashrafi, 2021; Jankovic et al., 2023). این فناوری‌ها با ایجاد پیوند میان عناصر فیزیکی و دیجیتال، زمینه‌ساز شکل‌گیری اکوسیستم‌های هوشمند و داده‌محور شده‌اند که در آن تصمیم‌گیری‌ها با سرعت، دقت و انعطاف‌پذیری بیشتری انجام می‌پذیرد. در چنین محیط‌هایی، سازمان‌ها ناگزیرند ساختارهای عملیاتی خود را بازطراحی کرده و به سمت یکپارچگی دیجیتال حرکت کنند (Wang et al., 2022). در این میان، زنجیره تأمین به‌عنوان رکن اصلی خلق ارزش، بیش از سایر حوزه‌ها تحت تأثیر دیجیتالی‌سازی قرار گرفته و مفهوم «زنجیره تأمین دیجیتال» را شکل داده است؛ مفهومی که هدف آن ارتقای چابکی، شفافیت، هماهنگی و رقابت‌پذیری سازمان‌ها در محیط‌های پیچیده و پویا است (Viegas, 2019). زنجیره تأمین دیجیتال، به‌عنوان یکی از ارکان صنعت ۴.۰^۶، سازمان‌ها را قادر می‌سازد تا فرآیندهای عملیاتی خود را به‌صورت هوشمند، منعطف و داده‌محور مدیریت کرده و تصمیم‌گیری مبتنی بر تحلیل‌های بلادرنگ را در سراسر زنجیره نهادینه سازند. (Chilkas et al., 2024)

باوجود مزایای گسترده دیجیتال‌سازی، صنایع کشورهای درحال توسعه ازجمله ایران، هنوز در مراحل ابتدایی گذار به زنجیره تأمین دیجیتال قرار دارند. موانعی نظیر محدودیت‌های فناوریانه، کمبود زیرساخت، فقدان فرهنگ دیجیتال، نبود مهارت‌های تحلیلی و مقاومت سازمانی، روند تحول را با چالش‌های جدی مواجه کرده‌اند (Silva et al., 2020). باوجود رشد سریع فناوری‌های دیجیتال، بسیاری از سازمان‌ها به‌ویژه در صنایع تولیدی ایران هنوز در درک ابعاد و الزامات واقعی تحول دیجیتال با ابهام مواجه‌اند. مسئله اساسی آن است که مدیران و تصمیم‌گیران، علی‌رغم آگاهی از ضرورت دیجیتال‌سازی، در شناسایی و تحلیل روابط میان موانع، اقدامات موردنیاز و پیامدهای این تحول با دشواری روبه‌رو هستند. در نتیجه، تصمیم‌های مرتبط با دیجیتال‌سازی اغلب بر برداشت‌های فردی و تجربه‌های محدود متکی بوده و کمتر بر تحلیل ساختارمند روابط علی میان عوامل مختلف استوار است. از سوی دیگر، بخش قابل توجهی از

1 Internet of things (IoT)

2 artificial intelligence

3 Blockchain

4 Cyber-physical systems (CPSs)

5 Big data

6 Industry 4.0

مطالعات موجود بیشتر بر جنبه های فناوریانه و زیرساختی تمرکز داشته و به تحلیل ادراکات مدیران و چگونگی شکل گیری روابط علی میان عوامل مؤثر بر دیجیتال سازی زنجیره تأمین توجه کمتری نشان داده اند. این وضعیت ضرورت به کارگیری رویکردهایی را آشکار می سازد که بتوانند ساختارهای شناختی خبرگان و روابط علی میان موانع، اقدامات و پیامدهای دیجیتال سازی را به صورت نظام مند مدل سازی و تحلیل کنند. در حالی که ادبیات موجود عمدتاً بر جنبه های فناوریانه تمرکز دارد و از بررسی فرایندهای شناختی مدیران و تحلیل روابط علی میان عوامل دیجیتال سازی غفلت کرده است، این مطالعه می کوشد با رویکرد مدل سازی شناختی، تصویر دقیق تری از مسئله و راه حل های آن ارائه دهد. در مقابل، شرکت هایی که زودتر به سمت این تحول حرکت کرده اند، بهبود چشمگیری در عملکرد، رضایت مشتری و هماهنگی عملیاتی تجربه کرده اند (Zhou, 2023; Brantner, 2024). مطالعات اخیر نشان داده اند که موانع تحول دیجیتال در زنجیره تأمین، علاوه بر زیرساخت های فنی، شامل چالش های فرهنگی، ضعف در مهارت های دیجیتال، نبود مدل های تحلیلی مناسب و عدم آمادگی سازمانی هستند. این در صورتی است که تصمیم گیری های کلان در مسیر دیجیتال سازی، به شدت متأثر از ادراکات ذهنی مدیران درباره موانع، الزامات و پیامدهای این تحول است. به ویژه در صنایع تولیدی ایران، فقدان درک روابط علی میان موانع و الزامات و نتایج دیجیتالی سازی، موجب شده است که مدیران نتوانند مسیر تحول دیجیتال را به صورت هدفمند طراحی کنند. ماهیت پویای تحول دیجیتال موجب شده است که بسیاری از مدیران در پیاده سازی فناوری های دیجیتال با چالش هایی مواجه شوند و روند تحول را به تأخیر اندازند (Kumar et al., 2023). از این رو، تحلیل سازه های شناختی و روابط علی میان این عوامل در فرایند دیجیتال سازی، می تواند بینش های ارزشمندی برای طراحی راهکارهای مدیریتی فراهم آورد (Sarmiento et al., 2024). در همین راستا، نگاشت شناختی فازی^۱ به عنوان یکی از روش های مدل سازی نرم، قابلیت تحلیل ساختارهای علی پیچیده را در محیط های چندبعدی و پرابهام فراهم می سازد. این رویکرد با ترکیب منطق فازی و ساختار شبکه ای، امکان مدل سازی ادراکات انسانی و تحلیل پویایی سیستم را فراهم می سازد. در محیط های عملیاتی مانند زنجیره تأمین، استفاده از این رویکرد می تواند به شناسایی مسیرهای بهینه تصمیم گیری و طراحی مداخلات اثربخش کمک کند (Martin, 2025). با وجود گسترش ادبیات مرتبط با زنجیره تأمین دیجیتال، هنوز چندین شکاف پژوهشی مهم وجود دارد:

^۱ Fuzzy Cognitive Map (FCM)

۱. اغلب پژوهش‌های پیشین، موانع، توانمندسازها یا پیامدهای دیجیتال‌سازی را به صورت جداگانه بررسی کرده‌اند و معمولاً از رویکردهای خطی یا تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده کرده‌اند. این روش‌ها توان تحلیل روابط بازخوردی و علی پیچیده میان این ابعاد را در قالب یک چارچوب یکپارچه محدود می‌سازد.

۲. اگرچه تحول دیجیتال به شدت تحت تأثیر برداشت‌ها و ادراکات ذهنی مدیران است، پژوهش‌های اندکی به مدل‌سازی شناخت خبرگان پرداخته‌اند. به‌ویژه، نحوه درک مدیران از روابط میان موانع، اقدامات موردنیاز و پیامدهای تحول، کمتر به صورت ساختارمند تحلیل شده است.

۳. باوجود کاربرد FCM در برخی حوزه‌های مدیریتی، استفاده از سازوکارهای یادگیری پیشرفته همچون الگوریتم هب فعال (AHL) و هب غیرخطی (NHL) برای بهبود وزن‌های علی و افزایش پایداری مدل، در پژوهش‌های مرتبط با دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین بسیار محدود بوده است. علاوه بر این، مطالعات تجربی در زمینه صنایع ایران نیز بسیار اندک است.

برای رفع شکاف‌های فوق، پژوهش حاضر نوآوری‌های زیر را ارائه می‌کند که شامل (۱) توسعه یک چارچوب علی یکپارچه مبتنی بر FCM برای تحلیل هم‌زمان موانع، اقدامات و پیامدهای دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین؛ (۲) مدل‌سازی شناخت خبرگان و مدیران به منظور استخراج شبکه روابط ادراکی میان عوامل تحول دیجیتال؛ (۳) کاربرد و مقایسه دو الگوریتم یادگیری AHL و NHL جهت بهبود تخمین وزن‌های علی و افزایش پایداری مدل؛ (۴) ارائه یک ابزار تصمیم‌یار مبتنی بر سناریو برای اولویت‌بندی اقدامات دیجیتال‌سازی در صنایع ایران.

بر این اساس، پرسش اصلی پژوهش چنین است: مدیران و تحلیل‌گران چگونه روابط علی میان موانع، اقدامات و پیامدهای دیجیتال‌سازی را ادراک می‌کنند و کدام اقدامات بیشترین اثرگذاری را در بهبود عملکرد زنجیره تأمین دیجیتال دارند؟

پیشینه پژوهش

موانع زنجیره تأمین دیجیتال

پیاده‌سازی زنجیره تأمین دیجیتال با چالش‌های چندبعدی مواجه است که در چهار سطح سازمانی، فناوریانه، استراتژیک و محیطی قابل تحلیل‌اند. در سطح سازمانی، فقدان حمایت مدیریت عالی،

ساختارهای پیچیده، سیستم های ارزیابی عملکرد ناکارآمد و عدم درک ابعاد محیط کسب و کار، موجب کاهش آمادگی سازمان ها برای پذیرش فناوری های نوین می شود (Rane et al., 2025; Sezer, 2020). در سطح فناورانه، چالش هایی نظیر فقدان مهارت های دیجیتال در میان کارکنان، ناآگاهی نسبت به ابزارهای نوین، زیرساخت آموزشی ناکافی، نگرانی های امنیتی و عدم دسترسی به تجهیزات هوشمند، مانع از بهره برداری مؤثر از فناوری هایی مانند اینترنت اشیا، بلاک چین، رایانش ابری و هوش مصنوعی می شوند (Dadsena et al., 2024). در سطح استراتژیک، نبود فوریت در پذیرش تحول دیجیتال، فقدان استراتژی های نوآوری، ضعف در ظرفیت تحقیق و توسعه و تمرکز ناکافی بر برنامه ریزی بلندمدت، موجب اجرای پراکنده و ناکارآمد فناوری ها می شود. این موانع به ویژه در سازمان های کوچک و متوسط، با ساختار سنتی و فرهنگ محافظه کارانه، برجسته تر هستند و مانع از هم راستایی فناوری ها با اهداف رقابتی می شوند (Kohli & Malik, 2025; Pepparoni et al., 2025). در سطح محیطی، عواملی نظیر فقدان حمایت دولتی، بی ثباتی سیاسی، نبود مشوق های مالی و ضعف زیرساخت های ملی، از جمله موانع کلان در مسیر دیجیتال سازی زنجیره تأمین محسوب می شوند. این موانع خارج از کنترل مستقیم سازمان بوده و بر توانایی آن برای ورود به مسیر تحول دیجیتال تأثیر می گذارند (Ammar et al., 2024). مطالعات اخیر نشان می دهند که عدم هم راستایی چشم انداز دیجیتال بین شرکای زنجیره تأمین، ناسازگاری زیرساخت های دیجیتال با الزامات نوین، کمبود مهارت های تخصصی، ضعف در مدیریت تغییر و نبود آمادگی زمینه ای، از جمله موانع پنهان اما تأثیرگذار در مسیر تحول دیجیتال هستند. برای غلبه بر این چالش ها، سازمان ها باید با توسعه معماری های باز، ارتقای فرهنگ نوآوری و هم راستایی استراتژیک، مسیر دیجیتال سازی را تسهیل کنند (Al-Halalmeh, 2022).

الزامات زنجیره تأمین دیجیتال

در مسیر تحول دیجیتال زنجیره تأمین، مجموعه ای از معیارهای کلیدی به عنوان الزامات بنیادین شناخته می شوند که نقش حیاتی در ارتقاء عملکرد، پایداری و تاب آوری این سیستم ها ایفا می کنند. نخست، قابلیت ردیابی به عنوان یکی از ارکان دیجیتالی شدن، امکان پیگیری لحظه ای موقعیت، وضعیت و مسیر حرکت کالاها را در تمام مراحل زنجیره تأمین فراهم می سازد و موجب افزایش شفافیت و کنترل می شود (Wang & Li, 2024; Roy, 2021). در کنار آن، انعطاف پذیری به سازمان ها اجازه می دهد تا در برابر نوسانات تقاضا، اختلال های غیرمنتظره یا تغییرات بازار، واکنش سریع و مؤثر داشته باشند (Al-Tarra et

(Zhao et al., 2023; Federico et al., 2023; al., 2024) همکاری و مشارکت بهینه نیز با تسهیل تبادل داده میان سیستم‌های مختلف، زمینه‌ساز یکپارچگی اطلاعاتی و تصمیم‌گیری هماهنگ در سطح زنجیره است (Lee, 2023). همچنین، قابلیت اتصال‌پذیری با ایجاد ارتباط امن و یکپارچه میان اجزا و ذی‌نفعان، زیرساخت ارتباطی لازم برای عملکرد هماهنگ را فراهم می‌آورد (Zhao et al., 2023; Federico et al., 2023). در حوزه پایداری، قابلیت پایداری به حفظ عملیات بلندمدت با مصرف بهینه منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی اشاره دارد (Ivanov, 2022). چابکی زنجیره تأمین نیز با کوتاه‌سازی زمان چرخه‌های تولید و توزیع، سرعت واکنش به تغییرات را افزایش می‌دهد (Zhao et al., 2023). در مواجهه با بحران‌ها، تاب‌آوری توانایی بازسازی سریع و بازگشت به عملکرد بهینه را تضمین می‌کند (Sorocho et al., 2024). افزون بر این، رؤیت‌پذیری و شفافیت با فراهم‌سازی داده‌های دقیق و قابل اعتماد، تصمیم‌گیری هوشمند را تسهیل می‌سازد (Ivanov, 2022; Roy, 2021). درنهایت، مقیاس‌پذیری امکان افزایش یا کاهش حجم عملیات بدون افت کیفیت را فراهم کرده و انعطاف عملیاتی را در سطح کلان ارتقاء می‌دهد (Sorocho et al., 2024). این الزامات در کنار هم، چارچوبی جامع برای طراحی و پیاده‌سازی زنجیره تأمین دیجیتال فراهم می‌آورند.

