

Designing an Autonomous Supply Chain Framework based on Artificial Intelligence, Big Data, and Internet of Things in the Oil and Gas Industry with a Sustainability and Cybersecurity Approach

Amir Ehsan Zahedi*

Assistant Professor. Management department. Administration sciences and economy faculty. Arak university. Arak. Iran.

Mehran Esmaeili

Master of Business Administration student, Management department, Faculty of Humanities, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Iran.

Abstract

The oil and gas industry faces challenges such as complexity of a multi-layered and global supply network, operational and geopolitical risks, cybersecurity threats in critical infrastructure, sustainability pressures, and need for real-time data-driven decision-making. The main objective of the study is to design and analyze an autonomous supply chain framework based on artificial intelligence, big data and Internet of Things in the oil and gas industry with an emphasis on sustainability and cybersecurity. The research is applied and developmental in terms of its purpose; qualitative-quantitative in terms of the nature of the data; and descriptive in terms of the data collection method, which conducted using the Fuzzy Cognitive Mapping method. The study period is summer and fall ۲۰۲۰ and winter ۲۰۲۱. The population of the study is Iranian oil and gas industry experts, which completed by ۲۳ experts using a structured questionnaire using purposive sampling. Achieving autonomy in the oil and gas supply chain is contingent upon the synergy and application of advanced digital technologies. Within this context, operational intelligence serves as a crucial mediating factor, transforming technological capabilities into economic and environmental value. In other words, the

* Corresponding Author: a-zahedimoghadam@araku.ac.ir
How to Cite: xxxxxxxx

establishment of data-driven digital infrastructure is the primary prerequisite for attaining sustainability, while resilience and trust within this ecosystem can only be realized through robust cybersecurity. The proposed model, functioning as a decision support system, empowers managers in this industry to optimally prioritize digital investments, evaluate the implications of security policies, and simulate various digital transformation scenarios prior to operationalization.

Introduction

As one of the most strategic industries in the world, the oil and gas industry is highly dependent on the effective performance of its supply chain. It has a multi-layered, extensive and interconnected chain that ranges from the provision of specialized equipment and raw materials to extraction, refining, transmission and distribution operations. The capital-intensive nature, geographical dispersion of assets, dependence on critical infrastructure, sensitivity to geopolitical fluctuations and the requirement for operational continuity have presented the oil and gas industry with significant management complexities. In addition, disruptions caused by geopolitical crises, fluctuations in the global energy market, environmental constraints and rapid technological changes have made the need to redesign the industry's supply chain architecture more apparent than ever. In such a context, advanced digital technologies can play an important role in reinventing the oil and gas industry's supply chain. Artificial intelligence, through machine learning algorithms and predictive analytics, enables demand forecasting, inventory optimization, automated operation scheduling, and predictive maintenance of equipment. The Industrial Internet of Things (IIoT) enables real-time monitoring of the status of assets, transmission lines, and operational equipment by creating a network of smart sensors. Big data also provides strategic insights for decision-making by aggregating and analyzing a huge volume of structured and unstructured data. The synergy of these technologies facilitates the transition from reactive management to predictive and autonomous management in the oil and gas industry. Despite these capabilities, the deployment of an autonomous supply chain in the oil and gas industry faces serious challenges. One of the most important of these challenges is the issue of cybersecurity. The widespread digitalization of operational infrastructure and the convergence of information technology (IT) and operational technology (OT) have significantly increased the level of cyber attacks. The connection of field equipment, industrial control systems, smart pipelines and remote control centers, in the absence of appropriate

security mechanisms, can lead to widespread disruptions, economic losses, environmental threats and even human hazards. Along with security considerations, the issue of sustainability has also become one of the central concerns of the oil and gas industry. Increasing pressures from environmental regulations, carbon emission reduction commitments, stakeholder expectations and sustainable development requirements have forced organizations active in this industry to review their operating models. Accordingly, the main objective of the present study is to design and analyze an autonomous supply chain framework based on artificial intelligence, big data and the Internet of Things in the oil and gas industry with an emphasis on sustainability and cybersecurity.

Methodology

The present research is applied and developmental in terms of its purpose; qualitative-quantitative in terms of the nature of the data; and descriptive in terms of the method of data collection. The study period is summer and fall ۲۰۲۵ and winter ۲۰۲۶. The research aims to design an autonomous supply chain framework based on artificial intelligence, big data, and the Internet of Things in the oil and gas industry with a sustainability and cybersecurity approach, and uses the fuzzy cognitive mapping method. The statistical population of the research includes experts in the following fields in the oil and gas industry: supply chain management, digital transformation and information technology, cybersecurity, sustainability management and HSE. The sampling was carried out purposively (judgmentally) and the criteria for selecting experts were: at least ۱۰ years of relevant professional experience, managerial or specialized experience in digital or operational projects and familiarity with analytical systems and smart infrastructures, which were completed by a total of ۲۳ experts. In this study, Mental Modeler software was used to model the causal structure of an autonomous supply chain based on artificial intelligence, big data and the Internet of Things.

Findings

Findings from modeling using fuzzy cognitive mapping showed that the transition to an autonomous supply chain in the oil and gas industry is not a purely technological process, but rather a systemic and multidimensional transformation that requires synergy between digital infrastructure, smart decision-making capabilities, cyber governance mechanisms, and sustainability requirements. The results of the study showed that the relationships between these dimensions are nonlinear, dynamic, and feedback

in nature, and the impact of each variable becomes meaningful in interaction with other network components. The first important finding of the study was the determining role of artificial intelligence maturity, big data infrastructure, and IoT integration as the main drivers of autonomous supply chain transformation. Analysis of centrality and degree of influence indices showed that these variables have the greatest causal impact on other model components and act as the driving force of digital transformation. One of the most important findings of the study was the identification of “real-time decision-making” as the most central variable of the network indicating its pivotal role in connecting digital enablers to performance outcomes. Findings from sensitivity analysis and scenario building showed that cybersecurity plays a role beyond a control or protection factor and acts as a stabilizing pillar of the entire autonomous structure. A decrease in the maturity level of cyber governance or an increase in cyber threats caused a significant decline in digital trust, reduced chain transparency, weakened real-time decision-making, and ultimately a decline in system resilience. The research results showed that sustainability in the autonomous supply chain is a direct consequence of the smartization of operational processes. Simulation scenarios showed that strengthening digital enablers indirectly reduces waste, increases energy efficiency, reduces carbon emissions, and strengthens economic sustainability.

Discussion and conclusion

Findings from modeling using fuzzy cognitive mapping showed that the transition to an autonomous supply chain in the oil and gas industry is not a purely technological process, but rather a systemic and multidimensional transformation that requires synergy between digital infrastructure, smart decision-making capabilities, cyber governance mechanisms, and sustainability requirements. The results of the study showed that the relationships between these dimensions are nonlinear, dynamic, and feedback in nature, and the impact of each variable becomes meaningful in interaction with other network components. The first important finding of the study was the determining role of artificial intelligence maturity, big data infrastructure, and IoT integration as the main drivers of autonomous supply chain transformation. Analysis of centrality and degree of influence indices showed that these variables have the greatest causal impact on other model components and act as the driving force of digital transformation. One of the most important findings of the study was the identification of “real-time decision-making” as the most central variable of the network. This variable

had the highest centrality among the model components with a value of ۳,۵, indicating its pivotal role in connecting digital enablers to performance outcomes. Findings from sensitivity analysis and scenario building showed that cybersecurity plays a role beyond a control or protection factor and acts as a stabilizing pillar of the entire autonomous structure. A decrease in the maturity level of cyber governance or an increase in cyber threats caused a significant decline in digital trust, reduced chain transparency, weakened real-time decision-making, and ultimately a decline in system resilience. The research results showed that sustainability in the autonomous supply chain is a direct consequence of the smartization of operational processes. Simulation scenarios showed that strengthening digital enablers indirectly reduces waste, increases energy efficiency, reduces carbon emissions, and strengthens economic sustainability.

Keywords: Autonomous Supply Chain, Artificial Intelligence, Big Data, Internet of Things, Oil and Gas Industry, Sustainability, Cybersecurity

طراحی چهارچوب زنجیره تأمین خودمختار مبتنی بر هوش مصنوعی، کلان داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با رویکرد پایداری و امنیت سایبری

امیراحسان زاهدی

* ID

استادیار گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

مهران اسماعیلی

ID

دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی، گروه مدیریت، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد، ایران.

چکیده

صنعت نفت و گاز با چالش‌هایی از قبیل پیچیدگی شبکه تأمین چندلایه و جهانی، ریسک‌های عملیاتی و ژئوپلیتیکی، تهدیدات امنیت سایبری در زیرساخت‌های حیاتی، فشارهای پایداری (زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی) و نیاز به تصمیم‌گیری بلادرنگ مبتنی بر داده، مواجه است. هدف اصلی پژوهش حاضر طراحی و تحلیل چهارچوب زنجیره تأمین خودمختار مبتنی بر هوش مصنوعی، کلان داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با تأکید بر پایداری و امنیت سایبری است. پژوهش از نظر هدف، کاربردی و توسعه‌ای؛ از نظر ماهیت داده‌ها، آمیخته کیفی-کمی و از نظر نحوه گردآوری داده‌ها، توصیفی است که به روش نگاشت شناختی فازی انجام شده است. بازه زمانی مطالعه تابستان، پائیز و زمستان ۱۴۰۴ می‌باشد. جامعه آماری پژوهش خبرگان صنعت نفت و گاز ایران است که به روش نمونه‌گیری هدفمند پرسشنامه ساختاریافته توسط ۲۳ خبره تکمیل شد. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که دستیابی به خودمختاری در زنجیره تأمین صنعت نفت و گاز، در گرو هم‌افزایی و به کارگیری فناوری‌های نوین دیجیتال است. در این میان، هوشمندی عملیاتی به عنوان یک عامل میانجی، نقش کلیدی در تبدیل ظرفیت‌های فناورانه به ارزش‌های اقتصادی و زیست محیطی ایفا می‌کند. به عبارت دیگر، استقرار زیرساخت‌های دیجیتال داده‌محور، پیش‌نیاز اصلی برای دستیابی به پایداری است؛ در حالی که تاب‌آوری و اعتماد در این اکوسیستم، تنها در سایه تأمین امنیت سایبری پایدار محقق خواهد شد. مدل ارائه شده در این پژوهش، به عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری، مدیران این صنعت را قادر می‌سازد تا ضمن اولویت‌بندی بهینه سرمایه‌گذاری‌های دیجیتال، پیامد سیاست‌های امنیتی را ارزیابی و سناریوهای مختلف تحول دیجیتال را پیش از عملیاتی‌سازی، شبیه‌سازی نمایند.

* نویسنده مسئول: a-zahedimoghadam@araku.ac.ir

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین خودمختار، هوش مصنوعی، کلان‌داده، اینترنت اشیا، صنعت نفت و گاز، پایداری، امنیت سایبری

مقدمه

تحولات فناورانه دهه اخیر، ساختار و منطق عملکرد زنجیره‌های تأمین را به‌طور بنیادین دگرگون ساخته است. ظهور فناوری‌های تحول‌آفرین نظیر هوش مصنوعی، کلان‌داده، اینترنت اشیا صنعتی و سامانه‌های سایبر-فیزیکی، زمینه‌ساز گذار از زنجیره‌های تأمین سنتی و واکنشی به سمت زنجیره‌های تأمین هوشمند، پیش‌بینانه و درنهایت خودمختار شده است. در این پارادایم نوین، زنجیره تأمین صرفاً مجموعه‌ای از فرآیندهای متوالی تأمین، تولید و توزیع نیست، بلکه به‌عنوان یک اکوسیستم پویا، داده‌محور و خودتنظیم‌گر عمل می‌کند که قادر است برپایه تحلیل بلادرنگ داده‌ها، تغییرات محیطی را شناسایی کرده، تصمیمات عملیاتی را به‌صورت خودکار اتخاذ کند و نسبت به اختلالات داخلی و خارجی واکنش تطبیقی نشان دهد (Radanliev et al., ۲۰۲۱; Koot et al., ۲۰۲۱). این تحول، مفهوم «زنجیره تأمین خودمختار» را به‌عنوان نسل جدیدی از مدیریت زنجیره تأمین مطرح ساخته است.

