Industrial Management Studies
Vol. 24, No.81, 2026; P 181-216
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jims.2026.92638.3028

ATU PRESS

Original Research
Accepted: 13/06/2026
Revised: 12/06/2026
Received: 08/05/2026
eISSN: 2476-602X
ISSN: 2251/8029

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 * Department of Management, Faculty of Administration Sciences and Economics, Arak University, Arak, Iran.

Mehran Esmaeili Department of Management, Faculty of Humanities, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Iran.

Abstract

The oil and gas industry faces challenges such as the complexity of a multi-layered and global supply network, operational and geopolitical risks, cybersecurity threats in critical infrastructure, sustainability pressures, and the need for real-time data-driven decision-making. The main objective of the study was 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. The research was 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 was conducted using the Fuzzy Cognitive Mapping method. The study period was summer and fall 2025 and winter 2026. The population of the study was Iranian oil and gas industry experts, and 23 experts completed a structured questionnaire using purposive sampling. Achieving autonomy in the oil and gas supply chain was contingent upon the synergy and application of advanced digital technologies. Within this context, operational intelligence served as a crucial mediating factor, transforming technological capabilities into economic and environmental value. In other words, the establishment of data-driven digital infrastructure was the primary prerequisite for attaining sustainability, while resilience and trust within this ecosystem could only be realized through robust cybersecurity. The proposed model, functioning as a decision support system, empowered managers in this industry to optimally

* Corresponding Author: a-zahedimoghadam@araku.ac.ir

How to Cite: Zahedi, A. E., Esmaeili, M. (2026). 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, *Industrial Management Studies, 24(81)*, 181-216.

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 (IoT) 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 was 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 was 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 was summer and fall 2025 and winter 2026. The research aimed 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 used the fuzzy cognitive mapping method. The statistical population of the research included 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 10 years of relevant professional experience; managerial or specialized experience in digital or operational projects; and familiarity with analytical systems and smart infrastructures. A total of 23 experts completed the questionnaire. 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 and Conclusion

Findings from modeling using fuzzy cognitive mapping showed that the transition to an autonomous supply chain in the oil and gas industry was 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 were nonlinear, dynamic, and feedback in nature, and the impact of each variable became 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 had the greatest causal impact on other model components and acted 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 played a role beyond a control or protection factor and acted 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 was a direct consequence of the smartization of operational processes. Simulation scenarios showed that strengthening digital enablers indirectly reduced waste, increased energy efficiency, reduced carbon emissions, and strengthened economic sustainability.

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

مقاله پژوهشی
تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳
ISSN: 2251/8029
eISSN: 2476-602X

مطالعات مدیریت صنعتی
سال بیست و چهارم، شماره ۸۱، تابستان ۱۴۰۵، ص ۱۸۱ تا ۲۱۶
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jims.2026.92638.3028

طراحی چهارچوب زنجیره تأمین خودمختار مبتنی‌بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با رویکرد پایداری و امنیت سایبری

امیراحسان زاهدی * گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

مهران اسماعیلی گروه مدیریت، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، 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 (زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی) و نیاز به تصمیم‌گیری بلادرنگ مبتنی‌بر داده، مواجه است. هدف اصلی پژوهش حاضر طراحی و تحلیل چارچوب زنجیره تأمین خودمختار مبتنی بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با تأکید بر پایداری و امنیت سایبری است. پژوهش ازنظر هدف، کاربردی و توسعه‌ای؛ ازنظر ماهیت داده‌ها، آمیخته کیفی-کمی و ازنظر 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 به‌روش 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 به‌کارگیری فناوری‌های نوین دیجیتال است. در این میان، هوشمندی عملیاتی به‌عنوان یک عامل میانجی، نقش کلیدی در تبدیل ظرفیت‌های فناورانه به ارزش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ایفا می‌کند؛ به‌عبارت‌دیگر، استقرار زیرساخت‌های دیجیتال داده‌محور، پیش‌نیاز اصلی برای دستیابی به پایداری است؛ درحالی‌که تاب‌آوری و اعتماد در این اکوسیستم، تنها در سایه تأمین امنیت سایبری پایدار محقق خواهد شد. مدل ارائه‌شده در این پژوهش، به‌عنوان 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.