نتایج زنجیره تأمین دیجیتال

دیجیتال‌سازی هوشمند زنجیره‌های تأمین، موجب ارتقای عملکرد عملیاتی، استراتژیک و رقابتی سازمان‌ها شده است. این تحول با افزایش انعطاف‌پذیری در مواجهه با نوسانات بازار، امکان واکنش سریع‌تر به اختلالات را فراهم می‌سازد (Mozamil et al., 2025). همچنین، ادغام فناوری‌های دیجیتال موجب تسهیل همکاری بلادرنگ میان شرکای زنجیره تأمین، بهبود هماهنگی فرآیندها و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود (Salma et al., 2023). به‌عنوان نمونه، بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی تقاضا، کاهش سطح موجودی، بهینه‌سازی منابع و صرفه‌جویی اقتصادی را به همراه داشته است. (Chen et al., 2024) از منظر رقابتی نیز دیجیتال‌سازی با ارتقای عملکرد لجستیکی، افزایش شفافیت و تسهیل ردیابی لحظه‌ای، موجب بهبود پاسخ‌گویی و رقابت‌پذیری شرکت‌ها شده است. به‌طور کلی، نتایج این تحول شامل افزایش چابکی، همکاری، کارایی، صرفه‌جویی و تاب‌آوری است که همگی در جهت پایداری زنجیره تأمین عمل می‌کنند. برخی از پژوهش‌ها به‌طور خاص به بررسی موانع، محرک‌ها و

تحلیل موانع، الزامات و نتایج دیجیتال سازی زنجیره تأمین به کمک رویکرد...؛ حقیقت و همکاران | ۵۳

پیامدهای دیجیتال سازی پرداخته‌اند. برای مثال، هدایتی^۱ و همکاران (۱۴۰۳) چالش‌های اجرایی دیجیتال سازی در زنجیره تأمین را بررسی کرده و نشان می‌دهند که موفقیت در پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال نیازمند آمادگی فرهنگی و فناورانه است. قباخلو^۲ و همکاران (۲۰۲۲) نیز با تمرکز بر شرکت‌های کوچک و متوسط، عوامل تکنولوژیکی، سازمانی و محیطی اثرگذار بر پذیرش فناوری‌های Industry 4.0 را شناسایی کرده و نقشه راهی برای تحول دیجیتال ارائه داده‌اند. افزون بر این، آنیوسی^۳ و همکاران (۲۰۲۱) اثر فناوری‌های دیجیتال بر عملکرد سازمان‌ها را نشان می‌دهد و به نقش آن‌ها در ارتقای بهره‌وری اشاره می‌کند. به منظور مقایسه نظام‌مند مطالعات پیشین و تبیین جایگاه نوآوری پژوهش حاضر، جدول ۱ نسخه توسعه یافته‌ای از مرور ادبیات را ارائه می‌کند که علاوه بر مقایسه موضوعی مطالعات در زمینه موانع، الزامات و نتایج دیجیتال سازی، رویکردهای روش‌شناختی آن‌ها را نیز بررسی می‌کند. در این جدول، نوع داده، روش پژوهش و ابزار تحلیلی، سطح تحلیل علی، فضای تصمیم‌گیری (ایستا یا پویا)، حوزه صنعتی مطالعه و کشور مورد بررسی قرار گرفته است تا تصویری جامع از وضعیت موجود ادبیات و خلأهای روش‌شناختی آن ارائه شود.

جدول ۱. مقایسه مطالعات پیشین و تبیین خلأ پژوهشی

نویسنده و سال	موضوع مطالعه	روش	نوع داده	روش/ ابزار تحلیلی	فضای تصمیم‌گیری	حوزه صنعتی	تحلیل علی: یکپارچه	FCM	الگوریتم AHL	الگوریتم NHL	کشور	خلأ باقی‌مانده
Hedayati et al., 2024	موانع دیجیتال سازی	✓	X	X	تحلیل محتوای خبرگان / آماری	ایستا	تولیدی	X	X	X	ایران	عدم تحلیل سازه‌ها به صورت یکپارچه
Ghabakhloo et al., 2022	موانع و الزامات	✓	✓	X	پرسشنامه	AHP	ایستا	SME	X	X	ایران	عدم استخراج روابط علی
Aniosi et al., 2023	نتایج دیجیتال سازی	X	X	✓	داده ثانویه	داده کاوی	چند صنعتی	X	X	X	اروپا	عدم توجه به

1 Hedayati

2 Ghabakhloo

3Anoussi

نوبسده و سال	موضوع مطالعه	موانع	اِترامان	نوع داده	روش / ابزار تحلیلی	فضای تصمیم گیری	حوزه صنعتی	تحلیل علی یکپارچه	FCM	الگوریتم AHL	الگوریتم NHL	کشور	خلاّ باقی مانده
													پیش نیازها و موانع
Salma et al., 2023	الزامات، نتایج	X	✓	✓	پرسشنامه	SEM	ایستا	تولیدی	X	X	X	هند	عدم تحلیل هم زمان سه سازه
Chen et al., 2024	نتایج دیجیتال سازی	X	X	✓	داده ثانویه	تحلیل عملکرد	ایستا	تولیدی	X	X	X	چین	عدم مدل سازی علی
et Muzamil al., 2025	نتایج دیجیتال سازی	X	X	✓	مدل سازی ثانویه	شبیه سازی	ایستا	تولیدی	X	X	X	مالزی	عدم شناسایی موانع و الزامات
پژوهش حاضر	موانع، الزامات، نتایج	✓	✓	✓	خبرگان	FCM + AHL/ NHL	پویا	تولیدی	✓	✓	✓	ایران	تحلیل یکپارچه، تحلیل علی، FCM + AHL/ NHL برای اولین بار

همان گونه که در جدول ۱ مشاهده می شود، بخش عمده ای از مطالعات پیشین از رویکردهای کمی متعارف مانند پرسش نامه، تحلیل آماری، AHP و SEM استفاده کرده و فضای تصمیم گیری در آنها عمدتاً ایستا بوده است. همچنین تحلیل علی پویا و مدل سازی شناخت خبرگان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. افزون بر این، کاربرد نگاشت شناختی فازی همراه با الگوریتم های یادگیری پیشرفته AHL و NHL در حوزه دیجیتال سازی زنجیره تأمین گزارش نشده است؛ بنابراین، پژوهش حاضر با بهره گیری از یک چارچوب علی-شناختی پویا، خلاّ روش شناختی موجود در ادبیات را پوشش می دهد.

جدول ۲. موانع دیجیتال سازی زنجیره تأمین

موانع اصلی	موانع فرعی	شرح	منابع
موانع سازمانی	عدم حمایت و آمادگی مدیریت عالی (C1)	حمایت و تعهد مدیریت عالی به این معناست که مدیران در طول فرایند توسعه و استقرار فعال هستند و به طور کامل از تلاش های نوآورانه حمایت می کنند.	Tsvuura et al., 2021
	ساختار سازمانی نامناسب (ساختار پیچیده) (C2)	ساختار سازمانی نقش مهمی در تحول دیجیتال ایفا می کند. چالش اصلی رهبران و مدیران ایجاد و حفظ ساختار سازمانی سازگار، انعطاف پذیر، پذیرا، در دسترس و مبتکر است.	Netsakhuma, 2021; Gupta et al., 2022
	سیستم نامناسب ارزیابی عملکرد (C3)	مکانیسم ناکافی برای ارزیابی عملکرد باعث نارضایتی بودن کارکنان می شود.	Netsakhuma, 2022
	عدم درک ابعاد محیط کسب و کار (C4)	یک محیط کسب و کار با نرخ بالای پذیرش فناوری دیجیتال به سازمان ها کمک می کند تا با بار نظارتی کاهش یافته کار کنند. زمانی که فشار رقابتی، امنیت شغلی و قوانین بازار محصول شفاف و انعطاف پذیر باشد، رابطه بین کیفیت مدیریتی برتر و نرخ بالاتر پذیرش دیجیتال به رسمیت شناخته می شود.	Ghadge et al., 2020
موانع فناورانه	توانمندی (قابلیت) ناکافی بین کارکنان (C5)	فقدان توانایی های دیجیتال، انجام وظایف روزمره را برای کارمندان در حرفه های امروزی بسیار دشوارتر می کند، اما کارمندانی که توانایی های دیجیتالی دارند ممکن است برای حفظ همگامی با جریان ها و فناوری ها مشکل پیدا کنند.	Brown et al., 2018
	عدم آگاهی کارکنان و ذینفعان در مورد ابزارهای دیجیتال (C6)	درک نحوه عملکرد فناوری پایه و نحوه استفاده صحیح از ابزارها و ابزارهای متعدد آن، در تحول دیجیتال بسیار مهم است. این بخش مهمی از زندگی در فرهنگ تحت سلطه فناوری امروزی است و فرصت های متعددی برای رشد و موفقیت در اختیار ما قرار می دهد.	Linzalone et al., 2020
	زیرساخت ناکافی برای اجرای برنامه های آموزش مهارت نیروی کار برای دیجیتالی شدن (C7)	براساس گزارش مجمع جهانی اقتصاد تا سال ۲۰۲۵، ۵۰ درصد از کل کارگران به دلیل استفاده از فناوری های جدید به مهارت مجدد نیاز خواهند داشت. بیش از دو سوم توانایی هایی که در شرایط استخدامی امروزی حیاتی تلقی می شود، در پنج سال آینده تغییر خواهند کرد. یک سوم از توانایی های مورد نیاز در سال ۲۰۲۵ شامل استعداد های تکنولوژی می شود که هنوز برای نیازهای شغلی امروز حیاتی تلقی نمی شوند.	Li, 2022

منابع اصلی	موانع فرعی	شرح	منابع
	نگرانی در خصوص امنیت داده‌ها و حملات سایبری (C8)	امنیت و حفظ حریم خصوصی داده‌ها نگرانی اصلی در عصر دیجیتال است زیرا ممکن است داده‌ها به بیرون درز کند یا به رقبای اشخاص ثالث منتقل شود.	Khanan et al., 2019
موانع استراتژیک	عدم وجود فوریت برای دیجیتالی شدن زنجیره تأمین (C9)	یکی از چالش‌های اصلی پذیرش DSC عدم فوریت در دیجیتالی سازی است. فوریت ناگهانی و فزاینده تحول دیجیتال توسط همه سازمان‌ها احساس می‌شود. با این حال هنوز سردرگمی در مورد آنچه تحول دیجیتال مستلزم آن است وجود دارد.	Ada et al., 2022
	فقدان استراتژی‌های نوآوری مناسب (C10)	استراتژی نوآوری مناسب برای سازمان برای اتخاذ DSC حیاتی است. نوعی خاصی از سیستم کسب و کار از انواع خاصی از استراتژی‌های نوآوری پشتیبانی می‌کند.	Gupta et al., 2022
	فقدان توانمندی و تسهیلات R&D (C11)	نوآوری موفقیت‌آمیز به ترکیبی از قابلیت‌های سازمان مانند توانایی مالی یا دسترسی به امور مالی، استخدام پرسنل بسیار ماهر، دانش بازار، تحقیق و توسعه (R&D) و ایجاد همکاری و همکاری مؤثر با سایر شرکای زنجیره تأمین بستگی دارد.	Marion et al., 2021
	تمرکز استراتژیک ناکافی بر دیجیتالی شدن (C12)	اگر تلاش‌های دیجیتالی فاقد چشم‌انداز و برنامه روشن باشند، ممکن است سازمان‌دهی نشده و نتایج مورد انتظار را به دست نیاورند.	Dutta et al., 2021
موانع آمادگی (زمینه‌ای و محیطی)	نبود سیاست و فقدان قوانین، حمایت دولتی (C13)	قوانین و حمایت دولتی فقدان چارچوب‌های قانونی و سیاست‌های شفاف دولت در زمینه تحول دیجیتال که باعث عدم انسجام طرح‌ها و بی‌ثباتی در حمایت از پروژه‌ها می‌شود	Zhu et al., 2023
	عدم دسترسی فناوریانه (C14)	نبود زیرساخت‌های دیجیتال (اینترنت پرسرعت، سخت‌افزار مناسب و پلتفرم‌های مورد نیاز) در نقاط مختلف که مانع دسترسی یکپارچه سازمان‌ها و افراد به راهکارهای نوین می‌شود.	Habibi et al., 2023
	بی‌ثباتی سیاسی-فقدان چشم‌انداز (C15)	ناپایداری سیاسی کشور و نبود دید بلندمدت و استراتژیک در سطوح تصمیم‌گیری کلان که سرمایه‌گذاری در تحول دیجیتال را پرریسک و غیرقطعی جلوه می‌دهد.	Rakgoale, 2024
	نبود مشوق و سیاست‌های مالی کافی (C16)	کمبود مشوق‌های مالی، یارانه و ابزارهای تأمین مالی برای پروژه‌های دیجیتال؛ به‌ویژه برای شرکت‌های کوچک و متوسط که توان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین را ندارند.	Gkrimpizi et al., 2023

جدول ۳. الزامات دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین

منابع	شرح	الزامات دیجیتال سازی زنجیره تأمین
Wang & Li, 2024	امکان پیگیری لحظه‌ای موقعیت، وضعیت و مسیر حرکت کالاها در تمام مراحل زنجیره تأمین	قابلیت ردیابی (C17)
Al-Tra et al., 2024; Federico et al., 2023; Zhao et al., 2023	توانایی سازگاری سریع با تغییرات تقاضا، شرایط بازار یا اختلال‌های غیرمنتظره	انعطاف پذیری (C18)
Li, 2022	توانایی یکپارچه سازی و تبادل داده‌ها به طور یکپارچه در سیستم‌های مختلف	همکاری و مشارکت بهینه (C19)
Federico et al., 2023	برقراری ارتباط یکپارچه و مبادله امن داده میان اجزا و ذی‌نفعان زنجیره تأمین	قابلیت اتصال پذیری (C20)
Ivanov, 2022	حفظ عملیات بلندمدت با مصرف بهینه منابع و کاهش اثرات زیست محیطی	قابلیت پایداری (C21)
Yang et al., 2021; Zhao et al., 2023	سرعت واکنش به تغییرات و کوتاه کردن زمان چرخه‌های تولید و توزیع	چابکی زنجیره تأمین (C22)
Soroju et al., 2024	امکان بازسازی سریع و بازگشت به عملکرد بهینه پس از بروز اختلال یا بحران	تاب آوری در زنجیره تأمین (C23)
Ivanov, 2022	دسترسی به داده‌های دقیق و شفاف در مورد فرایندها، کالاها و تصمیمات کلیدی	رویت پذیری و شفافیت (C24)
Soroju et al., 2024	توانایی افزایش یا کاهش حجم عملیات و ظرفیت زنجیره بدون افت کیفیت یا کارایی	مقیاس پذیری (C25)