زنجیره تأمین خودمختار به سیستمی اطلاق می‌شود که با اتکا بر هوش مصنوعی، تحلیل پیشرفته داده، حسگرهای اینترنت اشیا و زیرساخت‌های ارتباطی هوشمند، قابلیت ادراک محیط، تحلیل شرایط، تصمیم‌گیری مستقل و اجرای خودکار اقدامات اصلاحی را دارا است. چنین ساختاری فراتر از اتوماسیون سنتی عمل می‌کند؛ زیرا در آن، تصمیم‌گیری تنها مبتنی بر قواعد ازپیش تعریف‌شده نیست، بلکه بر پایه یادگیری مستمر، تحلیل الگوها و سازگاری پویا با محیط شکل می‌گیرد (Sunmola & Baryannis, ۲۰۲۶). این سطح از خودمختاری، به‌ویژه در صنایع پیچیده و پرریسک، می‌تواند مزیت رقابتی قابل توجهی در افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها، بهبود تاب‌آوری و ارتقاء قابلیت پاسخ‌گویی ایجاد کند. صنعت نفت و گاز به‌عنوان یکی از راهبردی‌ترین صنایع جهان، به‌شدت وابسته به عملکرد اثربخش زنجیره تأمین است. این صنعت دارای زنجیره‌ای چندلایه، گسترده و به‌هم پیوسته است که از تأمین تجهیزات تخصصی و مواد اولیه تا عملیات استخراج، پالایش، انتقال و توزیع را دربر می‌گیرد. ماهیت سرمایه‌بر، پراکندگی جغرافیایی دارایی‌ها، وابستگی به زیرساخت‌های حیاتی، حساسیت به نوسانات ژئوپلیتیکی و الزام به تداوم عملیاتی، صنعت

نفت و گاز را با پیچیدگی‌های مدیریتی قابل توجهی مواجه ساخته است. افزون بر این، اختلالات ناشی از بحران‌های ژئوپلیتیکی، نوسانات بازار جهانی انرژی، محدودیت‌های زیست‌محیطی و تغییرات سریع فناوری، ضرورت بازطراحی معماری زنجیره تأمین این صنعت را بیش از پیش آشکار کرده است (Onukwulu et al., ۲۰۲۵).

در چنین بستری، فناوری‌های دیجیتال پیشرفته می‌توانند نقش مهمی در بازآفرینی زنجیره تأمین صنعت نفت و گاز ایفا کنند. هوش مصنوعی از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل پیش‌بینانه، امکان پیش‌بینی تقاضا، بهینه‌سازی موجودی، زمان‌بندی خودکار عملیات و نگهداشت پیش‌بینانه تجهیزات را فراهم می‌سازد. اینترنت اشیاء صنعتی با ایجاد شبکه‌ای از حسگرهای هوشمند، قابلیت پایش بلادرنگ وضعیت دارایی‌ها، خطوط انتقال و تجهیزات عملیاتی را مهیا می‌کند. همچنین کلان‌داده با تجمع و تحلیل حجم عظیمی از داده‌های ساختاریافته و غیرساختاریافته، بینش‌های راهبردی برای تصمیم‌گیری فراهم می‌آورد (Radhakrishnan et al., ۲۰۲۵). هم‌افزایی این فناوری‌ها، امکان‌گذار از مدیریت واکنشی به مدیریت پیش‌نگر و خودمختار را در صنعت نفت و گاز تسهیل می‌کند.

باوجود این ظرفیت‌ها، استقرار زنجیره تأمین خودمختار در صنعت نفت و گاز با چالش‌های جدی مواجه است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، مسئله امنیت سایبری است. دیجیتالی‌شدن گسترده زیرساخت‌های عملیاتی و همگرایی فناوری اطلاعات (IT) و فناوری عملیاتی (OT)، سطح حمله سایبری را به‌طور چشمگیری افزایش داده است. اتصال تجهیزات میدانی، سامانه‌های کنترل صنعتی، خطوط لوله هوشمند و مراکز کنترل از راه دور، در صورت فقدان سازوکارهای امنیتی مناسب، می‌تواند زمینه‌ساز اختلالات گسترده، خسارات اقتصادی، تهدیدات زیست‌محیطی و حتی مخاطرات انسانی شود (Radanliev et al., ۲۰۲۲; Mohammed et al., ۲۰۲۰).

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در محیط‌های صنعتی متصل، امنیت سایبری نه صرفاً یک ابزار حفاظتی، بلکه یک پیش‌نیاز بنیادین برای تحقق خودمختاری پایدار و اعتمادپذیر محسوب می‌شود (Alrumaih et al., ۲۰۲۳).

در کنار ملاحظات امنیتی، مسئله پایداری نیز به یکی از دغدغه‌های محوری صنعت نفت و گاز تبدیل شده است. فشارهای فزاینده ناشی از مقررات زیست‌محیطی، تعهدات کاهش

انتشار کربن، انتظارات ذی‌نفعان و الزامات توسعه پایدار، سازمان‌های فعال در این صنعت را ناگزیر ساخته است تا به بازنگری در مدل‌های عملیاتی خود بپردازند.

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که دیجیتالی‌سازی زنجیره تأمین می‌تواند از طریق بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش ضایعات، بهبود بهره‌وری منابع و افزایش شفافیت، به تحقق اهداف پایداری کمک کند (Bibri et al., ۲۰۲۳; Mohsen et al., ۲۰۲۶). با این حال، تحقق این ظرفیت مستلزم وجود چهارچوبی یکپارچه است که میان توانمندسازهای دیجیتال، عملکرد عملیاتی، الزامات امنیت سایبری و اهداف پایداری ارتباطی منسجم برقرار کند.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی به بررسی تأثیر هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء یا کلان‌داده بر مدیریت زنجیره تأمین پرداخته‌اند، اما بخش عمده این پژوهش‌ها بر صنایع تولیدی عمومی متمرکز بوده و کمتر به اقتضانات خاص صنعت نفت و گاز توجه کرده‌اند. از سوی دیگر، اغلب پژوهش‌ها این فناوری‌ها را به صورت مجزا بررسی کرده‌اند و کمتر مطالعه‌ای چهارچوبی جامع برای تحلیل تعامل همزمان این فناوری‌ها با مؤلفه‌های پایداری و امنیت سایبری ارائه داده است. همچنین، فقدان مدل‌های علی پویا که بتوانند روابط بازخوردی و اثرات متقابل میان این متغیرها را شبیه‌سازی کنند، یکی از خلأهای جدی ادبیات محسوب می‌شود.

نوآوری اصلی این پژوهش در چهار محور قابل تبیین است: نخست، ارائه یک چهارچوب یکپارچه برای هم‌افزایی سه فناوری کلیدی تحول دیجیتال؛ دوم، تلفیق همزمان ابعاد عملکردی، پایداری و امنیت سایبری در یک مدل واحد؛ سوم، تمرکز بر صنعت نفت و گاز به عنوان محیطی با پیچیدگی عملیاتی و حساسیت راهبردی بالا؛ و چهارم، بهره‌گیری از مدل‌سازی علی پویا برای تحلیل سناریوهای تحول دیجیتال و استخراج سیاست‌های بهینه مدیریتی.

براین اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر طراحی و تحلیل چهارچوب زنجیره تأمین خودمختار مبتنی بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با تأکید بر پایداری و امنیت سایبری است. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند علاوه بر توسعه ادبیات نظری حوزه زنجیره تأمین هوشمند، ابزار مناسبی برای تصمیم‌گیری راهبردی مدیران صنعت نفت و گاز در مسیر تحول دیجیتال فراهم آورد.

پیشینه پژوهش

زنجیره تأمین خودمختار: زنجیره تأمین طی دهه‌های اخیر از یک ساختار عملیاتی خطی و مبتنی بر کنترل انسانی، به سامانه‌ای پویا، هوشمند و داده‌محور تکامل یافته است. در نسل‌های اولیه مدیریت زنجیره تأمین، تمرکز اصلی بر هماهنگی لجستیکی، مدیریت موجودی و بهینه‌سازی جریان مواد بود؛ اما با ظهور انقلاب صنعتی چهارم، مفهوم زنجیره تأمین هوشمند و در ادامه زنجیره تأمین خودمختار مطرح شد (Hu & Ghadimi, ۲۰۲۵).

زنجیره تأمین خودمختار به سامانه‌ای اطلاق می‌شود که با بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال پیشرفته نظیر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، کلان‌داده، اینترنت اشیاء، تحلیل بلادرنگ و سامانه‌های سایبر-فیزیکی، قادر است محیط عملیاتی را ادراک کرده، داده‌ها را تحلیل کند، تصمیمات لازم را بدون مداخله مستقیم انسان اتخاذ نماید و به‌صورت خودکار اقدامات اصلاحی را اجرا کند (Sunmola & Baryannis, ۲۰۲۶).

این مفهوم فراتر از اتوماسیون کلاسیک است. در اتوماسیون سنتی، فرآیندها براساس قواعد از پیش تعیین شده اجرا می‌شوند، درحالی‌که در زنجیره تأمین خودمختار، سیستم توانایی یادگیری، تطبیق و تصمیم‌گیری مبتنی بر شرایط متغیر را داراست. این خودمختاری بر چهار قابلیت اساسی استوار است:

۱. ادراک^۱: جمع‌آوری داده از محیط از طریق حسگرها، سامانه‌های ERP، تجهیزات هوشمند و شبکه‌های اطلاعاتی.

۲. شناخت^۲: تحلیل داده‌ها و شناسایی الگوها از طریق الگوریتم‌های تحلیلی و یادگیری ماشین.

۳. تصمیم‌گیری^۳: انتخاب بهینه‌ترین اقدام براساس تحلیل شرایط.

۴. اقدام خودکار^۴: اجرای تصمیمات بدون مداخله انسانی (Radanliev et al., ۲۰۲۱). مطالعات نشان داده‌اند که زنجیره‌های تأمین خودمختار می‌توانند مزایای متعددی از جمله کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش انعطاف‌پذیری، ارتقای سرعت واکنش، بهبود تاب‌آوری و کاهش خطاهای انسانی ایجاد کنند (Ivanov & Dolgui, ۲۰۲۰).

تحول دیجیتال در زنجیره تأمین: تحول دیجیتال به فرآیند به‌کارگیری فناوری‌های نوین برای بازطراحی مدل‌های کسب‌وکار، فرآیندهای عملیاتی و سازوکارهای تصمیم‌گیری

۱. Perception

۲. Cognition

۳. Decision-making

۴. Autonomous Execution

اطلاق می‌شود (Vial, ۲۰۱۹). در حوزه زنجیره تأمین، تحول دیجیتال صرفاً به دیجیتالی‌سازی فرآیندها محدود نیست، بلکه شامل بازتعریف کامل منطق عملکرد شبکه تأمین است.

تحول دیجیتال در زنجیره تأمین سه سطح اصلی دارد: ۱. دیجیتالی‌سازی^۱: تبدیل اطلاعات فیزیکی به داده‌های دیجیتال. ۲. دیجیتال‌سازی^۲: استفاده از فناوری برای بهبود فرآیندهای موجود. ۳. تحول دیجیتال^۳: بازآفرینی ساختاری زنجیره تأمین مبتنی بر فناوری (Büyüközkan & Göçer, ۲۰۱۸).