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

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

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 اشیاء صنعتی و سامانه‌های سایبر-فیزیکی، زمینه‌ساز گذار از زنجیره‌های تأمین سنتی و واکنشی به‌سمت 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 نسبت‌به اختلالات داخلی و خارجی واکنش تطبیقی نشان دهد (Koot et al.,۲۰۲۱; Radanliev et al., 2021). 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 اشیاء 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 مبتنی‌بر قواعد ازپیش تعریف‌شده نیست، بلکه بر پایه یادگیری مستمر، تحلیل الگوها و سازگاری پویا با محیط شکل می‌گیرد (Sunmola & Baryannis, 2026). این سطح از خودمختاری، به‌ویژه در صنایع پیچیده و پرریسک، می‌تواند مزیت رقابتی قابل‌توجهی در افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها، بهبود تاب‌آوری و ارتقاء قابلیت پاسخ‌گویی ایجاد کند.

صنعت نفت و گاز به‌عنوان یکی از راهبردی‌ترین صنایع جهان، به‌شدت وابسته‌به عملکرد اثربخش زنجیره تأمین است. این صنعت دارای زنجیره‌ای چندلایه، گسترده و به‌هم‌پیوسته است که از تأمین تجهیزات تخصصی و مواد اولیه تا عملیات استخراج، پالایش، انتقال و توزیع را دربر می‌گیرد. ماهیت سرمایه‌بر، پراکندگی جغرافیایی دارایی‌ها، وابستگی‌به زیرساخت‌های حیاتی، حساسیت به نوسانات ژئوپلیتیکی و الزام به تداوم عملیاتی، صنعت نفت و گاز را با پیچیدگی‌های مدیریتی قابل‌توجهی مواجه ساخته است. افزون‌بر این، اختلالات ناشی از بحران‌های ژئوپلیتیکی، نوسانات بازار جهانی انرژی، محدودیت‌های زیست‌محیطی و تغییرات سریع فناوری، ضرورت بازطراحی معماری زنجیره تأمین این صنعت را بیش‌از پیش آشکار کرده است (Onukwulu et al., 2025).

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 تجمیع و تحلیل حجم عظیمی از داده‌های ساختاریافته و غیرساختاریافته، بینش‌های راهبردی برای تصمیم‌گیری فراهم می‌آورد (Radhakrishnan et al., 2025). هم‌افزایی این فناوری‌ها، امکان گذار از مدیریت واکنشی به مدیریت پیش‌نگر و خودمختار را در صنعت نفت و گاز تسهیل می‌کند.

باوجوداین 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 (Mohammed et al., 2020; Radanliev et al., 2022).

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., 2023).

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., 2023; Mohsen et al., 2026). بااین‌حال، 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 اقتضائات خاص صنعت نفت و گاز توجه کرده‌اند. از سوی دیگر، اغلب پژوهش‌ها این فناوری‌ها را به‌صورت مجزا بررسی کرده‌اند و کمتر مطالعه‌ای چارچوبی جامع برای تحلیل

تعامل هم‌زمان این فناوری‌ها با مؤلفه‌های پایداری و امنیت سایبری ارائه داده است. همچنین، فقدان مدل‌های علّی 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 چارچوب 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 به‌عنوان محیطی با پیچیدگی عملیاتی و حساسیت راهبردی بالا؛ و چهارم، بهره‌گیری از مدل‌سازی علّی پویا برای تحلیل سناریوهای تحول دیجیتال و استخراج سیاست‌های بهینه مدیریتی.

براین‌اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر طراحی و تحلیل چارچوب 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, 2025).

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, 2026).

این مفهوم فراتر از اتوماسیون کلاسیک است. در اتوماسیون سنتی، فرآیندها بر اساس قواعد از پیش تعیین‌شده 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[1]: جمع‌آوری داده از محیط از طریق حسگرها، سامانه‌های ERP، تجهیزات هوشمند و شبکه‌های

1. Perception

اطلاعاتی.

۲. شناخت[1]: تحلیل داده‌ها و شناسایی الگوها از طریق الگوریتم‌های تحلیلی و یادگیری ماشین.