جدول ۴: نتایج دیجیتال سازی زنجیره تأمین

منابع	شرح	نتایج دیجیتال سازی زنجیره تأمین
Khan et al., 2022; Ning & Yao, 2023	توانایی تطبیق سریع با تغییرات تقاضا، شرایط بازار و اختلال‌های ناگهانی در جریان تدارکات با کمترین تأخیر و افت عملکرد	افزایش انعطاف پذیری (C26)
Ning & Yao, 2023	بهبود هماهنگی و اشتراک داده‌ها میان تمامی ذی‌نفعان زنجیره (تأمین کننده، تولید کننده، توزیع کننده و مشتری) از طریق پلتفرم‌های یکپارچه دیجیتال	همکاری (C27)
Yang et al., 2021; Obrahim et al., 2023	کاهش هزینه‌های عملیاتی، انبارداری و حمل و نقل از طریق اتوماسیون فرایندها، بهینه سازی مسیرها و پیش بینی دقیق نیازها	کاهش هزینه (C28)
Yang et al., 2021	ارتقای مزیت رقابتی سازمان در بازار با بهبود سرعت پاسخ، نوآوری در	افزایش رقابت

منابع	شرح	نتایج دیجیتال سازی زنجیره تأمین
	خدمات و کاهش زمان عرضه محصول به مشتری	(C29)
Ning & Yao, 2023	قابلیت واکنش سریع به نیازها و خواسته‌های مشتریان و همچنین بازگرداندن عملکرد سیستم پس از وقوع اختلال با استفاده از تحلیل بلادرنگ داده‌ها	پاسخ‌گویی (C30)

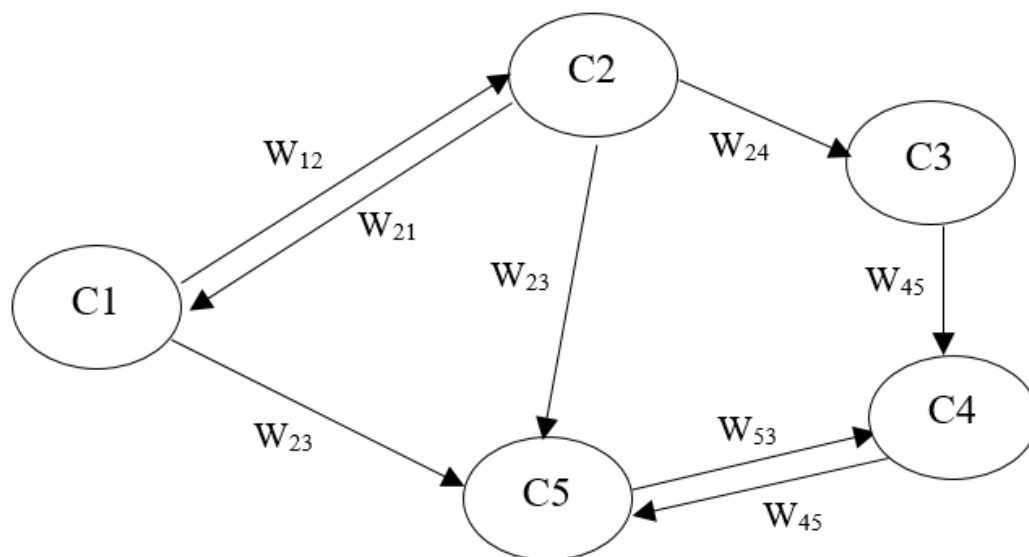
روش

داده‌ها از طریق مرور نظام‌مند ادبیات، مصاحبه‌های نیمه‌ساخت یافته با خبرگان و پرسش‌نامه تخصصی گردآوری شده‌اند. در مرحله کیفی، مفاهیم مرتبط با دیجیتال سازی زنجیره تأمین از تحلیل محتوای مصاحبه‌ها استخراج گردید. در مرحله کمی، با بهره‌گیری از نگاشت شناختی فازی روابط علی میان این مفاهیم مدل سازی شده و چارچوب‌های شناختی معتبر برای طراحی مدل نظری نهایی استخراج می‌شود. این مفاهیم در قالب نگاشت شناختی فازی مدل سازی شده و با استفاده از الگوریتم NHL در محیط Python بهینه سازی شدند. در سال‌های اخیر، پیاده سازی‌های متن باز مبتنی بر Python برای مدل سازی شبیه سازی FCM توسعه یافته‌اند که امکان تعریف ساختار علی، اجرای الگوریتم‌های یادگیری و تحلیل سناریوهای «چه می‌شود اگر» را فراهم می‌سازند. استفاده از این بسترهای محاسباتی، قابلیت بازتولیدپذیری و شفافیت روش شناسی را افزایش می‌دهد (Mpelogianni et al., 2022). در پژوهش حاضر، مدل FCM و الگوریتم NHL در محیط Python پیاده سازی و اجرا شد. فرآیند مدل سازی پیشنهادی در این پژوهش شامل چند مرحله متوالی است که از استخراج مفاهیم تا شبیه سازی سناریوها را در بر می‌گیرد. در مرحله نخست، مفاهیم کلیدی مرتبط با دیجیتال سازی زنجیره تأمین از طریق مرور نظام‌مند ادبیات و مصاحبه با خبرگان استخراج شدند. در مرحله دوم، روابط علی میان مفاهیم با استفاده از پرسش‌نامه تخصصی و ارزیابی خبرگان شناسایی گردید. در مرحله سوم، روابط علی استخراج شده در قالب نگاشت شناختی فازی مدل سازی شده و ماتریس وزن اولیه شکل گرفت. در مرحله چهارم، به منظور بهبود دقت و پایداری مدل، وزن‌های اولیه با استفاده از الگوریتم یادگیری NHL بهینه سازی شدند. در نهایت، با استفاده از مدل بهینه شده، سناریوهای مختلف مداخله‌ای شبیه سازی شده و اثر آن‌ها بر شاخص‌های عملکردی دیجیتال سازی زنجیره تأمین تحلیل گردید.

نگاشت شناختی فازي

نگاشت شناختی فازي ابزاری برای مدل سازی سیستم های پیچیده مبتنی بر روابط علی وزن دار میان مفاهیم است که امکان تحلیل رفتار دینامیکی سیستم را فراهم می سازد. در سال های اخیر، توسعه الگوریتم های یادگیری و کاربردهای تصمیم یار این مدل به طور قابل توجهی گسترش یافته است (Papageorgiou & Salmeron, 2022). این رویکرد با نمایش روابط علی میان مفاهیم در قالب یک گراف وزن دار، امکان تحلیل ساختارهای علی در حوزه هایی مانند سیستم های اجتماعی، مالی، مدیریتی و تصمیم گیری راهبردی را فراهم می سازد. شکل ۱ یک تصویر پایه از نگاشت شناختی فازي را نشان می دهد که شامل پنج مفهوم (C1 تا C5) و هشت وزن (W_{ji}) است.

شکل ۱. ساختار نگاشت شناختی فازي



تمامی مقادیر موجود در نمودار فازي هستند؛ بنابراین، مفاهیم در بازه $[0, 1]$ مقدار می گیرند. وزن ها نیز فازي بوده و در بازه $[-1, 1]$ قرار دارند و در قالب یک ماتریس وزن به اندازه $N \times N$ با نماد E تعریف می شوند. سه نوع رابطه علی میان مفاهیم می تواند وجود داشته باشد. برای محاسبه مقدار مفاهیم در هر گام شبیه سازی، از معادله زیر استفاده می شود:

$$A_i^{(k+1)} = f \left(A_i^{(k)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N A_j^{(k)} \cdot w_{ji} \right) \quad (1)$$

که در آن $A_i^{(k+1)}$ مقدار مفهوم C_i در گام $k+1$ شبیه‌سازی؛ $A_j^{(k)}$ مقدار مفهوم C_i در گام k شبیه‌سازی؛ w_{ji} وزن رابطه بین آن‌ها را تعیین می‌کند. f یک تابع آستانه‌ای سیگموئیدی است که برای محدودسازی خروجی مجموع به بازه مشخصی به کار می‌رود (Tsadiras, 2008) این تابع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}} \quad (2)$$

پارامتر $\lambda > 0$ ، میزان شیب تابع سیگموئید را تعیین می‌کند و در این رویکرد، مقدار $\lambda = 1$ برای آن به کار گرفته شده است. این تابع انتخاب شده زیرا خروجی A_i در یک بازه $[0,1]$ قرار گرفته است. مقدار مفهوم C_i نشان‌دهنده شدت یا میزان ارزش فیزیکی متناظر با آن است. در هر گام شبیه‌سازی، مقدار یک مفهوم با سنجش تأثیر سایر مفاهیم بر آن، طبق فرمول ریاضی تعیین شده محاسبه می‌شود. با ضرب بردار وضعیت قبلی در ماتریس روابط E به صورت ضرب ماتریسی استاندارد، بردارهای وضعیت جدیدی تولید می‌شوند که تأثیر مفاهیم فعال شده را نشان می‌دهند (Kosko, 1993). پس از هر ضرب، عناصر بردار وضعیت با استفاده از یک تابع غیرخطی نرمال‌سازی می‌شوند تا مقدار آن‌ها در بازه $\{0,1\}$ ، $\{-1,0,1\}$ و یا $[-1,1]$ قرار گیرد. فرآیند استنتاج در نگاشت شناختی فازی از طریق فعال‌سازی غیرخطی و انتشار تدریجی ادامه می‌یابد، به طوری که استنتاج به صورت دنباله‌ای زمانی از رویدادها یا یک چرخه بازتابی محدود تکامل می‌یابد. این تکرار زمانی پایان می‌یابد که سیستم به حالت تعادل برسد و داده جدیدی تولید نشود، یا تعداد مشخصی از تکرارها انجام شده باشد (Kosko, 1986). رویکرد ارائه شده در پژوهش حاضر، یک مدل نگاشت شناختی فازی توسعه یافته است. برخلاف مدل کلاسیک FCM که در آن وزن‌های روابط علی ثابت بوده و تنها مقادیر مفاهیم در هر گام به روزرسانی می‌شوند، در این مدل از الگوریتم یادگیری غیرخطی هب (NHL) برای اصلاح پویا و هم‌زمان «وزن‌های ماتریس ارتباطات» و «مقادیر مفاهیم» در طول فرآیند شبیه‌سازی استفاده شده است. این قابلیت خوداصلاحی، دقت و پایداری دینامیکی مدل را در مقایسه با رویکردهای کلاسیک به طور معناداری ارتقا می‌دهد. این ویژگی سبب می‌شود مدل پیشنهادی نسبت به نگاشت شناختی فازی کلاسیک که در آن وزن روابط علی ثابت در نظر گرفته می‌شوند، از قابلیت سازگاری و یادگیری بالاتری برخوردار باشد و بتواند ساختار روابط را در طول فرآیند شبیه‌سازی به صورت پویا اصلاح کند. در نتیجه، مدل ارائه شده را می‌توان توسعه‌ای از چارچوب کلاسیک FCM دانست که با بهره‌گیری از سازوکار یادگیری تطبیقی، دقت و پایداری تحلیل روابط علی را بهبود

می‌بخشد. برای ساخت نگاشت شناختی، ابتدا مفاهیم کلیدی از طریق مرور ادبیات و مصاحبه‌های تخصصی با خبرگان استخراج می‌شوند. این خبرگان شامل متخصصین فعال در شرکت‌های صنعتی ایران بود که به صورت هدفمند انتخاب شدند. داده‌ها در سه محور اصلی شامل موانع، قابلیت‌ها و نتایج دیجیتال سازی گردآوری شد. مفاهیم مربوط به این سه دسته عوامل در جدول ۲، ۳ و ۴ آورده شده‌اند. در ادامه فرآیند گردآوری داده‌ها، پرسش‌نامه تخصصی پژوهش باهدف سنجش شدت روابط علی میان مفاهیم استخراج شده از مرحله کیفی طراحی گردید. این پرسش‌نامه شامل مجموعه‌ای از زوج مفهومی‌ها بود که از میان ۳۰ سازه کلیدی (C1 تا C۳۰) انتخاب شدند. در ادامه، از میان ۱۴ خبره‌ی مشارکت‌کننده، نظرات ۶ نفر از افرادی که سابقه‌ی علمی و تجربی بیشتری در حوزه‌های مرتبط داشتند، انتخاب و وارد فرآیند مدل سازی شدند. به منظور افزایش شفافیت در خصوص ویژگی‌های خبرگان مشارکت‌کننده در پژوهش حاضر، مشخصات حرفه‌ای و زمینه تخصصی آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. این خبرگان دارای تجربه قابل توجه در حوزه‌های مرتبط با تحول دیجیتال، مدیریت زنجیره تأمین، فناوری اطلاعات و مدیریت صنعتی بوده و در سازمان‌های صنعتی و فناوری محور فعالیت دارند.