در چارچوب زنجیره تأمین خودمختار، تحول دیجیتال بستری برای یکپارچه‌سازی جریان اطلاعات، تحلیل داده‌های عملیاتی و تصمیم‌گیری هوشمند فراهم می‌آورد. مهم‌ترین محرک‌های این تحول عبارت‌اند از: افزایش پیچیدگی زنجیره‌های جهانی، نوسانات تقاضا، فشارهای رقابتی، الزامات پایداری و ریسک‌های محیطی و ژئوپلیتیکی (Ivanov et al., ۲۰۲۵).

هوش مصنوعی در زنجیره تأمین: هوش مصنوعی یکی از مهم‌ترین فناوری‌های توانمندساز زنجیره تأمین خودمختار است. این فناوری با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی، یادگیری عمیق و تحلیل پیش‌بینانه، امکان تحلیل داده‌های پیچیده و تصمیم‌گیری خودکار را فراهم می‌سازد. در زنجیره تأمین، کاربردهای اصلی هوش مصنوعی عبارت‌اند از:

پیش‌بینی تقاضا: مدل‌های یادگیری ماشین قادرند با تحلیل داده‌های تاریخی، متغیرهای محیطی و روندهای بازار، تقاضا را با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند (Min, ۲۰۱۹).

۲. بهینه‌سازی موجودی: هوش مصنوعی می‌تواند سطح بهینه موجودی را با توجه به ریسک اختلالات و تغییرات تقاضا تعیین کند.

۳. نگهداشت پیش‌بینانه: الگوریتم‌های تحلیلی با تحلیل داده‌های حسگرها، خرابی تجهیزات را پیش از وقوع شناسایی می‌کنند (Lee et al., ۲۰۱۸).

۴. تصمیم‌گیری بلادرنگ: سامانه‌های مبتنی بر هوش مصنوعی قادرند در شرایط عدم قطعیت، تصمیمات فوری اتخاذ کنند.

۱. Digitization

۲. Digitalization

۳. Digital Transformation

در صنعت نفت و گاز، هوش مصنوعی نقش کلیدی در مدیریت تجهیزات حساس، خطوط انتقال، پالایشگاه‌ها و برنامه‌ریزی عملیاتی دارد (Onukwulu et al., ۲۰۲۵).

کلان‌داده و تحلیل پیشرفته: کلان‌داده به مجموعه داده‌هایی با حجم، سرعت، تنوع و پیچیدگی بالا اطلاق می‌شود که تحلیل آن‌ها نیازمند ابزارهای پیشرفته پردازش است (Wamba et al., ۲۰۲۰). ویژگی اصلی کلان‌داده عبارت‌اند از: حجم^۱، سرعت^۲، تنوع^۳، صحت^۴. در زنجیره تأمین، کلان‌داده از منابع مختلفی نظیر: حسگرهای IoT، داده‌های لجستیکی، سامانه‌های ERP، داده‌های بازار و داده‌های محیطی تولید می‌شود. تحلیل کلان‌داده امکان کشف الگوهای پنهان، پیش‌بینی اختلالات، بهینه‌سازی عملیات و افزایش شفافیت زنجیره را فراهم می‌کند (Kache & Seuring, ۲۰۱۷).

در صنعت نفت و گاز، تحلیل کلان‌داده در پایش خطوط لوله، مدیریت دارایی‌ها، تحلیل عملکرد تجهیزات و بهینه‌سازی مصرف انرژی کاربرد گسترده دارد. اینترنت اشیاء صنعتی: اینترنت اشیاء صنعتی (IIoT) شبکه‌ای از تجهیزات، حسگرها و سامانه‌های متصل است که داده‌های عملیاتی را به‌صورت بلادرنگ جمع‌آوری و منتقل می‌کند (زاهدی و حقیقت، ۱۴۰۴). در زنجیره تأمین، اینترنت اشیاء سه نقش اصلی ایفا می‌کند:

۱. پایش بلادرنگ: ردیابی وضعیت تجهیزات، محموله‌ها و دارایی‌ها.
 ۲. افزایش شفافیت: ایجاد دید انتها به انتها در زنجیره تأمین.
 ۳. تسهیل تصمیم‌گیری خودکار: تغذیه مستمر سامانه‌های تحلیلی با داده‌های لحظه‌ای.
- در صنعت نفت و گاز، کاربردهای IIoT شامل پایش خطوط انتقال، نظارت بر مخازن، کنترل تجهیزات حفاری و مدیریت دارایی‌های میدانی است (Mohammed et al., ۲۰۲۲). پایداری در زنجیره تأمین: پایداری در زنجیره تأمین به مدیریت همزمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی اطلاق می‌شود (Carter & Rogers, ۲۰۰۸). مدل سه‌بعدی پایداری شامل ابعاد زیر است:

۱. بعد اقتصادی: کاهش هزینه، سودآوری بلندمدت.
۲. بعد زیست‌محیطی: کاهش انتشار، مدیریت انرژی، کاهش ضایعات.

۱. Volume

۲. Velocity

۳. Variety

۴. Veracity

۳. بعد اجتماعی: ایمنی، مسئولیت اجتماعی، رفاه کارکنان.

در صنعت نفت و گاز، فشارهای قانونی و اجتماعی برای کاهش انتشار کربن و بهبود عملکرد زیست محیطی افزایش یافته است (Bibri et al., ۲۰۲۳). فناوری‌های دیجیتال می‌توانند از طریق: بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش اتلاف، پیش‌بینی خرابی و بهبود تخصیص منابع به تحقق پایداری کمک کنند.

امنیت سایبری در زنجیره تأمین خودمختار: افزایش اتصال‌پذیری دیجیتال، سطح حملات سایبری را افزایش داده است. در زنجیره‌های خودمختار، هرگونه اختلال سایبری می‌تواند پیامدهای جدی عملیاتی و اقتصادی ایجاد کند (Radanliev et al., ۲۰۲۰).

ابعاد اصلی امنیت سایبری عبارت‌اند از:

۱. محرمانگی: حفاظت از اطلاعات حساس.

۲. یکپارچگی: جلوگیری از تغییر غیرمجاز داده‌ها.

۳. دسترس‌پذیری: تضمین عملکرد مداوم سامانه‌ها.

در صنعت نفت و گاز، تهدیدات سایبری می‌توانند موجب توقف تولید، اختلال در خطوط انتقال، نشت اطلاعات و خسارات زیست محیطی شوند (Alrumaih et al., ۲۰۲۳). بنابراین امنیت سایبری نه تنها یک ابزار حفاظتی، بلکه شرط لازم برای تحقق خودمختاری پایدار است.

یکی از نخستین مطالعات نظام‌مند در حوزه زنجیره تأمین دیجیتال توسط (Büyükoğkan & Göçer, ۲۰۱۸) انجام شد. آنان با مرور ادبیات، چهارچوبی برای تحول دیجیتال زنجیره تأمین ارائه کردند و نشان دادند که فناوری‌های دیجیتال می‌توانند موجب ارتقای انعطاف‌پذیری، شفافیت و پاسخ‌گویی شوند. اگرچه این مطالعه از منظر مفهومی غنی است، اما چند محدودیت اساسی دارد: فاقد مدل تجربی یا تحلیلی برای بررسی روابط علی متغیرهاست؛ به مسئله خودمختاری تصمیم‌گیری نمی‌پردازد و نقش امنیت سایبری در چهارچوب پیشنهادی نادیده گرفته شده است.

(Hu & Ghadimi, ۲۰۲۵) در پژوهشی تأثیر فناوری‌های دیجیتال بر تاب‌آوری زنجیره تأمین را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دیجیتالی‌سازی موجب افزایش قابلیت واکنش سریع و بازیابی در برابر اختلالات می‌شود. این مطالعه سهم مهمی در تبیین رابطه فناوری و تاب‌آوری دارد، با این حال، تمرکز آن بر تاب‌آوری است و ابعاد پایداری و امنیت

سایبری کمتر بررسی شده‌اند و مدل ارائه شده بیشتر خطی است و تعاملات بازخوردی پیچیده را لحاظ نمی‌کند.

(Ivanov & Dolgui, ۲۰۲۰) مفهوم «زنجیره تأمین قابل بقا» را مطرح کردند. آن‌ها تأکید کردند که زنجیره‌های آینده باید علاوه بر تاب‌آوری، قابلیت خودتنظیمی و سازگاری هوشمند داشته باشند. این مطالعه از نظر نظری ارزشمند است اما فاقد تمرکز صنعتی خاص است و مکانیزم تحقق خودمختاری عملیاتی به صورت اجرایی مشخص نشده است.

(Sunmola & Baryannis, ۲۰۲۶) پژوهشی درباره ارکستراسیون خودمختار هوش مصنوعی در زنجیره تأمین ارائه کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های یادگیری تطبیقی می‌توانند تصمیم‌گیری مستقل را در شبکه‌های تأمین ممکن سازند. این مطالعه از جدیدترین پژوهش‌ها در حوزه خودمختاری است، با این حال، بیشتر بر الگوریتم تمرکز دارد و ملاحظات امنیت سایبری و پایداری را وارد مدل نکرده است.

(Radhakrishnan et al., ۲۰۲۵) کاربرد هم‌زمان هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء در عملیات خودمختار زنجیره تأمین را بررسی کردند. نتایج نشان داد یکپارچگی داده‌ای موجب تصمیم‌گیری بلادرنگ می‌شود و خودکارسازی پیش‌بینانه هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. محدودیت اصلی مطالعه، فقدان توجه به ریسک سایبری است.

(Mohammed et al., ۲۰۲۲) تهدیدات امنیت سایبری در زیرساخت‌های نفت و گاز مبتنی بر IIoT را تحلیل کردند. نتایج نشان داد اتصال‌پذیری گسترده سطح حمله را افزایش می‌دهد و بدون حاکمیت سایبری مناسب، تحول دیجیتال شکننده خواهد بود. مطالعه از منظر امنیتی بسیار مهم است اما ارتباط امنیت سایبری با عملکرد زنجیره تأمین بررسی نشده است. زاهدی و حقیقت (۱۴۰۴) در پژوهش «موانع، قابلیت‌ها و پیامدهای هوشمندسازی زنجیره تأمین در صنعت ایران» نشان دادند الزامات نرم‌افزاری، سخت‌افزاری و محیطی و سازمانی، شرایط علی برای کارخانه هوشمند (مقوله محوری) هستند و موانع زیرساختی، فناوری و فنی، مسائل حفاظتی، موانع مالی و اقتصادی، موانع سازمانی و مدیریتی، موانع فرهنگی و موانع محیطی، شرایط زمینه‌ای عمومی هستند که بر راهبردها تأثیر می‌گذارند.

حسینی و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهش «ارائه مدل شبکه‌ای عوامل موثر بر پیاده سازی صنعت ۴٫۰ در مدیریت زنجیره تاب‌آور» نشان دادند بعد مدیریتی-نهادی، تأثیر گذارترین و

بعد عملیاتی تأثیرپذیرترین ابعاد در پیاده‌سازی صنعت ۴,۰ در مدیریت زنجیره تأمین تاب آور است.

کریمی و همکاران (۱۴۰۲) پژوهشی با عنوان «شناسایی مولفه ها و شاخص های پیشران در مدیریت زنجیره تأمین سبز مبتنی بر اینترنت اشیاء»، انجام دادند. مؤلفه های شناسایی شده عبارت‌اند از: مدیریت هوشمند زنجیره تأمین، پایش لحظه‌ای وضعیت اشیاء، انتقال هوشمند اشیاء، مکان یابی هوشمند اشیاء، شفافیت اطلاعاتی، مدیریت کیفیت هوشمند، منبع یابی هوشمند، مدیریت توزیع هوشمند و مدیریت موجودی هوشمند.