۳. تصمیم‌گیری[2]: انتخاب بهینه‌ترین اقدام بر اساس تحلیل شرایط.

۴. اقدام خودکار[3]: اجرای تصمیمات بدون مداخله انسانی (Radanliev et al., 2021).

مطالعات نشان داده‌اند که زنجیره‌های تأمین خودمختار می‌توانند مزایای متعددی ازجمله کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش انعطاف‌پذیری، ارتقای سرعت واکنش، بهبود تاب‌آوری و کاهش خطاهای انسانی ایجاد کنند (Ivanov & Dolgui, 2020).

تحول دیجیتال در زنجیره تأمین: تحول دیجیتال به فرآیند به‌کارگیری فناوری‌های نوین برای بازطراحی مدل‌های کسب‌وکار، فرآیندهای عملیاتی و سازوکارهای تصمیم‌گیری اطلاق می‌شود (Vial, 2019). 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[4]: تبدیل اطلاعات فیزیکی به داده‌های دیجیتال. ۲. دیجیتال‌سازی[5]: استفاده از فناوری برای بهبود فرآیندهای موجود. ۳. تحول دیجیتال[6]: بازآفرینی ساختاری زنجیره تأمین مبتنی بر فناوری (Büyüközkan & Göçer, 2018).

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., 2025)

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:

۱. پیش‌بینی تقاضا: مدل‌های یادگیری ماشین قادرند با تحلیل داده‌های تاریخی، متغیرهای محیطی و روندهای بازار، تقاضا را با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند (Min, 2019).

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

1. Cognition
2. Decision-making
3. Autonomous Execution
4. Digitization
5. Digitalization
6. Digital Transformation

تغییرات تقاضا تعیین کند.

۳. نگهداشت پیش‌بینانه: الگوریتم‌های تحلیلی با تحلیل داده‌های حسگرها، خرابی تجهیزات را پیش از وقوع شناسایی می‌کنند (Lee et al., 2018).

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

در صنعت نفت و گاز، هوش مصنوعی نقش کلیدی در مدیریت تجهیزات حساس، خطوط انتقال، پالایشگاه‌ها و برنامه‌ریزی عملیاتی دارد (Onukwulu et al., 2025).

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., 2020). ۴ ویژگی اصلی کلان‌داده عبارت‌اند از: حجم[1]، سرعت[2]، تنوع[3]، صحت[4]. 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, 2017).

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., 2022).

پایداری در زنجیره تأمین: پایداری در زنجیره تأمین به مدیریت هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی اطلاق می‌شود (Carter & Rogers, 2008). مدل سه‌بعدی پایداری شامل ابعاد زیر است:

---

1. Volume
2. Velocity
3. Variety
4. Veracity

۱. بعد اقتصادی: کاهش هزینه، سودآوری بلندمدت.
۲. بعد زیست‌محیطی: کاهش انتشار، مدیریت انرژی، کاهش ضایعات.
۳. بعد اجتماعی: ایمنی، مسئولیت اجتماعی، رفاه کارکنان.

در صنعت نفت و گاز، فشارهای قانونی و اجتماعی برای کاهش انتشار کربن و بهبود عملکرد زیست‌محیطی افزایش یافته است (Bibri et al., 2023). 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., 2020).

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 زیست‌محیطی شوند (Alrumaih et al., 2023)؛ بنابراین امنیت سایبری نه‌تنها یک ابزار حفاظتی، بلکه شرط لازم برای تحقق خودمختاری پایدار است.

یکی از نخستین مطالعات نظام‌مند در حوزه زنجیره تأمین دیجیتال توسط (Büyüközkan & Göçer, 2018) 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 علّی متغیرهاست؛ به مسئله خودمختاری تصمیم‌گیری نمی‌پردازد و نقش امنیت سایبری در چهارچوب پیشنهادی نادیده گرفته شده است.

(Hu & Ghadimi, 2025) 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، بااین‌حال، تمرکز آن بر تاب‌آوری است و ابعاد پایداری و امنیت سایبری کمتر بررسی شده‌اند و مدل ارائه‌شده بیشتر خطی است و تعاملات بازخوردی پیچیده را لحاظ نمی‌کند.