جدول ۵. فهرست شرکت کنندگان برای جمع‌آوری داده‌ها در مسئله موردبررسی

شرکت کننده	عنوان شرکت	تخصص	سمت	مدرک تحصیلی	سابقه کاری
1	شرکت کسب و کار سیکا	مدیریت پروژه/محصول دیجیتال	مدیر پروژه	فوق لیسانس	۹ سال
2	خودروسازی سایپا	محصول سواری-بازار جهانی-قوای محرکه-تکنولوژی‌های نوین	رئیس	کارشناسی ارشد	۱۵ سال
3	همکاران سیستم	مدیریت تولید	مدیر محصول	کارشناسی ارشد	۱۴
4	آلومینیوم ایران	مدیریت پروژه	تعمیرات و نگهداری	فوق لیسانس	۱۲ سال
5	جهان طب گستر مینا	برنامه ریزی استراتژیک، زنجیره تأمین	معاونت فروش و بازاریابی	کارشناسی ارشد	۱۵ سال
6	ماشین سازی اراک	تحلیل سیستم	کنترل کیفیت	فوق لیسانس	۱۰ سال

خبرگان می‌بایست شدت تأثیر مفهوم اول بر مفهوم دوم را در مقیاس پنج درجه‌ای از «تأثیر بسیار کم» تا

«تأثیر بسیار زیاد» ارزیابی کنند. سپس روابط علی میان مفاهیم با استفاده از مقیاس جدول ۶ و قواعد شرطی IF-THEN تعریف می گردند. پاسخ های خبرگان به صورت ماتریس های زوج مقایسه ای ثبت گردید و برای هر رابطه، شدت اثر عددی به برچسب زبانی متناظر تبدیل شد. سپس داده ها با استفاده از کدگذاری دودویی^۱ استانداردسازی شدند؛ به طوری که هر ستون از ماتریس نهایی نمایانگر یک سطح از شدت تأثیر بود. در نتیجه ماتریس اولیه روابط میان مفاهیم شکل می گیرد. این داده ها به صورت هم زمان به تابع build از کلاس ExpertFcm در کتابخانه FCMPy داده شدند تا ماتریس وزن اولیه مدل محاسبه گردد. این روابط در قالب توابع عضویت فازی نمایش داده شده و با روش SUM تجمیع می شوند (Subramania et al., 2015). در مرحله بعد، فرآیند دی فازی سازی با روش مرکز ثقل انجام می شود تا وزن های عددی روابط به دست آید. در این پژوهش، برای افزایش دقت، پایداری و قابلیت تعمیم مدل، الگوریتم های یادگیری و بهینه سازی NHL برای بهینه سازی وزن ها در محیط Python به کار گرفته شد. الگوریتم های یادگیری مبتنی بر قوانین هب و نسخه های غیر خطی آن در مطالعات اخیر به عنوان رویکردهای مؤثر برای بهبود همگرایی، پایداری و دقت پیش بینی مدل های FCM معرفی شده اند (Stach et al., 2021). به منظور اطمینان از اعتبار متدولوژی به کاررفته و قابلیت اتکای نتایج حاصل از نگاشت شناختی فازی، چندین گام اعتبارسنجی در این پژوهش انجام شد. در گام نخست، برای اطمینان از **اعتبار محتوایی**، مفاهیم استخراج شده از طریق مرور ادبیات و مصاحبه های تخصصی در چند مرحله با مشارکت خبرگان بازمینی و تأیید شدند تا اطمینان حاصل شود که سازه های انتخاب شده نماینده مناسبی از ابعاد کلیدی دیجیتالی سازی زنجیره تأمین هستند. در گام دوم، **پایداری و همگرایی مدل** از طریق اجرای چندباره شبیه سازی با شرایط اولیه متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیستم پس از چند تکرار به وضعیت پایدار همگرا می شود که این امر نشان دهنده پایداری دینامیکی مدل است. در گام سوم، به منظور **اعتبارسنجی منطقی نتایج**، الگوهای حاصل از شبیه سازی با انتظارات نظری موجود در ادبیات و نیز قضاوت خبرگان مقایسه شد. هم خوانی نتایج مدل با دانش نظری و تجربی موجود، روایی ساختاری مدل را تقویت می کند. در نهایت، تحلیل حساسیت محدودی برای بررسی استحکام مدل در برابر تغییرات جزئی در وزن روابط انجام شد که نشان داد ساختار کلی نتایج نسبت به تغییرات کوچک در پارامترها پایدار است.

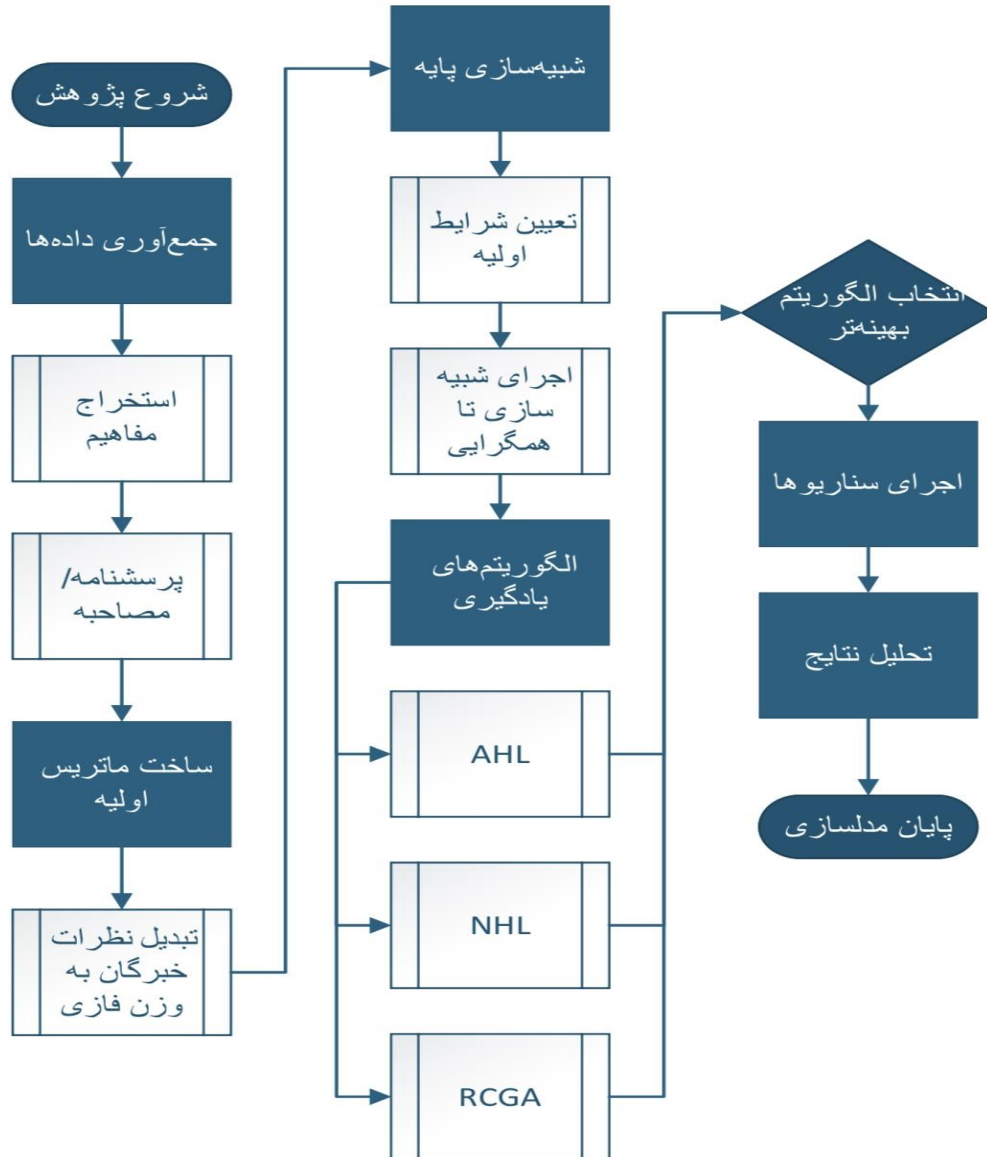
1 One-hot encoding

جدول ۶. متغیرهای زبانی برای ارزیابی قدرت تأثیر هر رابطه

متغیر زبانی	تابع عضویت
بسیار قوی	$(0.75, 1.00, 1.00)$
قوی	$(0.50, 0.75, 1.00)$
متوسط	$(0.25, 0.50, 0.75)$
ضعیف	$(0.00, 0.25, 0.50)$
خیلی ضعیف	$(0.00, 0.00, 0.25)$

در مراحل بعد، سناریوهای مداخله‌ای تعریف و اجرا شد و در نهایت، نتایج مدل تحلیل گردید و ساختار نهایی مدل تثبیت شد. به منظور ارائه تصویری شفاف از مراحل اجرایی پژوهش، فرآیند کلی مدل سازی و تحلیل در قالب فلوچارت نمایش داده شده است. این فلوچارت شامل مراحل استخراج مفاهیم، ساخت نگاشت شناختی فازی، محاسبه ماتریس وزن اولیه، بهینه سازی وزن ها با الگوریتم NHL، اجرای شبیه سازی و تحلیل سناریوهای تصمیم گیری است. مراحل اجرایی پژوهش به صورت نمودار زیر نمایش داده شده است:

شکل ۲. فلوچارت اجرایی پژوهش



مقیاس عددی مورد استفاده در پرسش‌نامه به صورت زیر تعریف شد:

الگوریتم NHL

یکی از نقاط ضعف نگاشت شناختی فازی که توسط خبرگان ساخته می‌شود، احتمال همگرایی آن به نواحی نامطلوب است. برای مثال، در یک سناریوی مداخله، مدل ممکن است تنها مقادیر حدی مانند ۰ یا

۱ را پیش‌بینی کند. برای غلبه بر این ضعف، دو راهبرد یادگیری را پیشنهاد کرده است: الگوریتم AHL و الگوریتم NHL که هر دو بر اساس قانون یادگیری هب طراحی شده‌اند. وظیفه این الگوریتم‌ها اصلاح ماتریس اولیه ارتباطات FCM است که توسط خبرگان ساخته شده، به گونه‌ای که گره‌های انتخاب شده (که به آن‌ها مفاهیم خروجی مطلوب یا DOCs گفته می‌شود) همواره در بازه مطلوب همگرا شوند. هر دو الگوریتم از نظر ساختار مشابه شبیه سازی FCM هستند، با این تفاوت اساسی که در آن‌ها هم مقادیر مفاهیم و هم وزن‌ها در هر گام زمانی به روزرسانی می‌شوند، در حالی که در شبیه سازی معمول FCM تنها مقادیر مفاهیم تغییر می‌کنند. در الگوریتم NHL، مقادیر تمامی گره‌ها (A_i) و وزن‌ها (W_{ij}): لبه مستقیم از گره i به j به صورت هم‌زمان در هر گام زمانی به روزرسانی می‌شوند. در مقابل، در الگوریتم AHL، به روزرسانی گره‌ها و وزن‌ها به صورت غیرهم‌زمان و بر اساس توالی‌ای از الگوهای فعال سازی که توسط کاربر مشخص شده‌اند انجام می‌گیرد. در هر گام شبیه سازی، یک گره جدید به عنوان «گره فعال» انتخاب می‌شود؛ تنها این گره و لبه‌های ورودی آن به روزرسانی می‌شوند و سایر اجزا بدون تغییر باقی می‌مانند. علاوه بر بهینه سازی لبه‌های موجود، AHL قادر است ارتباطات جدیدی میان مفاهیم ایجاد کند؛ رفتاری که ممکن است نامطلوب باشد، به ویژه اگر هدف مدل ساز صرفاً تنظیم وزن‌ها باشد و نه ایجاد ارتباطاتی که توسط خبرگان تأیید نشده‌اند. ابتدا تابع برازش ($F1$) برای هر DOC طبق معادله (۳) محاسبه می‌شود. اگر مقدار $F1$ برای هر DOC در هر گام زمانی کاهش یابد و مقادیر DOC ها در یک بازه مطلوب قرار داشته باشند، نخستین شرط توقف برقرار خواهد بود. دوم، ضروری است بررسی شود که آیا مقادیر DOC ها پایدار هستند؛ به این معنا که آیا تغییرات آن‌ها در هر گام از مقدار آستانه ε مشخص شده در معادله (۴) بیشتر است یا خیر. این آستانه باید به صورت تجربی تعیین شود و مقدار پیشنهادی آن بین ۰,۰۰۱ تا ۰,۰۰۵ است. (Papageorgiou et al., 2006) اگر تغییرات کمتر از این آستانه باشد، دومین شرط توقف نیز برقرار خواهد بود. در این پژوهش، الگوریتم NHL به عنوان مبنای تحلیل انتخاب شد؛ چرا که تعادل مناسبی میان دقت، پایداری و قابلیت تعمیم پذیری ارائه می‌دهد. به منظور افزایش شفافیت در نحوه اجرای مدل پیشنهادی، روند پیاده سازی نگاشت شناختی فازی مبتنی بر الگوریتم یادگیری NHL در قالب شبه کد ارائه شده است. این الگوریتم فرآیند به روزرسانی هم‌زمان مقادیر مفاهیم و وزن روابط علی را تا رسیدن به شرایط همگرایی انجام می‌دهد.

شکل ۳. شبه کد الگوریتم NHL

Nonlinear Hebbian Learning (NHL) Algorithm for FCM Learning	
Input:	
A_0 : Initial concept vector (size N)	
T: Maximum number of reasoning iterations	
P: Number of learning steps	
η : Initial learning rate parameter ($0 < \eta < 0.1$)	
ϕ : Attenuation factor = 0.96	
ϵ : Convergence threshold	
Output:	
W: Final weight matrix (N x N)	
A(t): Final state vector of concepts at each iteration	
Algorithm Steps	
Step 1 – Initialization	
Initialize the initial weight matrix W(0) with small random values in the range [-1, 1]	
$w_{ij}(0) \in [-1, 1]$ for all i, j	
Initial state vector $v(0) = A_0$	
For t=0, set $\Delta v(0) = 0$ (since no previous step exists)	
Step 2 – FCM Simulation and Node State Update	
For each reasoning iteration $t = 1, 2, \dots, T$:	
$v_i(t) = f \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n w_{ji}(t-1) \times v_j(t-1) \right)$	
where f(x) is the sigmoid activation function:	
$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}}$	
Step 3 – Compute Node State Changes (Δv)	
For each node i:	
$\Delta v_i(t-1) = v_i(t-1) - v_i(t-2)$	
Note: For t=1, since v(-1) does not exist, $\Delta v_i(0) = 0$ is used.	
Step 4 – Compute Time-Dependent Learning Rate	
$\lambda(t) = \eta \times \left[1 - \frac{t}{1 \times 1 \times p} \right]$	
where:	
η is the initial learning rate ($0 < \eta < 0.1$)	

P is the number of learning steps

t is the current iteration number

Step 5 – Weight Update with NHL Rule (Formula 3)

For each pair of concepts *i* and *j* where $\Delta v_i(t-1) \neq 0$:

$$W_{ij}(t) = \varphi \times W_{ij}(t-1) + \lambda(t) \times [\Delta v_i(t-1) \times \Delta v_j(t-1) + W_{ij}(t-1)]$$

where:

$\varphi = 0.96$ is the attenuation factor

$\lambda(t)$ is the learning rate at iteration *t*

$\Delta v_i(t-1)$ is the state change of node *i* from $(t-2)$ to $(t-1)$

$\Delta v_j(t-1)$ is the state change of node *j* from $(t-2)$ to $(t-1)$

$W_{ij}(t-1)$ is the previous weight between node *i* and node *j*

Important Note: According to formula (3), this update is only performed when $\Delta v_i(t-1) \neq 0$. If $\Delta v_i(t-1) = 0$, the weights remain unchanged at this iteration.