مروور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که پژوهش‌های موجود غالباً یا بر ابعاد فناورانه تمرکز داشته‌اند یا صرفاً به تحلیل عملکردی پرداخته‌اند و کمتر مطالعه‌ای توانسته است ارتباط همزمان میان فناوری‌های تحول‌آفرین، پایداری و امنیت سایبری را در قالب یک چارچوب علی یکپارچه بررسی کند.

پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین دارای نوآوری‌های زیر است: برای نخستین بار تعامل همزمان هوش مصنوعی، کلان‌داده، اینترنت اشیاء، پایداری و امنیت سایبری در صنعت نفت و گاز مدل‌سازی شده است. استفاده از نگاشت شناختی فازی امکان تحلیل روابط غیرخطی، شناسایی حلقه‌های بازخورد، سناریوسازی و تحلیل حساسیت را فراهم می‌کند. چهارچوب متناسب با ویژگی‌های بومی و زیرساختی صنعت نفت و گاز ایران طراحی شده است. امنیت سایبری نه به عنوان متغیر کنترلی، بلکه به عنوان توانمندساز خودمختاری مدل شده است. مدل قابلیت استفاده برای اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری دیجیتال، ارزیابی سناریوها و تصمیم‌گیری مدیریتی را دارد.

روش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و توسعه‌ای؛ از نظر ماهیت داده‌ها، آمیخته کیفی-کمی و از نظر نحوه گردآوری داده‌ها، توصیفی است. بازه زمانی مطالعه تابستان، پائیز و زمستان ۱۴۰۴ می‌باشد. پژوهش با هدف طراحی چهارچوب زنجیره تأمین خودمختار مبتنی بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با رویکرد پایداری و امنیت سایبری، از روش نگاشت شناختی فازی^۱ بهره می‌گیرد. روش FCM به دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط علی پیچیده، حلقه‌های بازخوردی، عدم قطعیت و پویایی سیستم‌های

^۱ Fuzzy Cognitive Mapping (FCM)

اجتماعی-فنی، امکان سناریوسازی و قابل درک بودن برای خبرگان صنعتی، برای تحلیل ساختارهای تصمیم‌گیری در صنایع راهبردی نظیر نفت و گاز مناسب است. FCM ترکیبی از منطق فازی و شبکه‌های علی است. در این روش، سیستم به صورت یک گراف جهت‌دار وزن‌دار مدل‌سازی می‌شود که در آن: گره‌ها (Nodes) بیان‌گر مفاهیم یا متغیرهای سیستم هستند. یال‌ها (Edges) روابط علی بین مفاهیم را نشان می‌دهند. وزن هر یال شدت و جهت تأثیر را مشخص می‌کند.

فرایند گردآوری داده‌ها در ۳ مرحله طراحی شد:

۱. شناسایی مفاهیم و متغیرها: در این مرحله، با مرور نظام‌مند ادبیات در حوزه‌های زنجیره تأمین هوشمند و خودمختار، تحول دیجیتال در صنعت نفت و گاز، مدیریت پایداری در صنایع انرژی، حاکمیت و مدیریت امنیت سایبری در زیرساخت‌های حیاتی و همچنین بررسی تجارب عملی شرکت‌های پیشرو در صنعت انرژی، مجموعه‌ای از ۲۱ متغیر کلیدی استخراج و در ۵ لایه اصلی طبقه‌بندی شد: توانمندسازهای دیجیتال، قابلیت‌های زنجیره تأمین خودمختار، پیامدهای عملکردی، پایداری و امنیت سایبری.

۲. طراحی پرسشنامه استخراج روابط علی: پرسشنامه به صورت ساختاریافته طراحی شد تا خبرگان بتوانند جهت رابطه علی بین متغیرها را مشخص کنند؛ شدت تأثیر را تعیین نمایند و روابط جدید احتمالی را پیشنهاد دهند. برای سنجش شدت روابط از طیف فازی در بازه ۱- تا ۱+ به شرح جدول ۱ استفاده شد. این مقیاس امکان مدل‌سازی عدم قطعیت و روابط غیرخطی را فراهم می‌کند.

جدول ۱. طیف فازی شدت روابط

تفسیر	تأثیر بسیار قوی	تأثیر قوی	تأثیر متوسط	تأثیر ضعیف	بدون تأثیر	تأثیر ضعیف منفی	تأثیر متوسط منفی	تأثیر قوی منفی	تأثیر بسیار قوی منفی
مقدار	+۱	+۰,۷۵	+۰,۵	+۰,۲۵	۰	-۰,۲۵	-۰,۵	-۰,۷۵	-۱

۳. بررسی روایی محتوایی: به منظور تأمین روایی محتوایی ابزار، پرسشنامه در اختیار ۳ نفر از اعضای هیئت علمی متخصص در حوزه مدیریت زنجیره تأمین و سیستم‌های هوشمند قرار گرفت؛ ۲ نفر از مدیران ارشد صنعت نفت و گاز نیز از منظر کاربردی آن را ارزیابی کردند؛ اصلاحات لازم از حیث شفافیت مفاهیم، حذف هم‌پوشانی‌ها و بهبود بیان انجام شد.

جامعه آماری پژوهش شامل خبرگان حوزه‌های زیر در صنعت نفت و گاز است: مدیریت زنجیره تأمین، تحول دیجیتال و فناوری اطلاعات، امنیت سایبری، مدیریت پایداری و HSE. نمونه‌گیری به صورت هدفمند (قضاوتی) انجام شد و معیارهای انتخاب خبرگان عبارت بودند از: حداقل ۱۰ سال سابقه حرفه‌ای مرتبط، تجربه مدیریتی یا تخصصی در پروژه‌های دیجیتال یا عملیاتی و آشنایی با سیستم‌های تحلیلی و زیرساخت‌های هوشمند، که در مجموع پرسشنامه توسط ۲۳ خبره تکمیل شد. ویژگی‌های مشارکت‌کنندگان به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲. ویژگی‌های خبرگان

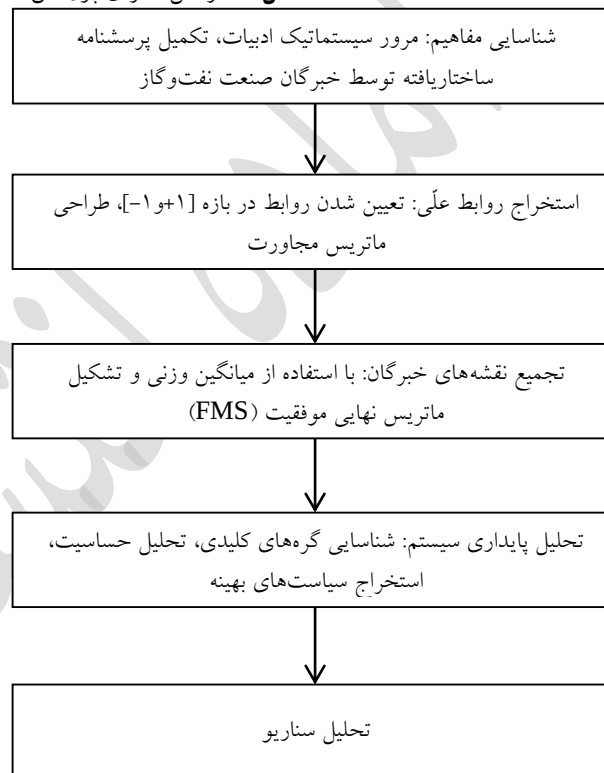
تحصیلات	فراوانی	سابقه کار	فراوانی	حوزه تخصصی	فراوانی
کارشناسی	۴	۱۰ تا ۱۵ سال	۷	مدیریت زنجیره تأمین	۷
کارشناسی ارشد	۸	۱۶ تا ۲۰ سال	۹	تحول دیجیتال و فناوری اطلاعات	۶
دکتری	۱۱	بیشتر از ۲۰ سال	۷	امنیت سایبری	۴
				مدیریت پایداری و HSE	۶

پس از تکمیل پرسشنامه‌ها، برای هر خبره یک ماتریس مجاورت (Adjacency Matrix) تشکیل شد؛ وزن‌های روابط در بازه $[-1, +1]$ نرمال‌سازی گردید؛ میانگین وزنی نظرات خبرگان محاسبه شد؛ برای سنجش میزان توافق خبرگان از ضریب هماهنگی کندال (Kendall's W) استفاده شد و با توجه به ضریب محاسبه شده $0/83$ در سطح معنی‌داری $0/001$ سطح توافق خبرگان، قوی استنباط شد. جهت تعیین تابع انتقال، در این پژوهش از تابع سیگموئید پیش‌فرض نرم‌افزار استفاده شد: $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ این تابع موجب نرمال‌سازی مقادیر فعال‌سازی در بازه $[0, 1]$ گردید. ماتریس نهایی حاصل، مبنای تحلیل ساختاری و شبیه‌سازی سناریوها قرار گرفت. به منظور افزایش قابلیت اتکای نتایج، تحلیل حساسیت نسبت به تغییر وزن روابط انجام شد؛ پایداری ساختار سیستم در حالت تعادل بررسی گردید

و سناریوهای سیاستی (تقویت هوش مصنوعی، تشدید تهدیدات سایبری و تقویت حاکمیت سایبری) شبیه‌سازی شد.

در این مطالعه، به منظور مدل‌سازی ساختار علی زنجیره تأمین خودمختار مبتنی بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء از نرم‌افزار Mental Modeler استفاده شد. این نرم‌افزار یکی از ابزارهای تخصصی توسعه‌یافته برای طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی نقشه‌های شناختی فازی است که امکان تعریف گره‌ها، تعیین روابط علی، تخصیص وزن‌ها و اجرای تحلیل‌های پویایی سیستم را فراهم می‌کند. مراحل اجرای پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱. مراحل اجرای پژوهش



یافته‌ها

۱. تعریف مفاهیم (Nodes): مجموعه‌ای از ۲۱ متغیر کلیدی استخراج و در ۵ لایه اصلی مطابق جدول ۳ طبقه‌بندی شد. هر مفهوم به صورت یک گره مستقل در گراف جهت‌دار مدل وارد گردید.

جدول ۳. متغیرهای زنجیره تأمین خودمختار مبتنی بر هوش مصنوعی، کلان داده و اینترنت اشیا در صنعت نفت و گاز با رویکرد پایداری و امنیت سایبری

نماد	متغیر	لایه
C ^۱	بلوغ هوش مصنوعی: الگوریتم‌های پیش‌بینی، یادگیری ماشین، بهینه‌سازی تصمیمات عملیاتی	توانمندسازهای دیجیتال
C ^۲	زیرساخت کلان داده: یکپارچگی داده‌ها، کیفیت داده، تحلیل بلادرنگ	
C ^۳	یکپارچگی اینترنت اشیا: سنسورهای هوشمند، پایش لحظه‌ای تجهیزات، ردیابی دارایی‌ها	
C ^۴	معماری دیجیتال یکپارچه: ERP یکپارچه، پلتفرم داده مشترک، API های صنعتی	
C ^۵	پیش‌بینی هوشمند تقاضا	قابلیت‌های زنجیره تأمین
C ^۶	برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خودکار	خودمختار
C ^۷	لجستیک هوشمند	
C ^۸	نگهداشت پیش‌بینانه	
C ^۹	تصمیم‌گیری بلادرنگ	
C ^{۱۰}	تاب‌آوری زنجیره تأمین	پیامدهای عملکردی
C ^{۱۱}	کاهش هزینه‌های عملیاتی	
C ^{۱۲}	چابکی سازمان	
C ^{۱۳}	شفافیت زنجیره تأمین	
C ^{۱۴}	کاهش انتشار کربن	پایداری
C ^{۱۵}	بهره‌وری انرژی	
C ^{۱۶}	کاهش ضایعات	
C ^{۱۷}	پایداری اقتصاد بلندمدت	
C ^{۱۸}	بلوغ حاکمیت سایبری	امنیت سایبری
C ^{۱۹}	مدیریت ریسک سایبری	
C ^{۲۰}	امنیت زیرساخت‌های حیاتی	
C ^{۲۱}	اعتماد دیجیتال در اکوسیستم	

۲. تعریف روابط علی (Edges) و ماتریس مجاورت (Adjacency Matrix): پس از دریافت پرسشنامه‌های خبرگان، برای هر خبره یک ماتریس مجاورت به صورت زیر تشکیل شد:

$$W^{(k)} = [W_{ij}^{(k)}]_{n \times n}$$

$$W_{ij} \in [-1, +1]$$

$$W_{ii} = 0$$

که در آن: $W_{ij}^{(k)}$ وزن رابطه از مفهوم C_i به مفهوم C_j نزد خبره k است. برای هر زوج مفهومی که رابطه علی داشت، جهت رابطه مشخص شد؛ وزن آن در بازه ۱- تا ۱+ وارد گردید؛ روابط مثبت با رنگ آبی و روابط منفی با رنگ قرمز در محیط نرم افزار نمایش داده شد.