(Ivanov & Dolgui, 2020) 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 ازنظر نظری ارزشمند است اما فاقد تمرکز صنعتی خاص است و مکانیزم تحقق خودمختاری عملیاتی به‌صورت اجرایی مشخص نشده است.

(Sunmola & Baryannis, 2026) 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، بااین‌حال، بیشتر بر الگوریتم تمرکز دارد و ملاحظات امنیت سایبری و پایداری را وارد مدل نکرده است.

(Radhakrishnan et al., 2025) 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., 2022) 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 زنجیرهٔ تأمین در صنعت ایران» نشان دادند الزامات نرم‌افزاری، سخت‌افزاری و محیطی و سازمانی، شرایط علّی 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 مؤثر بر پیاده‌سازی صنعت ۴٫۰ در مدیریت زنجیره تاب‌آور» نشان دادند بعد مدیریتی-نهادی، تأثیرگذارترین و بعد عملیاتی تأثیرپذیرترین ابعاد در پیاده‌سازی صنعت ۴٫۰ در مدیریت زنجیره‌تأمین تاب‌آور است.

کریمی و همکاران (۱۴۰۲) پژوهشی باعنوان «شناسایی مؤلفه‌ها و شاخص‌های پیشران در مدیریت زنجیره تأمین سبز مبتنی بر اینترنت اشیاء»، انجام دادند. مؤلفه‌های شناسایی‌شده عبارت‌اند از: مدیریت هوشمند زنجیره تأمین، پایش لحظه‌ای وضعیت اشیاء، انتقال هوشمند اشیاء، مکان‌یابی هوشمند اشیاء، شفافیت اطلاعاتی، مدیریت کیفیت هوشمند، منبع یابی هوشمند، مدیریت توزیع هوشمند و مدیریت

موجودی هوشمند.

مرور مطالعات انجام‌شده 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 علّی یکپارچه بررسی کند.

پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین دارای نوآوری‌های زیر است: برای نخستین‌بار 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 به‌عنوان متغیر کنترلی، بلکه به‌عنوان توانمندساز خودمختاری مدل شده است. مدل قابلیت استفاده برای اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری دیجیتال، ارزیابی سناریوها و تصمیم‌گیری مدیریتی را دارد.

روش

پژوهش حاضر ازنظر هدف، کاربردی و توسعه‌ای؛ ازنظر ماهیت داده‌ها، آمیخته کیفی-کمی و ازنظر نحوه گردآوری داده‌ها، توصیفی است. بازه زمانی مطالعه تابستان، پائیز و زمستان ۱۴۰۴ می‌باشد. پژوهش باهدف طراحی چهارچوب زنجیره تأمین خودمختار مبتنی‌بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با رویکرد پایداری و امنیت سایبری، از روش نگاشت شناختی فازی[1] بهره می‌گیرد. روش FCM به دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط علّی پیچیده، حلقه‌های بازخوردی، عدم قطعیت و پویایی سیستم‌های اجتماعی-فنی، امکان سناریوسازی و قابل‌درک بودن برای خبرگان صنعتی، برای تحلیل ساختارهای تصمیم‌گیری در صنایع راهبردی نظیر نفت و گاز مناسب است. FCM ترکیبی از منطق فازی و شبکه‌های علّی است. در این روش، سیستم به‌صورت یک گراف جهت‌دار وزن‌دار مدل‌سازی می‌شود که در آن: گره‌ها (Nodes) بیان‌گر مفاهیم یا متغیرهای سیستم هستند. یال‌ها (Edges) روابط علّی 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

1 Fuzzy Cognitive Mapping (FCM)

دیجیتال، قابلیت‌های زنجیره تأمین خودمختار، پیامدهای عملکردی، پایداری و امنیت سایبری.

۲. طراحی پرسشنامه استخراج روابط علّی: پرسشنامه به‌صورت ساختاریافته طراحی شد تا خبرگان بتوانند جهت رابطه علّی 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+ به‌شرح 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 مثبت	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: به‌منظور تأمین روایی محتوایی ابزار، پرسشنامه در اختیار **۳** نفر از اعضای هیئت‌علمی متخصص در حوزه مدیریت زنجیره تأمین و سیستم‌های هوشمند قرار گرفت؛ **۲** نفر از مدیران ارشد صنعت نفت و گاز نیز ازنظر 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 به‌صورت 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 درمجموع پرسشنامه توسط **۲۳** خبره تکمیل شد. ویژگی‌های مشارکت‌کنندگان به‌شرح جدول **۲** است.