Step 6 – Weight Constraints

To maintain causality constraints, limit weights to the valid range:

$$W_{ij}(t) =$$

$$+1, W_{ij}(t) > +1$$

$$-1, W_{ij}(t) < -1$$

$$W_{ij}(t), \text{ otherwise}$$

Set self-loops to zero (no node is connected to itself in classical FCM):

$$W_{ij}(t) = 0 \text{ for all } i$$

Step 7 – Convergence Check

Calculate the error between successive iterations:

$$E(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [v_i(t) - v_i(t-1)]^2$$

If $E(t) < \epsilon$ or $t > T$, stop the algorithm.

Step 8 – Final Output

Return the final weight matrix *W*

Return the final state vector *A*(*t*)

این فرآیند امکان اصلاح تدریجی وزن‌های روابط علی را فراهم می‌کند و موجب می‌شود مدل در طول شبیه‌سازی به ساختاری پایدار و سازگار با اهداف تعریف شده همگرا شود. در مقایسه با نگاشت شناختی فازی کلاسیک که در آن تنها مقادیر مفاهیم در طول شبیه‌سازی به‌روزرسانی می‌شوند، در رویکرد پیشنهادی وزن‌های روابط علی نیز به‌صورت پویا اصلاح می‌شوند. استفاده از الگوریتم یادگیری NHL این امکان را فراهم می‌سازد که مدل نه تنها بر دانش خبرگان متکی باشد، بلکه بتواند ساختار وزنی خود را در

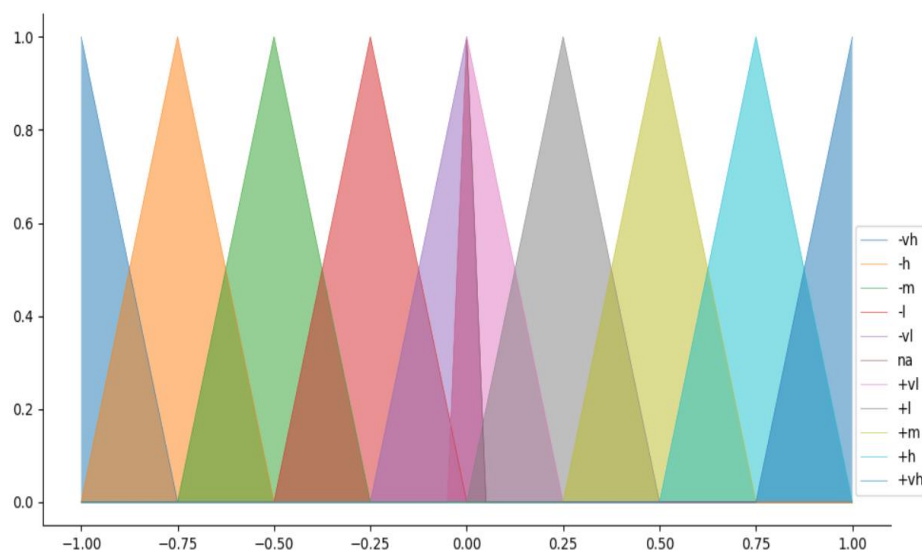
طول فرآیند شبیه‌سازی بهینه‌کند. این ویژگی موجب افزایش پایداری دینامیکی مدل و بهبود قابلیت پیش‌بینی آن می‌شود. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که مدل‌های FCM مبتنی بر یادگیری تطبیقی نسبت به نسخه‌های کلاسیک با وزن‌های ثابت، از نظر پایداری دینامیکی و توان پیش‌بینی عملکرد بهتری دارند. (Papageorgiou & Salmeron, 2022) در ارزیابی اعتبار مدل و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، شواهد چندگانه‌ای مؤید روایی و پایایی مدل هستند. نخست، همگرایی پایدار سیستم در تمامی اجرای شبیه‌سازی نشان می‌دهد که از نظر دینامیکی مدل رفتار باثباتی دارد. دوم، الگوهای مشاهده‌شده در روابط علی و نتایج عملکردی با مبانی نظری پیشین در حوزه‌ی دیجیتال سازی زنجیره تأمین تطابق دارد. سوم، ارزیابی مجدد نتایج توسط خبرگان (جدول ۵) نشان داد که تبیین‌های مدل با تجربیات صنعتی آنان سازگار است و به درک بهتری از روابط میان موانع و الزامات دیجیتال سازی منجر شده است. در نهایت، نتایج تحلیل حساسیت بیانگر پایداری ساختار و مقاومت مدل در برابر تغییرات جزئی وزن‌ها بود. این یافته‌ها به صورت جمعی نشان می‌دهند که مدل ارائه‌شده از اعتبار مفهومی، ساختاری و تجربی مناسبی برخوردار است.

یافته‌ها

پژوهش حاضر در بستر شرکت‌های درگیر در فرایند دیجیتال سازی زنجیره تأمین خود در ایران انجام شده است. جامعه آماری شامل خبرگان و متخصصانی است که در شرکت‌هایی مانند سایپا، ماشین سازی اراک، آلومینیوم ایران، همکاران سیستم، جهان طب گستر مینا و کسب و کار سیکا مشغول به فعالیت بوده‌اند. این افراد دارای تخصص‌هایی در زمینه‌های مدیریت پروژه، تحلیل سیستم، کنترل کیفیت، برنامه‌ریزی استراتژیک و مدیریت محصول دیجیتال بوده و نقش‌های کلیدی در پیشبرد تحول دیجیتال ایفا کرده‌اند. فرآیند انتخاب خبرگان بر اساس سه معیار اصلی انجام شد: (۱) تجربه عملی در پروژه‌های دیجیتال سازی زنجیره تأمین، (۲) جایگاه سازمانی در تصمیم‌گیری‌های راهبردی مرتبط با فناوری‌های نوین و (۳) آشنایی با مفاهیم و ابزارهای صنعت ۴,۰. نمونه‌گیری به صورت هدفمند آغاز شد و با روش گلوله‌برفی توسعه یافت تا تنوع تجربی، سازمانی و تحلیلی در داده‌ها لحاظ گردد. از میان ۱۴ خبره اولیه، نظرات ۶ نفر که دارای سابقه علمی و تجربی برجسته‌تری بودند، برای مدل‌سازی نهایی انتخاب شدند. داده‌های اولیه از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساخت یافته و پرسش‌نامه‌های تخصصی گردآوری شد. این داده‌ها شامل ارزیابی‌های زبانی از شدت روابط علی میان مفاهیم کلیدی بودند که پس از استانداردسازی و تبدیل به مقادیر عددی در بازه $[-1, +1]$ به عنوان ورودی مدل نگاشت شناختی فازی (FCM)

مورد استفاده قرار گرفتند. مفاهیم استخراج شده در سه دسته «موانع»، «قابلیت‌ها» و «نتایج» طبقه‌بندی شده و با نمادهایی مانند C1 تا C30 در ساختار مدل تعریف شدند. در این پژوهش، داده‌های زبانی حاصل از ارزیابی خبرگان با استفاده از توابع عضویت مثلثی فازی به مقادیر عددی در بازه $[-1, +1]$ تبدیل شدند. این توابع، شدت روابط علی میان مفاهیم را در قالب درجاتی از «خیلی ضعیف» تا «خیلی قوی» مدل‌سازی می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است، هر تابع عضویت با رنگی مجزا مشخص شده و همپوشانی آن‌ها امکان تفسیر مقادیر مرزی را فراهم می‌سازد. فرآیند مدل‌سازی در محیط Python و با بهره‌گیری از کتابخانه متن‌باز FCMPy انجام شد. در این مرحله، الگوریتم NHL برای بهینه‌سازی وزن‌های روابط میان مفاهیم به کار گرفته شدند.

شکل ۴. توابع عضویت مثلثی



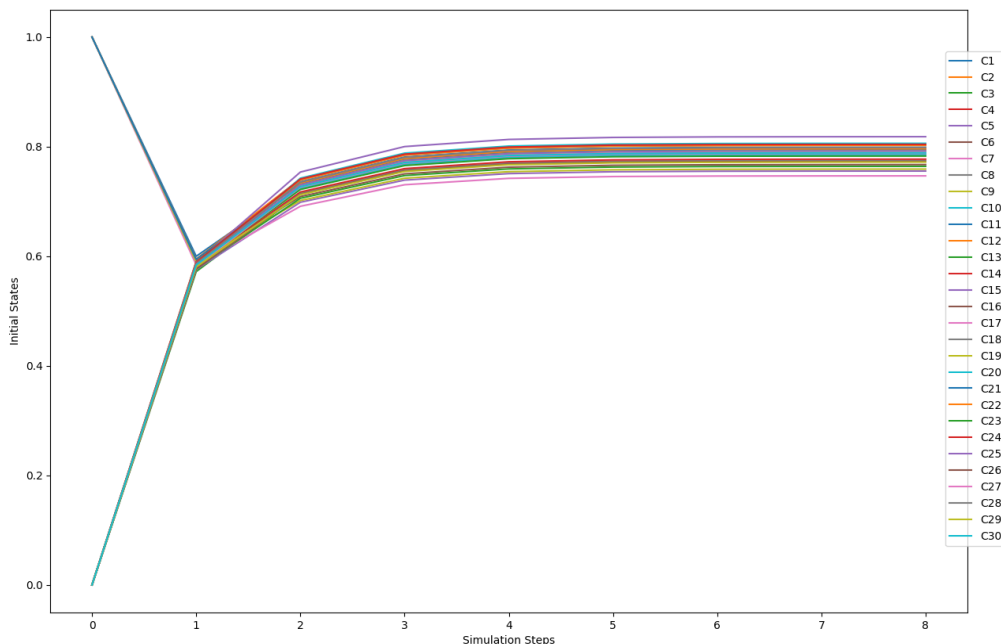
برای محاسبه وزن روابط، از روش استنتاج فازی ممدانی استفاده شد. خروجی حاصل از قواعد فازی با روش تجمیع fMax ادغام گردید و سپس با دِفازی‌سازی مرکز ثقل به مقدار عددی قطعی تبدیل شد. در نهایت، با استفاده از متد build() در کتابخانه FCMPy، ماتریس وزن فازی بین مفاهیم تولید گردید.

شبیه‌سازی رفتار مدل

جهت شبیه‌سازی، شش مفهوم که به عنوان پیش‌نیاز ضروری برای موفقیت فرآیند دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین محسوب می‌شوند، فعال در نظر گرفته شدند تا تأثیرات آن‌ها را روی نتایج بررسی شوند. این مفاهیم

شامل عدم حمایت و آمادگی مدیریت عالی (C1)، ساختار سازمانی نامناسب (C2)، عدم آگاهی کارکنان و ذینفعان در مورد ابزارهای دیجیتال (C6)، زیرساخت ناکافی برای اجرای برنامه‌های آموزش مهارت نیروی کار برای دیجیتال شدن (C7)، عدم وجود فوریت برای دیجیتالی شدن زنجیره تأمین (C9) و فقدان توانمندی و تسهیلات R&D (C11) هستند. این موانع باهم می‌توانند جریان‌های تصمیم‌گیری، تخصیص منابع، پذیرش فناوری و نوآوری را مختل کنند و در نتیجه اجرای مؤثر استراتژی‌های دیجیتالی را به مخاطره اندازند. متد شبیه‌سازی بردار مقادیر اولیه و ماتریس وزن را دریافت کرده و یکی از توابع به‌روزرسانی تعریف‌شده را در طول چند مرحله شبیه‌سازی اعمال می‌کند. در شبیه‌سازی، مقدار اولیه این مفاهیم برابر با ۱ قرار داده شد که نشان‌دهنده فعال بودن کامل آن‌ها در حالت پایه است. این مقداردهی اولیه به این منظور انجام شد که اثر وجود کامل این موانع بر سایر مفاهیم مدل ارزیابی شود و نقش آن‌ها در ساختار علی و نتایج نهایی دیجیتال‌سازی شفاف گردد. سایر مفاهیم مدل در شرایط اولیه، مطابق با داده‌های واقعی و برآوردهای خبرگان مقداردهی شدند.

شکل ۵. مسیر تغییرات مفاهیم مدل در طول مراحل شبیه‌سازی



شکل ۵ روند تغییر مقادیر همه مفاهیم مدل (C1 تا C30) را در طول گام‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد. محور افقی تعداد مراحل شبیه‌سازی و محور عمودی سطح فعال‌سازی هر مفهوم را نمایش می‌دهد. در این

شبیه‌سازی، مقدار اولیه شش مفهوم الزامی برابر با ۱ و سایر مفاهیم مطابق داده‌های اولیه تنظیم شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر مفاهیم پس از چند گام به یک وضعیت پایدار همگرا می‌شوند. این رفتار بیانگر آن است که مدل، تحت ماتریس وزن استخراج شده، به سمت یک حالت تعادلی میل می‌کند که در آن تغییرات مقادیر مفاهیم ناچیز است. اختلافات جزئی در مقادیر نهایی مفاهیم ناشی از تفاوت در روابط علی و شدت اثرات آن‌ها در ماتریس وزن است. در تحلیل دینامیکی مدل، همگرایی سیستم به سمت یک وضعیت پایدار، به عنوان شاخصی از استحکام ساختاری^۱ تلقی می‌شود؛ چراکه در تمامی شبیه‌سازی‌ها، خروجی‌های مدل فاقد رفتارهای نوسانی غیرمنطقی بوده و پایداری خود را در مواجهه با تغییرات ورودی حفظ کرده‌اند. این رفتار مدل، گواهی بر کفایت الگوریتم مورد استفاده در بازنمایی روابط پیچیده سیستم است. علاوه بر این، ارزیابی روایی درونی نتایج، حاکی از انطباق معنادار خروجی‌های شبیه‌سازی با چارچوب‌های نظری موجود است؛ به گونه‌ای که در سناریوهای کلیدی نظیر ارتقای قابلیت اتصال‌پذیری (C20) و توسعه مهارت‌های دیجیتال (C5)، نتایج به دست آمده با مبانی نظری مرتبط با «تاب‌آوری زنجیره تأمین» و «چابکی سازمانی» هم‌راستا بوده و تأثیر مثبت و معنادار این عوامل بر عملکرد دیجیتال را تأیید می‌کند. هم‌سویی میان خروجی‌های کمی مدل و ادبیات موضوع، نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی، ضمن تعدیل اثرات ذهنی قضاوت‌های اولیه خبرگان، بر دقت و عینیت پویایی‌های حاکم بر زنجیره تأمین دیجیتال افزوده است.