۳. تجميع نقشه‌های خبرگان: برای تجميع نظرات خبرگان و تشکیل ماتریس نهایی، از میانگین وزنی استفاده شد.

$$W_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K W_{ij}^{(k)}$$

که در آن: K تعداد خبرگان و W_{ij} وزن نهایی رابطه بین مفاهیم i و j است. در این پژوهش، برای هر جفت مفهوم i و j ، ماتریس‌های خبرگان با وزن‌های برابر تجميع شدند. در صورت وجود اختلاف نظر بین خبرگان، وزن‌های مثبت و منفی به صورت جبری در فرایند میانگین‌گیری لحاظ می‌شوند. بنابراین، مقدار نهایی W_{ij} نشان‌دهنده برآیند دیدگاه خبرگان است؛ مقادیر نزدیک به صفر بیانگر تعارض یا عدم اجماع، و مقادیر با قدر مطلق بالاتر نشان‌دهنده اجماع بیشتر است. براین اساس، ماتریس نهایی موفقیت^۱ (FMS) تشکیل گردید که در جدول ۴ قابل مشاهده است.

جدول ۴. ماتریس نهایی موفقیت (FMS)

عوامل ل	C _۵	C _۶	C _۷	C _۸	C _۹	C _{۱۰}	C _{۱۱}	C _{۱۲}	C _{۱۳}	C _{۱۴}	C _{۱۵}	C _{۱۶}	C _{۱۷}	C _{۱۸}	C _{۱۹}	C _{۲۰}	C _{۲۱}
C _۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _{۱۰}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _{۱۱}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _{۱۲}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _{۱۳}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _{۱۴}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _{۱۵}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _{۱۶}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _{۱۷}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C _{۱۸}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

^۱ Final Matrix of Success (FMS)

۴,۲. تحلیل حساسیت: برای ارزیابی پایداری مدل FCM و شناسایی مفاهیم اثرگذار، تحلیل حساسیت انجام پذیرفت. این تحلیل با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار تخصصی Mental Modeler صورت گرفت. در فرایند تحلیل حساسیت، مقادیر وزن یال‌ها به صورت گام به گام به میزان ۱۰ درصد تغییر داده شد. برای هر تغییر، مدل مجدداً اجرا گردید تا اثر آن بر بردار حالت نهایی و پایداری مکانیزم خودسازمان‌دهنده (Self-Organization Mechanism) مورد ارزیابی قرار گیرد. این رویکرد امکان داد تا میزان حساسیت سیستم به تغییرات کوچک در روابط بین مفاهیم را سنجیده و نقاط بحرانی بالقوه شناسایی شوند. با تغییر ۱۰٪+ درصدی وزن روابط، ساختار تعادل سیستم تغییر اساسی نشان نداد. تنها درحالی که روابط امنیت سایبری بیش از ۲۰ درصد تضعیف شد، اعتماد دیجیتال و تاب‌آوری به شدت کاهش یافت. این یافته بیان‌گر آن است که سیستم نسبت به سرمایه‌گذاری دیجیتال پایدار است اما نسبت به ضعف امنیت سایبری حساسیت بالایی دارد.

۵. شاخص‌های تحلیل ساختاری: در نهایت، به تجزیه و تحلیل مؤلفه‌ها براساس شاخص‌های مرکزیت، درجه اثرگذاری و درجه اثرپذیری، پرداخته شد. درجه اثرگذاری (Outdegree)، مجموع میزان مقادیر فازی خروجی (علی) یک عامل که نشان‌دهنده بزرگی تأثیر آن بر عوامل پیرامونی است.

$$OD_i = \sum_{j=1}^n |w_{ij}|$$

درجه اثرپذیری (Indegree)، مجموع میزان مقادیر فازی ورودی (معلولی) یک عامل که نشان‌دهنده بزرگی تأثیرپذیری آن از سایر عوامل است.

$$ID_i = \sum_{j=1}^n |w_{ji}|$$

مرکزیت (Centrality)، مجموع میزان مقادیر فازی ورودی و خروجی یک عامل که حد در مرکز قرار گرفتن آن عامل (تبادل با سایر عوامل) را نشان می‌دهد.

$$C_i = OD_i + ID_i$$

میزان مرکزیت، درجه اثرگذاری و اثرپذیری مؤلفه‌ها بر اساس تحلیل مقادیر فازی در نرم‌افزار Mental Modeler در جدول ۵ قابل مشاهده است.

جدول ۵. میزان مرکزیت، درجه اثرگذاری و اثرپذیری مؤلفه‌ها

عامل	درجه اثرگذاری	درجه اثرپذیری	مرکزیت
بلوغ هوش مصنوعی	۰	۲,۵	۲,۵
زیرساخت کلان‌داده	۰	۱,۹	۱,۹

۱,۵	۱,۵	۰	یکپارچگی اینترنت اشیاء
۱,۳	۱,۳	۰	معماری دیجیتال یکپارچه
۲	۱,۲	۰,۸	پیش‌بینی هوشمند تقاضا
۱,۹	۰,۶	۱,۳	برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خودکار
۱,۲	۰,۶	۰,۶	لجستیک هوشمند
۲,۴	۱,۵	۰,۹	نگهداشت پیش‌بینانه
۳,۵	۱,۵	۲	تصمیم‌گیری بلادرنگ
۲,۹	۰,۸	۲,۱	تاب‌آوری زنجیره تأمین
۲	۰,۷	۱,۳	کاهش هزینه‌های عملیاتی
۲,۷	۰,۸	۱,۹	چابکی سازمان
۲,۵	۰,۶	۱,۹	شفافیت زنجیره تأمین
۲	۰,۶	۱,۴	کاهش انتشار کربن
۱,۶	۰,۸	۰,۸	بهره‌وری انرژی
۱,۳	۰,۶	۰,۷	کاهش ضایعات
۲,۱	۰	۲,۱	پایداری اقتصاد بلندمدت
۱,۶	۱,۶	۰	بلوغ حاکمیت سایبری
۱,۳	۰,۶	۰,۷	مدیریت ریسک سایبری
۲,۸	۰,۸	۲	امنیت زیرساخت‌های حیاتی
۲,۴	۱,۲	۱,۲	اعتماد دیجیتال در اکوسیستم

۵,۱. شناسایی متغیرهای پیشران (Driving Variables): نتایج نشان داد ۳ متغیر دارای بیشترین درجه خروجی عبارت‌اند از: بلوغ هوش مصنوعی، تصمیم‌گیری بلادرنگ و بلوغ حاکمیت سایبری. این یافته نشان می‌دهد پیشران اصلی تحول زنجیره تأمین خودمختار در صنعت نفت و گاز، ترکیبی از توانمندسازهای دیجیتال و زیرساخت‌های حکمرانی سایبری است. بلوغ هوش مصنوعی بیشترین اثر را بر پیش‌بینی هوشمند تقاضا، برنامه‌ریزی خودکار و تصمیم‌گیری بلادرنگ دارد و به‌عنوان موتور اصلی سیستم عمل می‌کند.

۵,۲. متغیرهای وابسته کلیدی (Dependent Variables): بیشترین درجه ورودی مربوط به متغیرهای تاب‌آوری زنجیره تأمین، پایداری اقتصادی بلندمدت و اعتماد دیجیتال بود. این نتایج نشان می‌دهد پیامدهای نهایی سیستم در سطح تاب‌آوری و پایداری اقتصادی شکل

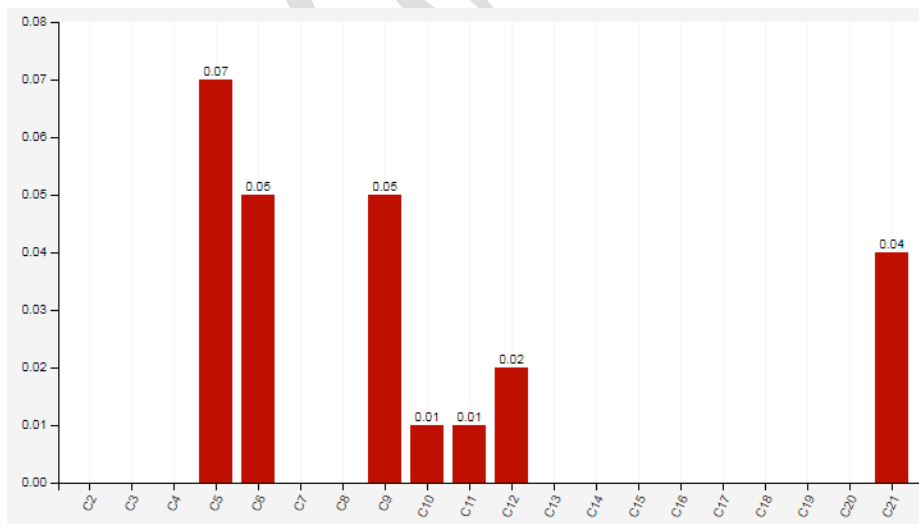
می‌گیرد و اعتماد دیجیتال نقش واسطه‌ای مهمی در انتقال اثرات امنیت سایبری به عملکرد عملیاتی دارد.

۵,۳. تحلیل مرکزیت کل (Overall Centrality): بیشترین مرکزیت کل مربوط به تصمیم‌گیری بلادرنگ، تاب‌آوری زنجیره تأمین و بلوغ هوش مصنوعی بود که نشان‌دهنده نقش محوری این مفاهیم در شبکه علی است.

۶. تحلیل سناریوها: سناریوهای محتمل براساس مهم‌ترین گره‌های شناسایی شده به شرح زیر تحلیل شد.

۶,۱. سناریوی تقویت هوش مصنوعی: با افزایش مقدار اولیه متغیر بلوغ هوش مصنوعی (C۱) به ۰,۹: تصمیم‌گیری بلادرنگ به شدت افزایش یافت؛ چابکی و تاب‌آوری رشد معنادار نشان داد؛ کاهش هزینه عملیاتی و پایداری اقتصادی در سطح بالا تثبیت شد. این سناریو نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری در هوش مصنوعی اثر تقویتی زنجیره‌ای دارد و هوش مصنوعی به عنوان اهرم تحول سیستم عمل می‌کند و اثرات غیرمستقیم آن از طریق حلقه‌های بازخوردی تقویت می‌شود. تغییرات حاصل از تقویت هوش مصنوعی در شکل ۳ قابل مشاهده است.