جدول ۲. ویژگی‌های خبرگان

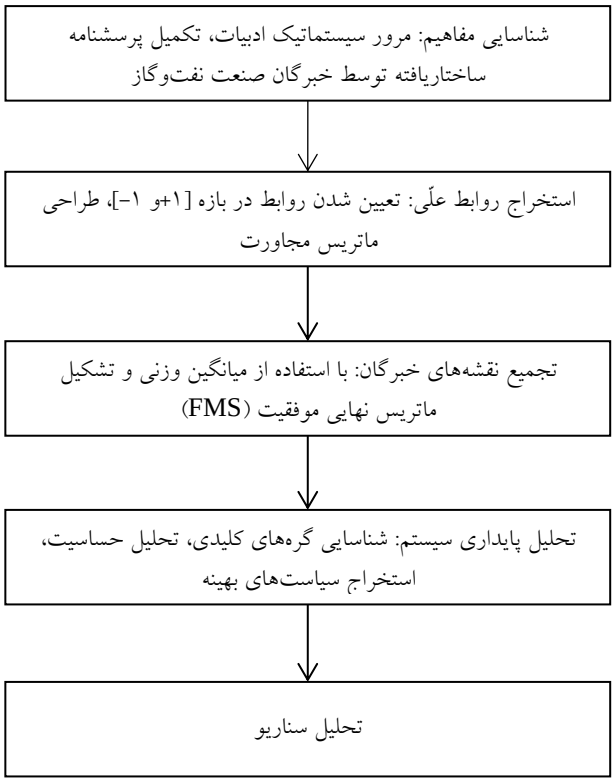
تحصیلات	فراوانی	سابقه کار	فراوانی	حوزه تخصصی	فراوانی
کارشناسی	۴	۱۰ تا ۱۵ سال	۷	مدیریت زنجیره تأمین	۷
کارشناسی ارشد	۸	۱۶ تا ۲۰ سال	۹	تحول دیجیتال و فناوری اطلاعات	۶
دکتری	۱۱	بیشتر از ۲۰ سال	۷	امنیت سایبری	۴
				مدیریت پایداری و HSE	۶

پس از تکمیل پرسشنامه‌ها، برای هر خبره یک ماتریس مجاورت (Adjacency Matrix) تشکیل شد؛ وزن‌های روابط در بازه [۱+،۱-] نرمال‌سازی گردید؛ میانگین وزنی نظرات خبرگان محاسبه شد؛ برای

سنجش میزان توافق خبرگان از ضریب هماهنگی کندال (Kendall's W) استفاده شد و باتوجه‌به ضریب محاسبه‌شده ۰/۸۳ در سطح معنی‌داری ۰/۰۰۱ 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 [۱،۰] گردید. ماتریس نهایی حاصل، مبنای تحلیل ساختاری و شبیه‌سازی سناریوها قرار گرفت. به‌منظور افزایش قابلیت اتکای نتایج، تحلیل حساسیت نسبت‌به 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، به‌منظور مدل‌سازی ساختار علّی زنجیره تأمین خودمختار مبتنی‌بر 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 علّی، 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 به‌صورت یک گره مستقل در گراف جهت‌دار مدل وارد گردید.

جدول ۳. متغیرهای زنجیره تأمین خودمختار مبتنی‌بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با رویکرد پایداری و امنیت سایبری