ارزیابی تأثیر موانع و الزامات روی نتایج

برای ایجاد نقطه مرجع تحلیلی، یک سناریوی پایه تعریف می‌شود که در آن مقدار تمامی مفاهیم مدل برابر با صفر قرار گرفت. این وضعیت، نمایانگر حالت خنثی سیستم بدون مداخله است و صرفاً الزامات اولیه فعال هستند. سناریوی پایه امکان مقایسه دقیق اثرات مداخلات بعدی را فراهم می‌سازد. در ادامه، به منظور تحلیل حساسیت مدل، ۲۵ سناریوی منفرد طراحی شد که در هر یک، تنها یک مفهوم از سازه‌های موانع و الزامات دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین فعال‌سازی شده و سایر مفاهیم غیرفعال باقی ماندند. خروجی مدل با تعیین مقادیر پنج متغیر هدف عملکردی شامل افزایش انعطاف‌پذیری (C26)، همکاری (C27)، کاهش هزینه (C28)، افزایش رقابت (C29) و پاسخ‌گویی (C30) در هر یک از سناریوها مشخص و مجموع آن‌ها در ستون «جمع» به عنوان شاخص تجمیعی اثرگذاری هر یک از متغیرهای مربوط به سازه

موانع و الزامات گزارش گردید. **جدول ۷** نتایج این سناریوها را نمایش می‌دهد و مبنای رتبه‌بندی مفاهیم بر اساس قدرت تأثیرگذاری آن‌ها بر اهداف عملکردی قرار گرفته است.

جدول ۷. میزان تأثیر هر مفهوم روی متغیرهای عملکردی

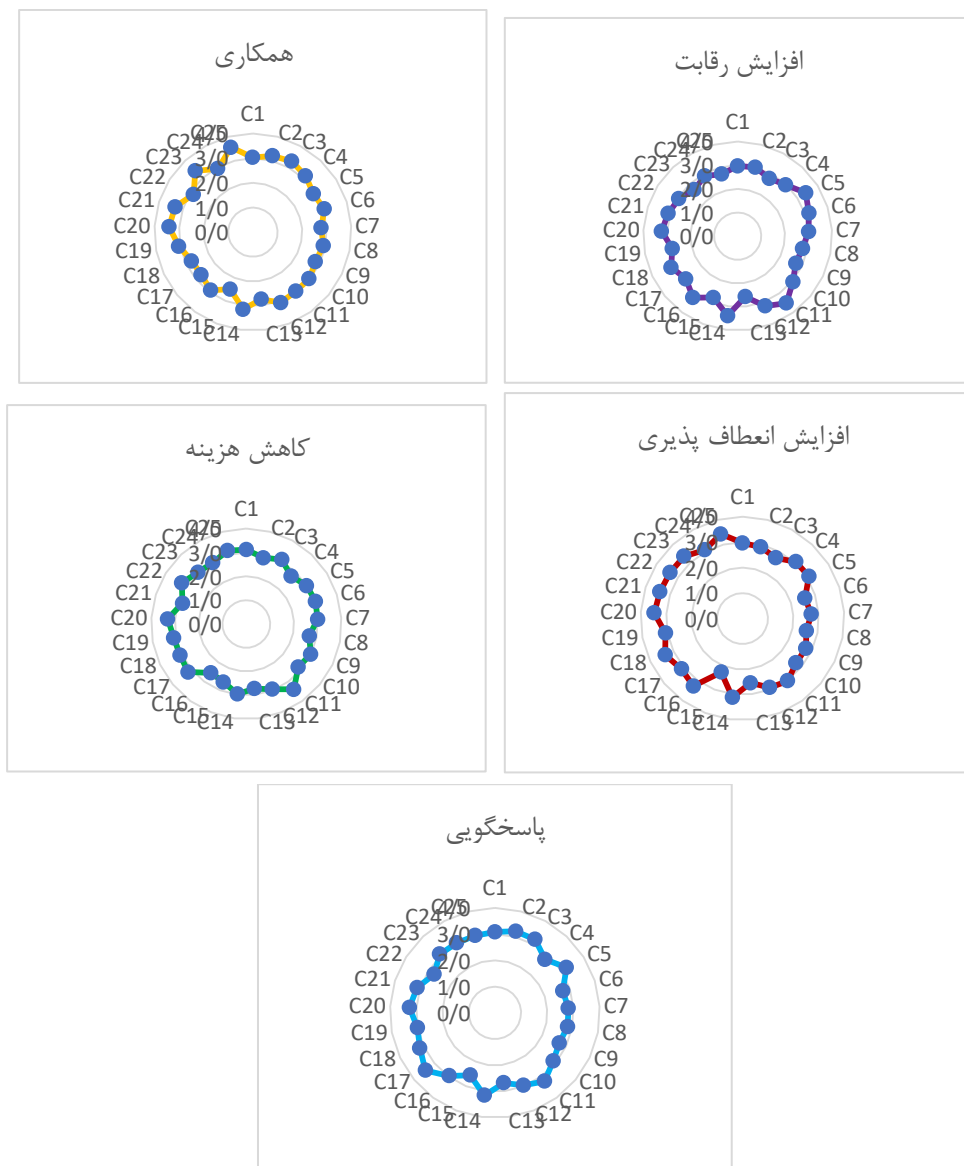
شاخص‌ها	افزایش انعطاف‌پذیری	همکاری	کاهش هزینه	افزایش رقابت	پاسخگویی	جمع
C1	0.0297	0.0303	0.0312	0.0297	0.0309	0.1519
C2	0.0291	0.0320	0.0287	0.0300	0.0321	0.1519
C3	0.0272	0.0328	0.0309	0.0278	0.0319	0.1507
C4	0.0306	0.0313	0.0276	0.0297	0.0280	0.1471
C5	0.0309	0.0291	0.0300	0.0342	0.0323	0.1566
C6	0.0258	0.0305	0.0306	0.0317	0.0272	0.1459
C7	0.0272	0.0279	0.0300	0.0301	0.0281	0.1432
C8	0.0256	0.0291	0.0270	0.0280	0.0283	0.1380
C9	0.0276	0.0282	0.0299	0.0273	0.0272	0.1401
C10	0.0274	0.0297	0.0283	0.0304	0.0289	0.1446
C11	0.0303	0.0297	0.0340	0.0351	0.0323	0.1613
C12	0.0292	0.0308	0.0295	0.0319	0.0297	0.1510
C13	0.0255	0.0275	0.0273	0.0259	0.0269	0.1331
C14	0.0312	0.0316	0.0297	0.0340	0.0317	0.1582
C15	0.0227	0.0249	0.0262	0.0280	0.0255	0.1273
C16	0.0329	0.0292	0.0254	0.0323	0.0297	0.1494
C17	0.0311	0.0272	0.0317	0.0285	0.0344	0.1529
C18	0.0336	0.0275	0.0308	0.0311	0.0316	0.1546
C19	0.0308	0.0306	0.0310	0.0282	0.0301	0.1507
C20	0.0348	0.0341	0.0331	0.0323	0.0326	0.1669
C21	0.0341	0.0332	0.0282	0.0310	0.0312	0.1577
C22	0.0337	0.0286	0.0322	0.0295	0.0274	0.1514
C23	0.0336	0.0342	0.0297	0.0269	0.0307	0.1552
C24	0.0308	0.0294	0.0293	0.0290	0.0304	0.1490
C25	0.0343	0.0356	0.0318	0.0271	0.0304	0.1593

اثرگذاری مفاهیم بر اهداف عملکردی یکنواخت نیست و بر اساس مجموع تأثیرگذاری اختلاف معنادار دارند. قابلیت اتصال‌پذیری (C20) با مقدار ۰٫۱۶۶۹، بالاترین اثر کلی را دارد؛ این مفهوم در همه‌ی اهداف مقادیر نسبتاً بالایی ثبت کرده و خصوصاً در افزایش انعطاف‌پذیری در جایگاه نخست کل جدول قرار می‌گیرد و در کاهش هزینه‌ها و پاسخگویی نیز در بین رتبه‌های برتر است. پس از آن، فقدان توانمندی و تسهیلات R&D (C11)، مقیاس‌پذیری (C25)، عدم دسترسی فناوریانه (C14)، قابلیت پایداری (C21)، توانمندی ناکافی بین کارکنان (C5) و تاب‌آوری در زنجیره تأمین (C23) قرار می‌گیرند.

بر اساس نتایج سناریوهای منفرد، این هفت عامل به عنوان مؤثرترین محرک های مدل شناسایی شدند. این مفاهیم در دست کم یکی از اهداف عملکردی دارای بیشترین یا دومین مقدار اثرگذاری بوده و در سایر اهداف نیز عملکرد بالاتر از میانگین ارائه کرده اند. مجموع تأثیرگذاری این عوامل نیز جایگاه بالای آن ها را در رتبه بندی کلی تأیید می کند. در تحلیل عوامل مؤثر بر شاخص های عملکردی دیجیتال سازی زنجیره تأمین، نتایج نشان می دهد که برخی مؤلفه ها نقش کلیدی در بهبود عملکرد دیجیتال سازی زنجیره تأمین ایفا می کنند. فقدان توانمندی و تسهیلات تحقیق و توسعه (C11) به عنوان محرک اصلی کاهش هزینه (C28) و رقابت پذیری (C29) شناخته می شود و در پاسخ گویی (C30) نیز با در جایگاه سوم قرار دارد؛ این نشان می دهد که سرمایه گذاری در R&D نه تنها نوآوری را تقویت می کند، بلکه به بهره وری و چابکی نیز می افزاید. مقیاس پذیری (C25) با بیشترین تأثیر بر همکاری (C27) و دومین اثرگذاری بر انعطاف پذیری (C26)، نشان می دهد که توانایی افزایش یا کاهش ظرفیت عملیاتی بدون افت کیفیت، بستر تعاملات بین واحدی و پاسخ گویی سریع را فراهم می سازد. عدم دسترسی فناوریانه (C14) نیز با تأثیر قابل توجه بر رقابت پذیری (C29) و جایگاه چهارم در مجموع، اهمیت زیرساخت های فناوریانه را در حفظ مزیت رقابتی برجسته می سازد. قابلیت پایداری (C21) با سومین رتبه در تأثیرگذاری بر انعطاف پذیری (C26)، نقش پشتیبان و تقویت کننده ای برای شاخص های نرم همچون همکاری و انعطاف پذیری ایفا می کند. توانمندی ناکافی کارکنان (C5) نیز با دومین رتبه در تأثیر بر رقابت پذیری (C29) و جایگاه سوم در پاسخ گویی (C30)، اهمیت توسعه مهارت های دیجیتال در منابع انسانی را یادآور می شود. در نهایت، تاب آوری زنجیره تأمین (C23) با دومین رتبه در تأثیر بر همکاری (C27)، نشان می دهد که توانایی بازیابی سریع از اختلالات، پیوندهای بین بخشی را تقویت کرده و انسجام عملکردی را افزایش می دهد. از منظر مدیریتی، این یافته ها بر ضرورت سرمایه گذاری همزمان در زیرساخت های فناوریانه، توسعه منابع انسانی و تقویت ظرفیت های سازمانی همچون R&D و تاب آوری تأکید دارند تا بتوان به بهبود پایدار در شاخص های کلیدی عملکردی دیجیتال سازی دست یافت. در مقابل عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد دیجیتال سازی زنجیره تأمین، برخی مفاهیم با اثرگذاری پایین تر در خروجی های مدل ظاهر شده اند. به طور مشخص، مفهوم بی ثباتی سیاسی-فقدان چشم انداز (C15) با مقدار ۰,۱۲۷۳ و پس از آن نبود سیاست و فقدان قوانین، حمایت دولتی (C13) با مقدار ۰,۱۳۳۱، کمترین تأثیر را در دستیابی به اهداف عملکردی از جمله انعطاف پذیری، همکاری، کاهش هزینه، رقابت پذیری و

پاسخ‌گویی داشته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که این دو عامل فاقد نقش تعیین‌کننده در بهبود شاخص‌های عملکردی هستند و در مقایسه با سایر مؤلفه‌ها، سهم محدودی در ارتقاء عملکرد دیجیتال ایفا می‌کنند. از منظر سیاست‌گذاری، این یافته‌ها حاکی از آن است که این دو مؤلفه باید در اولویت پایین‌تری قرار گیرند و منابع سازمانی به‌جای تمرکز بر این عوامل، به سمت مؤلفه‌هایی هدایت شوند که اثربخشی بالاتری در تحقق اهداف تحول دیجیتال دارند. این رویکرد موجب تخصیص بهینه منابع و تسریع در دستیابی به مزایای رقابتی خواهد شد. تحلیل نتایج سناریوهای منفرد و نمودارهای رادار نشان می‌دهد که مفاهیم قابلیت اتصال‌پذیری (C20)، فقدان توانمندی و تسهیلات R&D (C11)، مقیاس‌پذیری (C25)، عدم دسترسی فناورانه (C14)، قابلیت پایداری (C21)، توانمندی ناکافی بین کارکنان (C5) و تاب‌آوری در زنجیره تأمین (C23) به‌عنوان الزامات کلیدی مدل شناسایی می‌شوند. این مفاهیم نه تنها در مجموع تأثیرگذاری در رتبه‌های برتر قرار دارند، بلکه در اهداف عملکردی مختلف نیز نقش پیشرو ایفا کرده‌اند. به‌ویژه، C20 در انعطاف‌پذیری و همکاری و C11 در کاهش هزینه و رقابت‌پذیری بیشترین اثر را داشته‌اند. مفاهیم C25 و C14 نیز به‌عنوان مکمل‌های کلیدی در همکاری و رقابت‌پذیری برجسته‌اند. در مقابل، مفاهیمی مانند C13 و C15 کمترین اثرگذاری را در اهداف مدل داشته‌اند و در اولویت‌های پایین‌تری برای سیاست‌گذاری قرار می‌گیرند. شکل ۶ با نمایش الگوهای راداری، این تفاوت‌ها را به‌صورت بصری تأیید می‌کند و تمرکز اثرگذاری مفاهیم منتخب را در اهداف مختلف به‌خوبی نشان می‌دهد. این یافته‌ها چارچوبی عملی برای تمرکز منابع مدیریتی فراهم می‌سازند و از انتخاب هدفمند مؤلفه‌ها در جهت حل آن‌ها پشتیبانی می‌کنند.