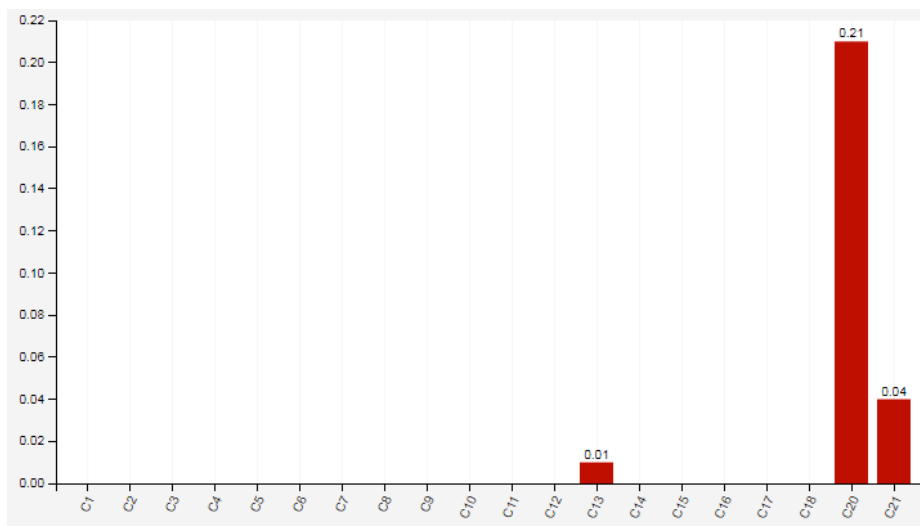
شکل ۳. سناریوی تقویت هوش مصنوعی



۶,۲. سناریوی تشدید تهدیدات سایبری: با افزایش منفی مقدار اولیه متغیر مدیریت ریسک سایبری (C۱۹) (افزایش شدت تهدید): اعتماد دیجیتال کاهش یافت؛ شفافیت زنجیره

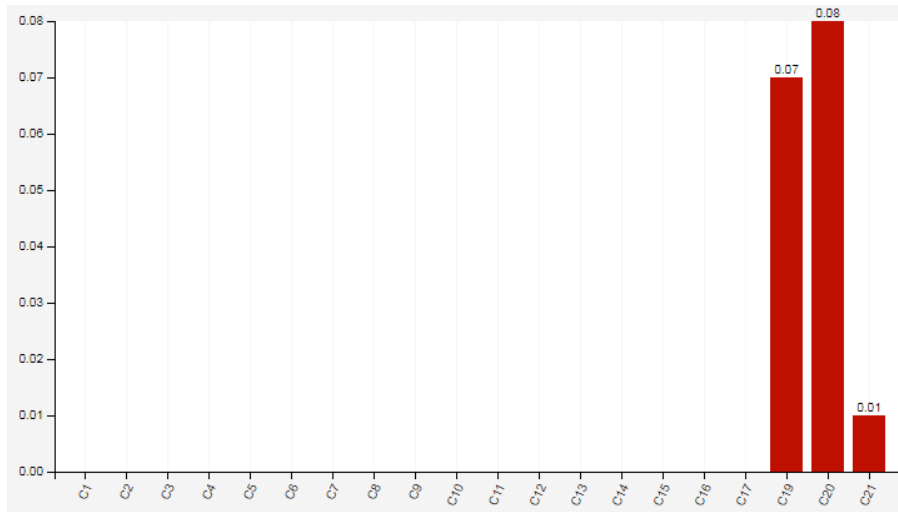
تأمین افت کرد؛ تصمیم‌گیری بلادرنگ و درنهایت تاب‌آوری کاهش یافتند. این یافته بیان‌گر حساسیت بالای زنجیره تأمین خودمختار به اختلالات امنیت سایبری است. تغییرات حاصل از تشدید تهدیدات سایبری در شکل ۴ قابل مشاهده است.

شکل ۴. سناریوی تشدید تهدیدات سایبری



۶,۳. سناریوی تقویت حاکمیت سایبری: با افزایش مقدار اولیه متغیر بلوغ حاکمیت سایبری (C۱۸) به ۰,۹: امنیت زیرساخت‌های حیاتی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافت؛ اعتماد دیجیتال تثبیت شد؛ اثر منفی تهدیدات سایبری خنثی گردید و عملکرد کل سیستم بهبود یافت. این سناریو نشان می‌دهد امنیت سایبری نه تنها یک عامل کنترلی، بلکه یک توانمندساز عملکرد پایدار است. تغییرات حاصل از تقویت حاکمیت سایبری در شکل ۵ قابل مشاهده است.

شکل ۵. سناریوی تقویت حاکمیت سایبری



تحلیل سناریوهای انجام شده نشان داد:

۱. هوش مصنوعی و تصمیم‌گیری بلادرنگ پیشران‌های تحول هستند.
 ۲. امنیت سایبری ستون تثبیت‌کننده سیستم است.
 ۳. تاب‌آوری و پایداری اقتصادی پیامد نهایی تعامل فناوری و حکمرانی سایبری است.
 ۴. مدل از پایداری ساختاری و همگرایی دینامیک برخوردار است.
- نمودار ساختاری زنجیره تأمین خودمختار مبتنی بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با رویکرد پایداری و امنیت سایبری در شکل ۶ نشان داده شده است. این مدل از منطق سیستمی و رویکرد شبکه‌ای تبعیت می‌کند و روابط چندسطحی و بازخوردی میان متغیرهای فناورانه، عملیاتی و راهبردی را به‌صورت یکپارچه نمایش می‌دهد. به صورت کلی، مدل از چهار لایه اصلی تشکیل شده است: (۱) توانمندسازهای دیجیتال، (۲) قابلیت‌های زنجیره تأمین خودمختار، (۳) پیامدهای عملکردی، و (۴) ابعاد راهبردی پایداری و امنیت سایبری. این لایه‌ها در قالب یک شبکه علی‌جهت‌دار با حلقه‌های بازخوردی تقویتی و تعدیلی با یکدیگر در تعامل هستند.
- در سطح نخست، توانمندسازهای دیجیتال به‌عنوان پیشران‌های فناوری مدل تعریف شده‌اند. این بخش شامل بلوغ هوش مصنوعی، زیرساخت کلان‌داده، یکپارچگی اینترنت اشیاء و معماری دیجیتال یکپارچه است. این متغیرها بستر فناورانه لازم برای تحقق خودمختاری عملیاتی در زنجیره تأمین را فراهم می‌سازند. هوش مصنوعی ظرفیت تحلیل

پیش‌بینانه و تصمیم‌گیری خودکار را ایجاد می‌کند؛ کلان‌داده امکان پردازش حجم عظیم داده‌های عملیاتی را فراهم می‌نماید؛ اینترنت اشیاء جریان داده‌های بلادرنگ از تجهیزات، انبارها و شبکه توزیع را تضمین می‌کند؛ و معماری دیجیتال یکپارچه انسجام و هماهنگی میان اجزای سیستم را برقرار می‌سازد. در ساختار مدل، این متغیرها بیشترین نقش علی اولیه را ایفا کرده و ورودی مستقیم قابلیت‌های عملیاتی محسوب می‌شوند.

در مرکز مدل، قابلیت‌های هسته‌ای زنجیره تأمین خودمختار قرار گرفته‌اند که شامل پیش‌بینی تقاضای هوشمند، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خودکار، لجستیک هوشمند و نگهداشت پیش‌بینانه است. این مؤلفه‌ها بیانگر مرحله تبدیل فناوری به عملکرد عملیاتی هستند. به بیان دیگر، توانمندسازهای دیجیتال زمانی به خلق ارزش منجر می‌شوند که در قالب این قابلیت‌ها نهادینه شوند. روابط میان این مؤلفه‌ها نیز تعاملی و هم‌افزا است؛ به گونه‌ای که بهبود در پیش‌بینی تقاضا موجب ارتقاء کیفیت برنامه‌ریزی، و نگهداشت پیش‌بینانه موجب افزایش قابلیت اطمینان لجستیک می‌شود. این تعاملات در قالب حلقه‌های نوآوری تقویتی در مدل منعکس شده‌اند.

لایه سوم مدل به پیامدهای عملکردی اختصاص دارد که شامل تاب‌آوری زنجیره تأمین، کاهش هزینه‌ها، چابکی سازمانی و شفافیت زنجیره تأمین است. این متغیرها بازتاب مستقیم کارکرد موفق قابلیت‌های خودمختار هستند. تاب‌آوری از طریق کاهش توقف‌های ناخواسته و تصمیم‌گیری بلادرنگ تقویت می‌شود. چابکی حاصل هماهنگی دیجیتال و سرعت پاسخ‌گویی به تغییرات محیطی است. شفافیت نیز نتیجه یکپارچگی داده‌های بلادرنگ و تحلیل هوشمند اطلاعات می‌باشد. این پیامدها نقش واسطه‌ای میان عملکرد عملیاتی و اهداف کلان راهبردی ایفا می‌کنند.

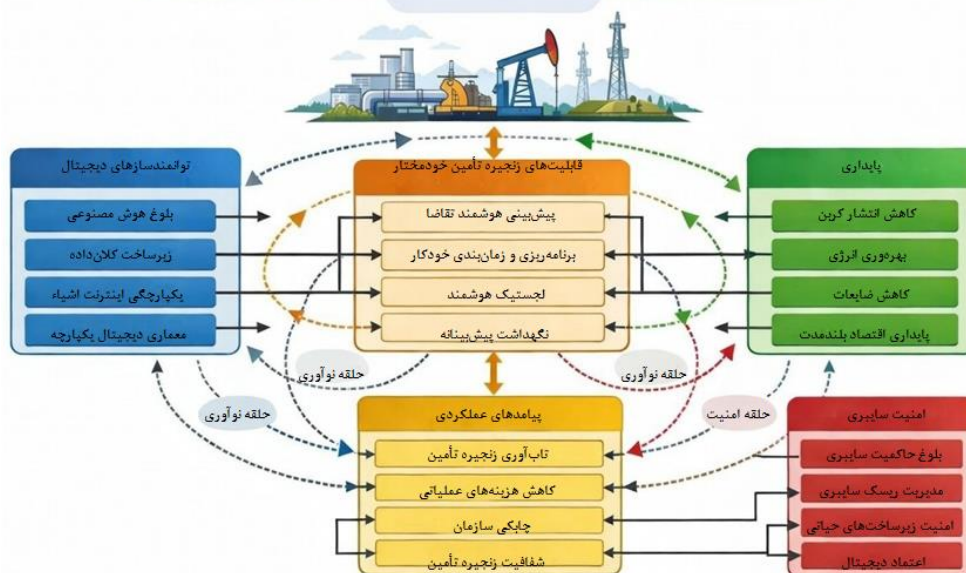
بعد پایداری در مدل شامل کاهش انتشار کربن، بهره‌وری انرژی، کاهش ضایعات و پایداری اقتصادی بلندمدت است. این مؤلفه‌ها نشان‌دهنده پیامدهای راهبردی هوشمندسازی زنجیره تأمین هستند. در مدل مفهومی، پایداری نه به عنوان یک متغیر مستقل، بلکه به عنوان نتیجه تعامل قابلیت‌های هوشمند و بهبود عملکرد عملیاتی تعریف شده است. بهبود لجستیک هوشمند موجب کاهش مصرف انرژی، نگهداشت پیش‌بینانه موجب کاهش اتلاف منابع و برنامه‌ریزی خودکار موجب بهینه‌سازی مصرف مواد می‌شود. افزون بر این، پایداری اقتصادی بلندمدت می‌تواند از طریق افزایش سودآوری و کاهش هزینه‌ها،

سرمایه گذاری مجدد در فناوری های دیجیتال را تقویت نماید که خود یک حلقه بازخوردی تقویتی ایجاد می کند.