لایه	متغیر	نماد
توانمندسازهای دیجیتال	بلوغ هوش مصنوعی: الگوریتم‌های پیش‌بینی، یادگیری ماشین، بهینه‌سازی تصمیمات عملیاتی	C1
	زیرساخت کلان‌داده: یکپارچگی داده‌ها، کیفیت داده، تحلیل بلادرنگ	C2
	یکپارچگی اینترنت اشیاء: سنسورهای هوشمند، پایش لحظه‌ای تجهیزات، ردیابی دارایی‌ها	C3
	معماری دیجیتال یکپارچه: ERP یکپارچه، پلتفرم داده مشترک، API های صنعتی	C4
قابلیت‌های زنجیره تأمین خودمختار	پیش‌بینی هوشمند تقاضا	C5
	برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خودکار	C6
	لجستیک هوشمند	C7
	نگهداشت پیش‌بینانه	C8
	تصمیم‌گیری بلادرنگ	C9
پیامدهای عملکردی	تاب‌آوری زنجیره تأمین	C10
	کاهش هزینه‌های عملیاتی	C11
	چابکی سازمان	C12
	شفافیت زنجیره تأمین	C13
پایداری	کاهش انتشار کربن	C14
	بهره‌وری انرژی	C15
	کاهش ضایعات	C16
	پایداری اقتصاد بلندمدت	C17
امنیت سایبری	بلوغ حاکمیت سایبری	C18
	مدیریت ریسک سایبری	C19
	امنیت زیرساخت‌های حیاتی	C20
	اعتماد دیجیتال در اکوسیستم	C21

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

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

W_{ij} [-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 علّی 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 نرم‌افزار نمایش داده شد.

۳. تجمیع نقشه های خبرگان: برای تجمیع 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 تجمیع شدند. در صورت وجود اختلاف‌نظر بین خبرگان، وزن‌های مثبت و منفی به‌صورت 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[1] (FMS) تشکیل گردید که در جدول ۴ قابل‌مشاهده است.

جدول ٤. ماتریس نهایی موفقیت (FMS)

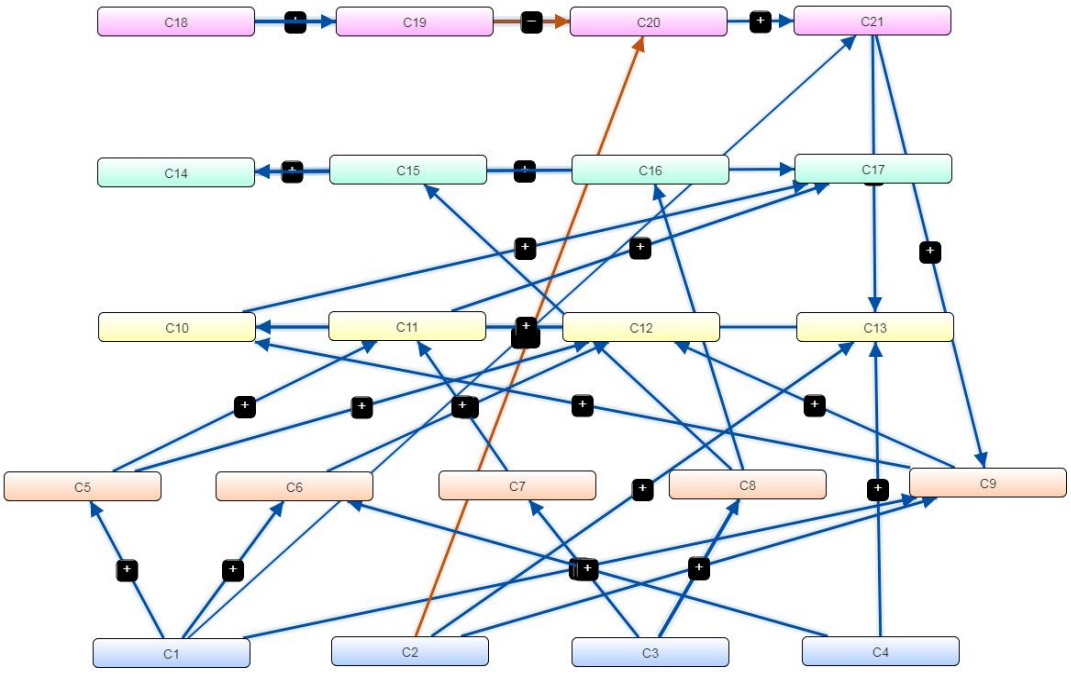
عوامل	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
C1	۰٫۸	۰٫۶	۰	۰	۰٫۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۴
C2	۰	۰	۰	۰	۰٫۸	۰	۰	۰	۰٫۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C3	۰	۰	۰٫۶	۰٫۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۵-	۰
C4	۰	۰٫۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C5	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۷	۰٫۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C6	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C7	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C8	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۸	۰٫۷	۰	۰	۰	۰	۰
C9	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۷	۰	۰٫۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C10	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۸	۰	۰	۰	۰
C11	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۷	۰	۰	۰	۰