شکل ۶. تأثیر مؤلفه‌های مربوط به موانع و الزامات بر روی ۵ متغیر عملکردی



تحلیل سناریو

در راستای تحلیل ساختاری مدل و ارزیابی اثرات مداخلات هدفمند، پنج سناریوی مداخله‌ای براساس نظر خبرگان طراحی شد که هر یک بر مجموعه‌ای از مفاهیم کلیدی تمرکز دارند. این سناریوها با فعال سازی ترکیبی از الزامات پایه و متغیرهای منتخب، مسیرهای مختلفی برای بهبود عملکرد سازمانی پیشنهاد می‌دهند که شامل:

سناریو ۱: توانمندسازی تصمیم‌گیری و هم‌راستایی سازمانی

ترکیب الزامات پایه با مفاهیم C3 (ارزیابی عملکرد نامناسب)، C4 (عدم درک محیط کسب‌وکار) و C5 (توانمندی ناکافی کارکنان)، بستری برای ارتقای تصمیم‌گیری، هم‌راستایی با شرایط بازار و اجرای مؤثر تغییرات فراهم می‌سازد.

سناریو ۲: رفع موانع سیاستی و زیرساختی تحول دیجیتال

فعال‌سازی مفاهیم C13 (نبود سیاست‌های حمایتی)، C14 (عدم دسترسی فناوریانه) و C16 (فقدان مشوق‌های مالی) به شناسایی و رفع موانع اصلی در مسیر پیاده‌سازی فناوری‌های نوین و تسریع تحول سازمانی کمک می‌کند.

سناریو ۳: توسعه مهارت‌های دیجیتال و امنیت سازمانی

مفاهیم C5 (توانمندی ناکافی)، C8 (نگرانی امنیتی) و C12 (تمرکز ناکافی بر دیجیتالی‌شدن) بر افزایش مهارت، انگیزه و امنیت محیط کاری تمرکز دارند و آمادگی سازمان برای تغییر را تقویت می‌کنند.

سناریو ۴: شفاف‌سازی و تاب‌آوری زنجیره تأمین

با فعال‌سازی C15 (بی‌ثباتی سیاسی)، C17 (قابلیت ردیابی) و C20 (اتصال‌پذیری)، این سناریو بر بهبود شفافیت، همکاری و کاهش هزینه‌ها در زنجیره تأمین متمرکز است.

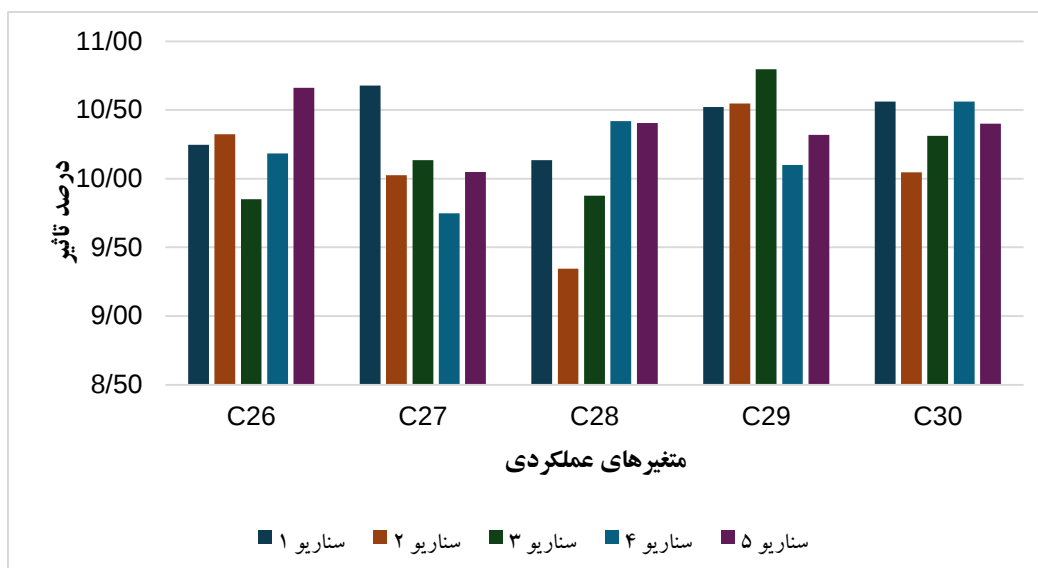
سناریو ۵: چابکی سازمانی در پاسخ‌گویی به نیازهای مشتری

مفاهیم C10 (فقدان استراتژی نوآوری)، C18 (انعطاف‌پذیری) و C19 (مشارکت بهینه) سازمان را قادر می‌سازند تا با سرعت و دقت بیشتری به نیازهای مشتری پاسخ دهد و تجربه مشتری را ارتقا بخشد. برای بررسی نتایج عملکردی در هر یک از سناریوها، مقدار مؤلفه‌های مربوط به هر سناریو برابر با یک و سایر مؤلفه‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نگاشت شناختی فازی، تغییرات در پنج شاخص عملکردی شامل «افزایش انعطاف‌پذیری (C26)»، «همکاری (C27)»، «کاهش هزینه (C28)»، «افزایش رقابت (C29)» و «پاسخگویی (C30)» بررسی شد. مقایسه نتایج نشان

می‌دهد که هر سناریو اثرگذاری متفاوتی بر این خروجی‌ها دارد. نتایج در شکل ۷ و جدول ۸ نشان داده شده است. تحلیل نتایج پنج سناریوی طراحی شده بر اساس فعال سازی مفاهیم کلیدی نشان می‌دهد که هر سناریو تأثیر متفاوتی بر شاخص‌های عملکردی دیجیتالی سازی زنجیره تأمین دارد. سناریو ۵ با تمرکز بر چابکی سازمانی و پاسخ‌گویی به نیازهای مشتری، بالاترین مقدار در شاخص انعطاف‌پذیری (C26) و پاسخ‌گویی (C30) را به خود اختصاص داده و در کاهش هزینه (C28) نیز عملکرد مطلوبی داشته است؛ این نشان‌دهنده توان بالای این سناریو در ارتقاء تجربه مشتری و واکنش سریع به تغییرات بازار است. سناریو ۳ که بر توسعه مهارت‌های دیجیتال و امنیت سازمانی تمرکز دارد، بیشترین اثر را بر رقابت‌پذیری (C29) داشته و در پاسخ‌گویی (C30) نیز جایگاه دوم را کسب کرده است؛ این امر اهمیت سرمایه‌گذاری در منابع انسانی و امنیت اطلاعات را در ارتقاء مزیت رقابتی سازمان تأیید می‌کند.

سناریو ۱ باهدف توانمندسازی تصمیم‌گیری و هم‌راستایی سازمانی، در شاخص همکاری (C27) و پاسخ‌گویی (C30) عملکرد برتری داشته و در انعطاف‌پذیری و رقابت‌پذیری نیز مقادیر قابل‌قبولی ثبت کرده است؛ این نشان می‌دهد که بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری و شناخت محیط کسب‌وکار می‌تواند تعاملات داخلی و واکنش‌پذیری سازمان را تقویت کند. سناریو ۴ که بر شفاف سازی و تاب‌آوری زنجیره تأمین متمرکز است، در کاهش هزینه (C28) و پاسخ‌گویی (C30) عملکرد خوبی داشته و نقش مؤثری در بهینه‌سازی منابع و افزایش شفافیت ایفا کرده است. در مقابل، سناریو ۲ با تمرکز بر رفع موانع سیاستی و زیرساختی، کمترین اثرگذاری را در شاخص‌های عملکردی داشته و در کاهش هزینه (C28) و همکاری (C27) پایین‌ترین مقادیر را ثبت کرده است؛ این نشان می‌دهد که اگرچه رفع موانع سیاستی ضروری است، اما به تنهایی نمی‌تواند بهبود چشمگیری در عملکرد دیجیتال ایجاد کند و نیازمند ترکیب با سایر مؤلفه‌های سازمانی و فناورانه است.

شکل ۷. تغییرات وضعیت نتایج عملکردی در هر سناریو



جدول ۸. نتایج عملکردی تحت هر سناریو

سناریو ۵	سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲	سناریو ۱	نتایج
0.083	0.079	0.077	0.080	0.080	افزایش انعطاف پذیری (C26)
0.079	0.077	0.080	0.079	0.084	همکاری (C27)
0.081	0.082	0.077	0.073	0.079	کاهش هزینه (C28)
0.081	0.079	0.085	0.083	0.083	افزایش رقابت (C29)
0.082	0.083	0.081	0.079	0.083	پاسخگویی (C30)

بینش‌های مدیریتی

تحلیل مقادیر شاخص‌های عملکردی در پنج سناریوی طراحی شده، بینش‌های مدیریتی مهمی را برای هدایت تحول دیجیتال در زنجیره تأمین ارائه می‌دهد. سناریو پنجم با تمرکز بر چابکی سازمانی و پاسخ‌گویی به نیازهای مشتری، بالاترین مقدار در شاخص انعطاف‌پذیری با عدد ۰،۰۸۳ و عملکرد مطلوب در کاهش هزینه با عدد ۰،۰۸۱ و پاسخ‌گویی با عدد ۰،۰۸۲ را ثبت کرده و نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در نوآوری، مشارکت و انعطاف عملیاتی می‌تواند تجربه مشتری و سرعت واکنش سازمان را به‌طور چشمگیری ارتقا دهد. سناریو سوم که بر توسعه مهارت‌های دیجیتال و امنیت سازمانی متمرکز است، بیشترین رقابت‌پذیری را با عدد ۰،۰۸۵ به همراه دارد و در پاسخ‌گویی نیز با عدد ۰،۰۸۱ عملکرد قابل توجهی دارد؛ این امر اهمیت توانمندسازی منابع انسانی و ایجاد محیط امن

برای پذیرش فناوری را برجسته می سازد. سناریو اول باهدف توانمندسازی تصمیم گیری و هم راستایی سازمانی، در همکاری با عدد ۰۰۰۸۴ و پاسخ گویی با عدد ۰۰۰۸۳ پیشتاز است و نشان می دهد که اصلاح فرآیندهای مدیریتی و شناخت محیط کسب و کار، تعاملات داخلی و چابکی سازمان را تقویت می کند. سناریو چهارم با تمرکز بر شفاف سازی و تاب آوری زنجیره تأمین، در کاهش هزینه با عدد ۰۰۰۸۲ و پاسخ گویی با عدد ۰۰۰۸۳ عملکرد خوبی دارد و نقش مؤثری در بهینه سازی منابع و افزایش شفافیت ایفا می کند. در مقابل، سناریو دوم با محوریت رفع موانع سیاستی و زیرساختی، کمترین اثرگذاری را در شاخص های عملکردی داشته و در کاهش هزینه با عدد ۰۰۰۷۳ و همکاری با عدد ۰۰۰۷۹ پایین ترین مقادیر را ثبت کرده است؛ این نشان می دهد که اقدامات سیاستی به تنهایی کافی نیستند و باید با مؤلفه های عملیاتی و سازمانی ترکیب شوند. این یافته ها به مدیران کمک می کند تا در اولویت بندی اقدامات تحول دیجیتال، بر سناریوهایی تمرکز کنند که بیشترین بازدهی را در شاخص های کلیدی عملکردی دارند.

بحث و نتیجه گیری

پژوهش حاضر باهدف مدل سازی روابط میان موانع، الزامات و نتایج عملکردی دیجیتالی سازی زنجیره تأمین، از چارچوب نگاشت شناختی فازی بهره می گیرد و نشان می دهد که این رویکرد، ابزاری توانمند برای تحلیل سیستم های پیچیده، چندمتغیره و غیرخطی است. از الگوریتم NHL در نگاشت شناختی فازی استفاده شد؛ چراکه تعادل مناسبی میان دقت، پایداری و قابلیت تعمیم پذیری ارائه می دهد. از منظر نظری، این پژوهش نشان داد که نگاشت شناختی فازی می تواند جایگزینی مناسب برای رویکردهای خطی در تحلیل روابط علی باشد و امکان بررسی اثرات پویا را فراهم آورد. از منظر کاربردی، در مرحله تحلیل سناریوها، ابتدا ۲۵ سناریوی منفرد طراحی شد که در آن ها اثر هر مؤلفه از موانع و الزامات دیجیتالی سازی به صورت مستقل بر نتایج عملکردی بررسی گردید. نتایج تحلیل سناریوها و شاخص های عملکردی نشان می دهد که موفقیت در دیجیتالی سازی زنجیره تأمین نیازمند تمرکز بر مجموعه ای از عوامل کلیدی است که بیشترین تأثیر را بر عملکرد زنجیره تأمین دارند. مفاهیمی مانند قابلیت اتصال پذیری (C20)، فقدان توانمندی و تسهیلات (C11) R&D، مقیاس پذیری (C25)، عدم دسترسی فناورانه (C14)، قابلیت پایداری (C21)، توانمندی ناکافی بین کارکنان (C5) و تاب آوری در زنجیره تأمین (C23) به عنوان الزامات مؤثر شناسایی شدند که در

سناریوهای مختلف موجب ارتقاء انعطاف پذیری، همکاری، کاهش هزینه، رقابت پذیری و پاسخ گویی شده‌اند. در ادامه، پنج سناریو بر اساس همین مؤلفه‌ها طراحی و ارزیابی شد. نتایج حاصل از تحلیل سناریوهای طراحی شده نشان می‌دهد که تأثیرگذاری هر سناریو بر شاخص‌های عملکردی دیجیتال سازی زنجیره تأمین متفاوت است و این تفاوت‌ها می‌تواند راهنمایی مؤثر برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی باشد. سناریوهایی که بر چابکی سازمانی، توسعه مهارت‌های دیجیتال، امنیت اطلاعات و بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری تمرکز دارند، بیشترین اثربخشی را در ارتقای انعطاف پذیری، رقابت پذیری، همکاری و پاسخ گویی سازمانی نشان داده‌اند. در مقابل، سناریوهایی که صرفاً بر رفع موانع سیاستی و زیرساختی تمرکز دارند، اثرگذاری محدودی بر شاخص‌های عملکردی داشته‌اند و نشان می‌دهند که تحول دیجیتال نیازمند رویکردی چندبعدی و تلفیقی است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که مدیران باید در اولویت‌بندی اقدامات تحول دیجیتال، بر سناریوهایی تمرکز کنند که هم‌افزایی میان راهبردهای فناورانه، منابع انسانی و مدیریتی را فراهم می‌سازند تا دستیابی به اهداف کلیدی با اثربخشی بیشتری محقق شود. درنهایت، توسعه ابزارهای تصمیم‌یار مبتنی بر نگاشت شناختی فازی و الگوریتم‌های یادگیری هوشمند، می‌تواند به مدیران در ارزیابی سناریوهای مداخله‌ای و انتخاب مسیرهای بهینه تحول دیجیتال یاری رساند.