بعد امنیت سایبری امنیت سایبری در این مدل نقش سازوکار تثبیت کننده و تعدیل کننده را ایفا می کند. این بعد شامل بلوغ حاکمیت سایبری، مدیریت ریسک سایبری، امنیت زیرساخت های حیاتی و اعتماد دیجیتال است. با افزایش سطح دیجیتالی شدن و اتصال پذیری سیستم، آسیب پذیری سایبری نیز افزایش می یابد. در نتیجه، استقرار سازوکارهای حاکمیتی و کنترلی قوی برای حفظ پایداری عملکرد ضروری است. امنیت سایبری در مدل اثر تعدیلی بر روابط میان فناوری و عملکرد دارد؛ به گونه ای که ضعف در این حوزه می تواند موجب کاهش اعتماد دیجیتال، اختلال در شفافیت و تضعیف تاب آوری شود. در مقابل، تقویت حاکمیت سایبری موجب تثبیت و پایداری کل سیستم خواهد شد. مدل مفهومی پژوهش حاضر یک ساختار شبکه ای غیرخطی با روابط چندجهته و بازخوردی را ترسیم می کند که در آن: توانمندسازهای دیجیتال پیشران های اولیه تحول اند؛ قابلیت های خودمختار هسته خلق ارزش عملیاتی هستند؛ پیامدهای عملکردی حلقه اتصال عملیات و راهبرد محسوب می شوند؛ پایداری هدف توسعه بلندمدت سیستم است؛ و امنیت سایبری شرط لازم تداوم و ثبات سیستم دیجیتال به شمار می رود.

لازم به ذکر است این پژوهش بر عوامل کلیدی و درونی مؤثر بر زنجیره تأمین خودمختار صنعت نفت و گاز تمرکز دارد. محدوده سیستم مورد مطالعه شامل توانمندسازهای دیجیتال، قابلیت های خودمختار، پیامدهای عملکردی، پایداری و امنیت سایبری است. متغیرهایی مانند تحریم ها، ریسک ژئوپلیتیک، وابستگی به تأمین کنندگان خارجی، اگرچه می توانند بر سیستم تأثیرگذار باشند، اما به عنوان عوامل محیطی خارجی در نظر گرفته شده اند که خارج از روابط علی داخلی مورد بررسی در این مدل قرار می گیرند. هدف این پژوهش، تحلیل روابط علت و معلولی مستقیم میان متغیرهای اصلی درونی سیستم بوده است. برای حفظ ایجاز و تمرکز بر روابط کلیدی، از گنجاندن عوامل خارجی و پیچیده در این مدل خودداری شده است. بنابراین، مرز سیستم حاضر، عوامل درونی و استراتژیک کلیدی مؤثر بر زنجیره تأمین خودمختار صنعت نفت و گاز تعریف می شود.

شکل ۶. نمودار ساختاری زنجیره تأمین خودمختار مبتنی بر هوش مصنوعی، کلان داده و اینترنت اشیا در صنعت نفت و گاز با رویکرد پایداری و امنیت سایبری



بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی پژوهش حاضر طراحی و تحلیل چارچوب زنجیره تأمین خودمختار مبتنی بر هوش مصنوعی، کلان داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با تأکید بر پایداری و امنیت سایبری بود. یافته‌های حاصل از مدل‌سازی با استفاده از نگاشت شناختی فازی نشان داد که گذار به زنجیره تأمین خودمختار در صنعت نفت و گاز یک فرآیند صرفاً فناورانه نیست، بلکه یک تحول سیستمی و چندبعدی است که نیازمند هم‌افزایی میان زیرساخت‌های دیجیتال، قابلیت‌های تصمیم‌گیری هوشمند، سازوکارهای حکمرانی سایبری و الزامات پایداری است. نتایج پژوهش نشان داد که روابط میان این ابعاد ماهیتی غیرخطی، پویا و بازخوردی دارند و اثرگذاری هر متغیر در تعامل با سایر مؤلفه‌های شبکه معنا می‌یابد.

نخستین یافته مهم پژوهش، نقش تعیین‌کننده بلوغ هوش مصنوعی، زیرساخت کلان داده و یکپارچگی اینترنت اشیاء به‌عنوان پیشران‌های اصلی تحول زنجیره تأمین خودمختار بود. تحلیل شاخص‌های مرکزیت و درجه اثرگذاری نشان داد که این متغیرها بیشترین تأثیر علی را بر سایر مؤلفه‌های مدل دارند و به‌عنوان موتور محرک تحول دیجیتال عمل می‌کنند. این یافته با نتایج پژوهش‌های (Sunmola & Baryannis, ۲۰۲۵; Hu & Ghadimi,

۲۰۲۶) همسو است که بر نقش فناوری‌های هوشمند در بازآفرینی ساختار تصمیم‌گیری زنجیره تأمین تأکید کرده‌اند. باین‌حال، پژوهش حاضر نشان داد که در صنعت نفت و گاز، صرف برخورداری از فناوری‌های پیشرفته برای تحقق خودمختاری کافی نیست؛ بلکه اثربخشی این فناوری‌ها وابسته به سطح یکپارچگی معماری دیجیتال و قابلیت اتصال‌پذیری داده‌ای میان اجزای زنجیره است.

از منظر نظری، این یافته مؤید آن است که خودمختاری زنجیره تأمین حاصل تجمیع چند فناوری مستقل نیست، بلکه نتیجه هم‌افزایی شبکه‌ای میان فناوری‌های مکمل است. به عبارت دیگر، فقدان هر یک از مؤلفه‌های کلیدی نظیر کیفیت داده، زیرساخت ارتباطی یا تحلیل پیشرفته، می‌تواند زنجیره تحول را مختل سازد. از منظر عملی، این نتیجه برای مدیران صنعت نفت و گاز بیانگر آن است که سرمایه‌گذاری‌های دیجیتال باید به صورت یکپارچه و معماری‌محور طراحی شوند و تمرکز صرف بر خرید فناوری‌های منفرد نمی‌تواند منجر به خودمختاری واقعی شود.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش، شناسایی «تصمیم‌گیری بلادرنگ» به عنوان مرکزی‌ترین متغیر شبکه بود. این متغیر با میزان ۳/۵ بالاترین مرکزیت را در میان مؤلفه‌های مدل به خود اختصاص داد که نشان‌دهنده نقش محوری آن در اتصال توانمندسازهای دیجیتال به پیامدهای عملکردی است. این یافته با مطالعه (Radhakrishnan et al., ۲۰۲۵) همخوانی دارد که «تصمیم‌گیری داده‌محور» دارای بالاترین امتیاز مرکزیت بوده و آن را زیربنای زنجیره‌های تأمین هوشمند معرفی کرده‌اند. باین‌حال، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در صنعت نفت و گاز، میزان مرکزیت این متغیر بیشتر است و تصمیم‌گیری بلادرنگ صرفاً یک قابلیت عملیاتی نیست، بلکه حلقه واسط میان فناوری و ارزش‌آفرینی راهبردی است.

تبیین این یافته از منظر نظری نشان می‌دهد که در سیستم‌های پیچیده و پویایی مانند زنجیره تأمین نفت و گاز، ارزش فناوری زمانی بالفعل می‌شود که به ظرفیت تصمیم‌گیری سریع، تطبیقی و مستقل منجر شود. این مسئله با منطق نظریه سیستم‌های اجتماعی-فنی نیز سازگار است؛ زیرا فناوری زمانی اثربخش است که بتواند در تعامل با فرآیندهای مدیریتی و ساختارهای سازمانی، قابلیت شناخت و واکنش ایجاد کند. از منظر کاربردی، این نتیجه

نشان می‌دهد سازمان‌های فعال در صنعت نفت و گاز باید توسعه الگوریتم‌های تصمیم‌یار، سامانه‌های تحلیل بلادرنگ و موتورهای خودکارسازی تصمیم را در اولویت قرار دهند. یافته‌های تحلیل حساسیت و سناریوسازی نشان داد که امنیت سایبری نقشی فراتر از یک عامل کنترلی یا حفاظتی دارد و به‌عنوان ستون تثبیت‌کننده کل ساختار خودمختار عمل می‌کند. کاهش سطح بلوغ حاکمیت سایبری یا تشدید تهدیدات سایبری موجب افت قابل توجه اعتماد دیجیتال، کاهش شفافیت زنجیره، تضعیف تصمیم‌گیری بلادرنگ و در نهایت افت تاب‌آوری سیستم شد.

این یافته با پژوهش (Mohammed et al., ۲۰۲۲) همسو است که بر آسیب‌پذیری فزاینده زیرساخت‌های صنعتی دیجیتال تأکید دارند. با این حال، نوآوری پژوهش حاضر در آن است که امنیت سایبری را نه تنها به‌عنوان عامل بازدارنده تهدید، بلکه به‌عنوان توانمندساز مستقیم خودمختاری مدل‌سازی کرده است.

از منظر نظری، این نتیجه نشان می‌دهد در زنجیره‌های تأمین خودمختار، اعتماد دیجیتال و امنیت سایبری بخشی از منطق خلق ارزش‌اند و نه صرفاً سازوکارهای حفاظتی جانبی. این مسئله بیانگر ضرورت بازتعریف جایگاه امنیت سایبری در مدل‌های تحول دیجیتال است. از منظر مدیریتی، یافته‌ها نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در امنیت سایبری باید هم‌زمان و هم‌سطح با سرمایه‌گذاری در هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء انجام شود. هرگونه توسعه دیجیتال بدون معماری امنیتی متناسب، می‌تواند به شکست ساختاری منجر شود.

نتایج پژوهش نشان داد که پایداری در زنجیره تأمین خودمختار، یک پیامد مستقیم از هوشمندسازی فرآیندهای عملیاتی است. سناریوهای شبیه‌سازی نشان دادند که تقویت توانمندسازهای دیجیتال به‌طور غیرمستقیم موجب کاهش ضایعات، افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش انتشار کربن و تقویت پایداری اقتصادی می‌شود. این یافته با مطالعه (Bibri et al., ۲۰۲۳) همسو است، اما فراتر از آن نشان می‌دهد که در صنعت نفت و گاز، پایداری از مسیر هوشمندسازی عملیاتی حاصل می‌شود، نه صرفاً از طریق سیاست‌های جبرانی زیست‌محیطی. از منظر نظری، این نتیجه حاکی از آن است که میان خودمختاری دیجیتال و پایداری رابطه‌ای تقویتی و دوسویه برقرار است. هوشمندسازی موجب افزایش بهره‌وری و کاهش اتلاف می‌شود و این بهبود عملکرد، ظرفیت سرمایه‌گذاری مجدد در فناوری را تقویت می‌کند. از منظر اجرایی، این یافته می‌تواند مبنای مهمی برای سیاست‌گذاری در شرکت‌های

نفت و گاز باشد؛ به گونه‌ای که تحول دیجیتال نه صرفاً به عنوان پروژه فناوری، بلکه به عنوان راهبرد تحقق اهداف ESG و توسعه پایدار تعریف شود.

براساس یافته‌های پژوهش، می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد: خودمختاری زنجیره تأمین در صنعت نفت و گاز مبتنی بر هم‌افزایی فناوری‌های دیجیتال پیشرفته است. قابلیت‌های هوشمند عملیاتی حلقه واسط میان فناوری و خلق ارزش اقتصادی و زیست‌محیطی محسوب می‌شوند. پایداری نتیجه طبیعی یک زنجیره تأمین هوشمند و داده‌محور است، مشروط بر آنکه زیرساخت دیجیتال به درستی پیاده‌سازی شود. امنیت سایبری شرط لازم برای حفظ ثبات، اعتماد و تاب‌آوری در اکوسیستم دیجیتال است. مدل پیشنهادی دارای انسجام ساختاری و قابلیت تحلیل پویایی بوده و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری راهبردی در سطح کلان صنعت قرار گیرد.

مدل پیشنهادی می‌تواند به عنوان ابزار پشتیبان تصمیم برای مدیران صنعت نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرد تا: اولویت سرمایه‌گذاری در فناوری‌های دیجیتال را تعیین کنند؛ اثرات سیاست‌های امنیت سایبری را پیش‌بینی نمایند و سناریوهای تحول دیجیتال را پیش از اجرا شبیه‌سازی کنند.