باوجود تلاش برای طراحی دقیق چارچوب مفهومی و اجرای نظام‌مند مراحل پژوهش، نتایج این مطالعه در پرتو برخی محدودیت‌ها قابل تفسیر است. نخست آنکه بخشی از داده‌های مورد استفاده در مرحله مدل‌سازی بر پایه قضاوت‌های خبرگان و برداشت‌های تخصصی آنان از روابط علی میان متغیرها شکل گرفته است. هرچند برای کاهش سوگیری‌های احتمالی ناشی از این قضاوت‌ها، از الگوریتم یادگیری غیرخطی هب برای تنظیم و بهینه‌سازی وزن روابط در نگاشت شناختی فازی استفاده شده است، بااین حال وابستگی اولیه مدل به ارزیابی‌های ذهنی خبرگان می‌تواند تا حدی بر نتایج اثرگذار باشد. از سوی دیگر، داده‌های تجربی پژوهش در بستر شرکت‌های صنعتی ایران گردآوری شده است؛ بنابراین تعمیم نتایج به سایر صنایع، کشورها یا محیط‌های اقتصادی متفاوت باید با احتیاط صورت گیرد. تفاوت در ساختارهای نهادی، سطح بلوغ دیجیتال سازمان‌ها و شرایط محیطی می‌تواند بر نحوه تعامل متغیرهای موردبررسی و شدت روابط میان آن‌ها تأثیر بگذارد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با بهره‌گیری از داده‌های تجربی گسترده‌تر، بررسی صنایع

تحلیل موانع، الزامات و نتایج دیجیتال‌سازی زنجیره تأمین به کمک رویکرد...؛ حقیقت و همکاران | ۸۱

و زمینه‌های جغرافیایی متنوع‌تر و همچنین ترکیب رویکرد نگاشت شناختی فازی با سایر روش‌های داده‌محور و مدل‌های تحلیلی پیشرفته، به توسعه و اعتبارسنجی بیشتر مدل پیشنهادی پردازند. چنین رویکردی می‌تواند به افزایش قابلیت تعمیم نتایج و ارتقای دقت تحلیلی در مطالعات آتی کمک کند.

تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

ORCID

Mahdiyeh Haghighat		http://orcid.org/0009-0009-9824-0902
Mojtaba Farrokh		http://orcid.org/0000-0003-1390-3105
Omid Mahdi Ebadati		http://orcid.org/0000-0002-2688-9595

منابع

۱. هدایتی، زینال‌نژاد و سمیع‌اله. (۲۰۲۴). شناسایی و رتبه‌بندی موانع استفاده از فناوری بلاک‌چین در زنجیره تأمین پایدار صنایع غذایی. *مدیریت زنجیره تأمین*، ۲۶(۸۲)، ۱۷-۴۲.

References

2. Ammar, S. B., Mosbahi, H., & Aissaoui, T. (2024). Smart supply chain: A lever for strategic excellence. In *2024 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)* (pp. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCAD61701.2024>
3. Alhalalmeh, M. (2022). The impact of supply chain 4.0 technologies on its strategic outcomes. *Uncertain Supply Chain Management*, 10(4), 1203–1210. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2022.8.003>
4. Al Tera, A., Alzubi, A., & Iyiola, K. (2023). Supply chain digitalization and performance: A moderated mediation of supply chain visibility and supply chain survivability. *Heliyon*, 10(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25234>
5. Annosi, M. C., Brunetta, F., Bimbo, F., & Kostoula, M. (2021). Digitalization within food supply chains to prevent food waste: Drivers, barriers and collaboration practices. *Industrial Marketing Management*, 93, 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.12.008>
6. Ada, E., Sagnak, M., Uzel, R. A., & Balcioğlu, İ. (2022). Analysis of barriers to circularity for agricultural cooperatives in the digitalization era. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 71(3), 932–951. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2020-0312>
7. Brandtner, P. (2024). Digital transformation of supply chain management: Challenges and strategies for successfully implementing data analytics in practice. In *Proceedings of the 2024 8th International Conference on E-Commerce, E-Business, and E-Government* (pp. 36–42). <https://doi.org/10.1145/3663058.3663070>
8. Brown, P., Lloyd, C., & Souto-Otero, M. (2018). The prospects for skills and employment in an age of digital disruption: A cautionary note. *SKOPE Research Paper*, 127.
9. Chen, Y., Li, J., & Zhang, J. (2024). Digitalisation, data-driven dynamic capabilities and responsible innovation: An empirical study of SMEs in China. *Asia Pacific Journal of Management*, 41(3), 1211–1251. <https://doi.org/10.1007/s10490-023-09870-2>
10. Dadsena, K. K., Pant, P., Paul, S. K., & Pratap, S. (2024). Overcoming strategies for supply chain digitization barriers: Implications for sustainable development goals. *Business Strategy and the Environment*, 33(5), 3887–3910. <https://doi.org/10.1002/bse.3658>
11. Dutta, G., Kumar, R., Sindhvani, R., & Singh, R. K. (2021). Digitalization priorities of quality control processes for SMEs. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(6), 1679–1698. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01620-9>

12. Frederico, G. F., Kumar, V., Garza-Reyes, J. A., Kumar, A., & Agrawal, R. (2023). Impact of Industry 4.0 technologies on supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management*, 34(4), 1020–1049. <https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2022-0030>
13. Chilicaus, G. C., Licapa-Redolfo, G. S., Arbulú Ballesteros, M. A., et al. (2024). Digital transformation and sustainability in post-pandemic supply chains. *Sustainability*, 17(7), 3009. <https://doi.org/10.3390/su17073009>
14. Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Vilkas, M., Grybauskas, A., & Amran, A. (2022). Drivers and barriers of Industry 4.0 technology adoption among SMEs. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(6), 1029–1058. <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2020-0498>
15. Gupta, H., Yadav, A. K., Kusi-Sarpong, S., Khan, S. A., & Sharma, S. C. (2022). Strategies to overcome barriers to innovative digitalisation technologies. *Technology in Society*, 69, 101970. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101970>
16. Ghadge, A., Kara, M. E., Moradlou, H., & Goswami, M. (2020). The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(4), 669–686. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2019-0368>
17. Gkrimpizi, T., Peristeras, V., & Magnisalis, I. (2023). Classification of barriers to digital transformation in higher education institutions. *Education Sciences*, 13(7), 746. <https://doi.org/10.3390/educsci13070746>
18. Habibi, A., Sofyan, S., & Mukminin, A. (2023). Factors affecting digital technology access in vocational education. *Scientific Reports*, 13, 5682. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32645-1>
19. Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model. *Annals of Operations Research*, 319(1), 1411–1431. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03640-7>
20. Jankovic-Zugic, A., Medic, N., Pavlovic, M., Todorovic, T., & Rakic, S. (2023). Servitization 4.0 as a trigger for sustainable business. *Sustainability*, 15(3), 2217. <https://doi.org/10.3390/su15032217>
21. Khan, S. A., Ahmad, Z., Sheikh, A. A., & Yu, Z. (2022). Digital transformation and eco-innovation toward sustainable supply chains. *Science Progress*, 105(4). <https://doi.org/10.1177/00368504221145648>
22. Khanan, A., Abdullah, S., Mohamed, A. H. H., Mehmood, A., & Ariffin, K. A. Z. (2019). Big data security and privacy concerns: A review. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01659-3_7
23. Kumar Dadsena, K., & Pant, P. (2023). Analyzing the barriers in supply chain digitization. *Operations Management Research*, 16(4), 1684–1697. <https://doi.org/10.1007/s12063-022-00303-3>
24. Kohli, A., & Malik, O. P. (2025). Digital transformation in SMEs: A literature review. *Journal of Data, Information and Management*. <https://doi.org/10.1007/s42488-025-00145-6>

25. Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 24(1), 65–75. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(86\)80040-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(86)80040-2)
26. Kosko, B. (1993). Adaptive inference in fuzzy knowledge networks. In *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-55860-539-8.50052-1>
27. Linzalone, R., Schiuma, G., & Ammirato, S. (2020). Connecting universities with entrepreneurship through digital learning platforms. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 26(7), 1525–1545. <https://doi.org/10.1108/IJEBr-07-2019-0452>
28. Li, L., Tong, Y., Wei, L., & Yang, S. (2022). Digital technology-enabled dynamic capabilities. *Information & Management*, 59(8), 103689. <https://doi.org/10.1016/j.im.2022.103689>
29. Mir-Ashrafi, M., & Nematizadeh, S. (2021). Assessing Iran's customs in terms of Industry 4.0 components. *Political Organizing of Space*, 3(4), 232–243.
30. Martin, N. (2025). Interval-valued plithogenic cognitive maps for sustainable supply chain strategy selection. *International Journal of Research in Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.22105/riej.2025.227663>
31. Muzamil, A. Z. A., Pyeman, J., Mutalib, S., et al. (2025). Enabling retail food supply chain viability and resilience by digitalization. *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management*, 7(2), 175–203.
32. Marion, T. J., & Fixson, S. K. (2021). The transformation of the innovation process. *Journal of Product Innovation Management*, 38(1), 192–215. <https://doi.org/10.1111/jpim.12547>
33. Mpelogianni, A. S., Kokkinos, K., Papageorgiou, E. I., & Polap, D. (2022). FCMpy: A Python module for constructing fuzzy cognitive maps. *PeerJ Computer Science*, 8, e1078. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1078>
34. Netshakhuma, N. S. (2021). Volunteerism and digitisation projects. *Collection and Curation*, 40(1), 15–23. <https://doi.org/10.1108/CC-09-2020-0027>
35. Ning, L., & Yao, D. (2023). The impact of digital transformation on supply chain capabilities. *Sustainability*, 15(13), 10107. <https://doi.org/10.3390/su151310107>
36. Oubrahim, I., & Sefiani, N. (2023). Drivers and barriers to digital transformation adoption. *Acta Logistica*, 10(2). <https://doi.org/10.22306/al.v10i2.365>
37. Piprani, A. Z., Nazir, S., Najmi, A., Watabe, M., & Jaafar, N. I. (2025). Digital capabilities and supply chain resilience. *Business Strategy & Development*. <https://doi.org/10.1002/bsd2.70148>
38. Papageorgiou, E. I., & Salmeron, J. L. (2022). A review of fuzzy cognitive maps research. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2021.3061079>
39. Papageorgiou, E. I., Stylios, C., & Groumpos, P. P. (2006). Unsupervised learning techniques for fuzzy cognitive maps. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64(8), 727–743. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2006.02.004>

40. Roy, V. (2021). Contrasting supply chain traceability and visibility. *The International Journal of Logistics Management*, 32(3), 942–972. <https://doi.org/10.1108/IJLM-05-2020-0210>
- Rane, S. B., Abhyankar, G. J., Kirkire, M. S., & Agrawal, R. (2025). Modeling barriers to adoption of digitization in supply chains. *Benchmarking: An International Journal*, 32(1), 332–368. <https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2023-0514>
41. Rakgoale, T. I., Bag, S., & Pretorius, J. H. C. (2024). Barriers to digitalization implementation in South Africa. *Global Business Review*. <https://doi.org/10.1177/09721509241246253>
42. Sezer, İ. C. (2020). The impact of Industry 4.0 on logistics human resources (Master's thesis). İzmir University of Economics.
43. Sarmiento, I., Cockcroft, A., Dion, A., et al. (2024). Fuzzy cognitive mapping in participatory research. *Archives of Public Health*, 82(1), 76. <https://doi.org/10.1186/s13690-024-01256-7>
44. Silva, J., Matos de Oliveira, A., Veríssimo de Oliveira, J., & Bouzon, M. (2025). Barriers to digital transformation in fruit and vegetable supply chains. *OPSEARCH*, 62(1), 460–482. <https://doi.org/10.1007/s12597-024-00749-2>
45. Subramanian, J., Karmegam, A., Papageorgiou, E., Papandrianos, N., & Vasukie, A. (2015). Breast cancer risk assessment model based on FCM. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 118(3), 280–297. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2014.12.001>
46. Surucu-Balci, E., Iris, Ç., & Balci, G. (2024). Digital information in maritime supply chains with blockchain. *Technological Forecasting and Social Change*, 198, 122978. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122978>
47. Salamah, E., Alzubi, A., & Yinal, A. (2023). Impact of digitalization on supply chain performance. *Sustainability*, 16(1), 304. <https://doi.org/10.3390/su16010304>
48. Stach, W., et al. (2021). Learning fuzzy cognitive maps with optimization techniques. *Expert Systems with Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113483>
49. Tsadiras, A. K. (2008). Comparing inference capabilities of fuzzy cognitive maps. *Information Sciences*, 178(20), 3880–3894. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.06.015>
50. Tsvuura, G., & Ngulube, P. (2021). Digitisation of records and archives in Zimbabwe universities. *South African Journal of Information Management*, 23(1). <https://doi.org/10.4102/sajim.v23i1.1240>
51. Viegas, C. V., Bond, A., Vaz, C. R., & Bertolo, R. J. (2019). Reverse flows within the pharmaceutical supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117719. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117719>
52. Wang, S., & Li, J. (2024). Carbon emission trading and supply chain digitization. *Journal of Cleaner Production*, 452, 142164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142164>
53. Wang, L., Deng, T., Shen, Z. J. M., Hu, H., & Qi, Y. (2022). Digital twin-driven smart supply chain. *Frontiers of Engineering Management*, 9(1), 56–70. <https://doi.org/10.1007/s42524-021-0175-3>

54. Yang, M., Fu, M., & Zhang, Z. (2021). The adoption of digital technologies in supply chains. *Technological Forecasting and Social Change*, 169, 120795. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120795>
55. Zhao, N., Hong, J., & Lau, K. H. (2023). Impact of supply chain digitalization on supply chain resilience. *International Journal of Production Economics*, 259, 108817. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108817>
56. Zhu, J., Baker, J. S., Song, Z., Yue, X. G., & Li, W. (2023). Government regulatory policies for digital transformation in SMEs. *Humanities and Social Sciences Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-023-01762-1>

References [In Persian]

1. Hedayati, Z., Zinalnejad, S., & Samieeallah, S. (2024). Identification and ranking of barriers to the use of blockchain technology in the sustainable food supply chain. *Journal of Supply Chain Management*, 26(82), 17–42. (In Persian).

استناد به این مقاله: حقیقت، مهدیه،، فرخ، مجتبی،، عبادتی، امید مهدی. (۱۴۰۵). تحلیل موانع، الزامات و نتایج دیجیتال سازی زنجیره تأمین به کمک رویکرد نگاشت شناختی فازی مبتنی بر الگوریتم هب غیرخطی، مدیریت صنعتی، ۲۴(۸۰)، ۴۳-۸۶. DOI: 10.22054/jims.2026.89550.3004



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.