در جمع‌بندی نهایی، می‌توان گفت آینده رقابت‌پذیری صنعت نفت و گاز در گرو گذار هوشمندانه به زنجیره‌های تأمین خودمختار، امن و پایدار است و مدل پیشنهادی این پژوهش می‌تواند نقشه راهی برای این گذار راهبردی فراهم آورد.

این مطالعه با محدودیت‌هایی از قبیل اتکا به قضاوت خبرگان، محدود بودن جامعه خبرگان، عدم استفاده از داده‌های عملیاتی واقعی و محدودیت در بررسی تفاوت میان زیرشاخه‌های صنعت نفت و گاز، مواجه بود.

برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود مدل پیشنهادی در یک مطالعه موردی عملیاتی، به‌ویژه در یکی از پالایشگاه‌های گاز جنوب ایران (مانند مجتمع گاز پارس جنوبی)، پیاده‌سازی و اعتبارسنجی شود. هدف از این اقدام، مقایسه خروجی‌های مدل با داده‌های واقعی و بررسی میزان انطباق پیش‌بینی‌های مدل با شاخص‌های عملکرد واقعی در محیط صنعتی است. به منظور کاهش خطای ذهنی خبرگان در تعیین روابط، ترکیب روش نگاشت شناختی فازی با مدل‌سازی معادلات ساختاری پیشنهاد می‌گردد. در این راستا، پیشنهاد می‌شود فرضیه «تأثیر معنادار متغیرهای ریسک بر بهره‌وری عملیاتی» با استفاده از

داده‌های جمع‌آوری شده از مدیران میانی و ارشد شرکت‌های نفت و گاز آزمون شود. توسعه مدل فعلی برای بررسی اثرات تکانه‌های ژئوپلیتیک و تحریم‌های بین‌المللی بر زنجیره تأمین پالایشگاه‌ها پیشنهاد می‌شود. به‌طور مشخص، پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی، «سناریوهای محتمل تأخیر در تأمین قطعات استراتژیک به دلیل محدودیت‌های تجاری» به عنوان ورودی مدل تعریف و رفتار سیستم در بلندمدت تحلیل شود.

تعارض منافع

تعارض منافع نداریم.

سپاسگزاری

از متخصصین صنعت نفت و گاز که با مشارکت در این پژوهش به ما یاری رساندند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

ORCID

Amir Ehsan Zahedi



<http://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۱-۹۴۹۱-۹۰۲۳>

Mehran Esmaeili



<http://orcid.org/۰۰۰۹-۰۰۰۹-۸۷۴۵-۹۷۴۹>

بیش بینی هوشمند تقاضا تأثیر دارد؟

زیرساخت کلان‌داده تا چه اندازه بر تصمیم‌گیری بلادرنگ تأثیر دارد؟
یکپارچگی اینترنت اشیاء تا چه اندازه بر نگهداشت پیش‌بینانه تأثیر دارد؟
یکپارچگی اینترنت اشیاء تا چه اندازه بر شفافیت زنجیره تأمین تأثیر دارد؟
برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خودکار تا چه اندازه بر چابکی سازمان تأثیر دارد؟
نگهداشت پیش‌بینانه تا چه اندازه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی تأثیر دارد؟
تصمیم‌گیری بلادرنگ تا چه اندازه بر شفافیت زنجیره تأمین تأثیر دارد؟
تاب‌آوری زنجیره تأمین تا چه اندازه بر بهره‌وری انرژی تأثیر دارد؟
کاهش هزینه‌های عملیاتی تا چه اندازه بر پایداری اقتصادی بلندمدت تأثیر دارد؟
بلوغ حاکمیت سایبری تا چه اندازه بر امنیت زیرساخت‌های حیاتی تأثیر دارد؟
مدیریت ریسک سایبری تا چه اندازه بر اعتماد دیجیتال در اکوسیستم تأثیر دارد؟
امنیت زیرساخت‌های حیاتی تا چه اندازه بر اعتماد دیجیتال در اکوسیستم تأثیر دارد؟

پیشنهاد روابط جدید:

آیا رابطه علیّ مهمی وجود دارد که در پرسشنامه لحاظ نشده باشد؟
در صورت وجود، نوع و شدت رابطه را مشخص نمایید.

متغیر مبدأ:

متغیر مقصد:

شدت اثر:

دلیل:

منابع

حسینی، مریم، عندلیب اردکانی، داود، ناصر صدرآبادی، علیرضا و حسینی بامکان، سید مجتبی. (۱۴۰۴). ارائه مدل شبکه‌ای عوامل موثر بر پیاده سازی صنعت ۴,۰ در مدیریت زنجیره تاب آور. *مطالعات مدیریت صنعتی*، ۲۳ (۷۸)، ۱۹۷-۲۴۱. <https://doi.org/10.22054/jims.2025.88102.2986>

زاهدی، امیراحسان، و حقیقت، مهدیه. (۱۴۰۴). موانع، قابلیت‌ها و پیامدهای هوشمندسازی زنجیره تأمین در صنعت ایران. *پژوهشنامه پردازش و مدیریت اطلاعات*، ۴۱(۲)، ۴۴۱-۴۶۸. <https://doi.org/10.22034/jipm.2025.2061431.2019>

کریمی، حسین، جمشیدی، محمدجواد و بخشم، میلاد. (۱۴۰۲). شناسایی مؤلفه‌ها و شاخص‌های پیشران در مدیریت زنجیره تأمین سبز مبتنی بر اینترنت اشیاء. *مطالعات مدیریت صنعتی*، ۲۱(۶۹)، ۱۶۰-۱۲۹. <https://doi.org/10.22054/jims.2023.65741.2752>

References

- Alrumailh, T., Alenazi, M., Alsowaygh, N., Humayed, A., & Alablani, Ibtihal. (۲۰۲۳). Cyber Resilience in Industrial Networks: A State of the Art, Challenges, and Future Directions. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, ۳۵, ۱۰۱۷۸۱. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101781>
- Bibri, S. E., Alexandre, A., & Sharifi, A. (۲۰۲۳). Environmentally sustainable smart cities and their converging AI, IoT, and big data technologies and solutions: An integrated approach to an extensive literature review. *Energy Informatics*, ۶(۹), ۱-۳۵. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00259-2>
- Büyüközkan, G., & Göçer, F. (۲۰۱۸). Digital supply chain: Literature review. *Computers in Industry*, ۹۸, ۱۵۷-۱۷۷. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.02.010>
- Carter, C. R., & Rogers, D. S. (۲۰۰۸). A framework of sustainable supply chain management. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, ۳۸(۵), ۳۶۰-۳۸۷. <https://doi.org/10.1108/09600300810882816>
- Hu, Y., & Ghadimi, P. (۲۰۲۵). Developing Supply Chain Resilience with Advanced Digital Technology: A Review. *IFAC-PapersOnLine*, ۵۹, ۲۸۸۰-۲۸۸۵. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.484>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (۲۰۲۰). Viability of intertwined supply networks. *International Journal of Production Research*, ۵۸(۱۰), ۲۹۰۴-۲۹۱۵. <https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1750727>
- Ivanov, D., Tsipoulanidis, A., & Schönberger, J. (۲۰۲۵). Global supply chain and operations management. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-90809-5>
- Kache, F., & Seuring, S. (۲۰۱۷). Challenges and opportunities of digital information at the intersection of big data analytics and supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*, ۳۷(۱), ۱۰-۳۶. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-02-2015-0078>
- Koot, M., Mes, M., & Iacob, M. E. (۲۰۲۱). A systematic literature review of supply chain decision making supported by the Internet of Things and big data analytics. *Computers & Industrial Engineering*, ۱۵۴, ۱۰۷۰۷۶. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107076>

- Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (۲۰۱۸). Industrial AI. *Manufacturing Letters*, ۱۸, ۲۰-۲۳. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>
- Min, H. (۲۰۱۹). Artificial intelligence in supply chain management. *International Journal of Logistics Research and Applications*, ۲۲(۱), ۱-۱۹. <https://doi.org/10.1080/13670067.9.2737037>
- Mohammed, A. S., Reinecke, P., Burnap, P., Rana, O., & Anthi, E. (۲۰۲۲). Cybersecurity challenges in the offshore oil and gas industry: An industrial cyber-physical systems perspective. *Computers & Security*, ۱۱۸, ۱۰۲۷۳۱. <https://doi.org/10.1016/j.csc.2022.102731>
- Mohsen, B., Nahleh, Y., Mohsen, B. (۲۰۲۲). Sustainable digitalization of manufacturing supply chains: An integrated framework for resilience, efficiency, and circularity. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, ۱۹, ۱۰۰۳۲۵. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100325>
- Onukwulu, E. C., Agho, M. O., Eyo-Udo, N. L., Sule, A. K., & Azubuike, C. (۲۰۲۵). Advances in automation and AI for enhancing supply chain productivity in oil and gas. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, ۱۰(۱), ۶۵۴-۶۸۷. <https://doi.org/10.51084/IJRIAS.2025.912.04>
- Radanliev, P., De Roure, D., Nicolescu, R., Huth, M., & Santos, O. (۲۰۲۱). Artificial intelligence and the Internet of Things in Industry ۴.۰. *CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction*, ۲(۴), ۳۲۹-۳۳۸. <https://doi.org/10.1007/s42486-021-00057-3>
- Radanliev, P., De Roure, D., Page, K., Nurse, J. R. C., & Santos, O. (۲۰۲۰). Cyber risk at the edge: Current and future trends on cyber risk analytics and artificial intelligence in the industrial Internet of Things and Industry ۴.۰ supply chains. *Cybersecurity*, ۲(۱۳), ۱-۲۱. <https://doi.org/10.1186/s42486-020-00052-8>
- Radhakrishnan, G. V., Gabhane, M., Jha, S., Al Said, N., & Murthy, B. S. N. V. R. (۲۰۲۵). AI and IoT in supply chains: Creating intelligent and autonomous business operations. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, ۱۰(۱), ۱-۱۸. <https://doi.org/10.52783/jisem.v10.i1.s.1664>
- Sunmola, F., & Baryannis, G. (۲۰۲۲). Strategic and autonomous orchestration of artificial intelligence and blockchain integration for supply chains. *Systems*, ۱۴(۴), ۳۶۳. <https://doi.org/10.3390/systems14040363>
- Vial, G. (۲۰۱۹). Understanding digital transformation. *Journal of Strategic Information Systems*, ۲۸(۲), ۱۱۸-۱۴۴. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003>
- Wamba, S. F., et al. (۲۰۲۰). Big data analytics and firm performance. *Journal of Business Research*, ۷۰, ۳۵۶-۳۶۵. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.08.009>

References [In Persian]

- Hosinie, M., andalib ardakani, D., Naser Sadrabadi, A. and Hosseini Bamkan, S. M. (۲۰۲۵). Presenting a network model of Influencing factors the implementation of Industry ۴.۰ in resilient supply chain

- management. *Industrial Management Studies*, ۲۲(۷۸), ۱۹۷-۲۴۱. (In Persian) <https://doi.org/10.22054/jims.2020.88102.2986>
- karimi, H. , Jamshidi, M. and Bakhsham, M. (۲۰۲۳). Identifying components and driving indicators in green supply chain management based on Internet of Things. *Industrial Management Studies*, ۲۱(۶۹), ۱۲۹-۱۶۰. (In Persian) <https://doi.org/10.22054/jims.2023.60741.2702>
- Zahedi, A. E., & Haghighat, M. (۲۰۲۵). Barriers, capabilities and consequences of supply chain intelligence in Iranian industry. *Iranian Journal of Information Processing and Management*, ۴۱(۲), ۴۴۱-۴۶۸. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/jipm.2020.2061431.2019>

آماده انتشار