1 Final Matrix of Success (FMS)

عوامل	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
C12	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C13	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C14	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۶	۰	۰	۰	۰
C15	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C16	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C17	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C18	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۷	۰٫۹	۰
C19	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۶-	۰
C20	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۸
C21	۰	۰	۰	۰	۰٫۵	۰	۰	۰	۰٫۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

نگاشت‌شناختی فازی باتوجه‌به ماتریس علّی و اعداد مربوط به یال‌ها در محیط نرم‌افزار ترسیم گردید که در شکل ۲ قابل‌مشاهده است.

شکل ۲. نگاشت زنجیره تأمین خودمختار مبتنی‌بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء با رویکرد پایداری و امنیت سایبری



۴. تحلیل پایداری سیستم: تحلیل پایداری سیستم بر اساس ۲ بعد شبیه‌سازی پویا و تحلیل حساسیت انجام شد.

۴,۱. اجرای شبیه‌سازی پویا: با مقداردهی یکنواخت (۰,۵ برای همه مفاهیم)، سیستم در حالت « Dynamic Simulation» اجرا شد. معیار توقف در نرم‌افزار، رسیدن به همگرایی پایدار (Stable State) بود و زمانی رخ می دهد که تغییرات متوالی مقادیر مفاهیم ناچیز گردد. پس از اجرای شبیه‌سازی پویا در محیط نرم‌افزار: سیستم پس از ۱۸ تکرار به حالت تعادل پایدار رسید؛ مقادیر قابلیت‌های خودمختار در سطح بالا تثبیت شد؛ شاخص های پایداری به سطح متوسط روبه بالا افزایش یافت؛ اعتماد دیجیتال در صورت تقویت امنیت زیرساخت‌ها به سطح مطلوب رسید. این یافته نشان می‌دهد مدل پیشنهادی دارای رفتار همگرا و پایدار است.

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 به‌صورت گام‌به‌گام 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 درحالتی که روابط امنیت سایبری بیش از ۲۰ درصد تضعیف شد، اعتماد دیجیتال و تاب‌آوری به‌شدت 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: درنهایت، به تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌ها بر اساس شاخص‌های مرکزیت، درجه اثرگذاری و درجه اثرپذیری، پرداخته شد.

درجه اثرگذاری (Outdegree)، مجموع میزان مقادیر فازی خروجی (علّی) 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 5 قابل‌مشاهده 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
یکپارچگی اینترنت اشیاء	۰	۱,۵	۱,۵
معماری دیجیتال یکپارچه	۰	۱,۳	۱,۳
پیش‌بینی هوشمند تقاضا	۰,۸	۱,۲	۲
برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خودکار	۱,۳	۰,۶	۱,۹
لجستیک هوشمند	۰,۶	۰,۶	۱,۲
نگهداشت پیش‌بینانه	۰,۹	۱,۵	۲,۴
تصمیم‌گیری بلادرنگ	۲	۱,۵	۳,۵
تاب‌آوری زنجیره تأمین	۲,۱	۰,۸	۲,۹
کاهش هزینه‌های عملیاتی	۱,۳	۰,۷	۲
چابکی سازمان	۱,۹	۰,۸	۲,۷
شفافیت زنجیره تأمین	۱,۹	۰,۶	۲,۵
کاهش انتشار کربن	۱,۴	۰,۶	۲
بهره‌وری انرژی	۰,۸	۰,۸	۱,۶
کاهش ضایعات	۰,۷	۰,۶	۱,۳
پایداری اقتصاد بلندمدت	۲,۱	۰	۲,۱
بلوغ حاکمیت سایبری	۰	۱,۶	۱,۶
مدیریت ریسک سایبری	۰,۷	۰,۶	۱,۳
امنیت زیرساخت‌های حیاتی	۲	۰,۸	۲,۸
اعتماد دیجیتال در اکوسیستم	۱,۲	۱,۲	۲,۴

۵,۱. شناسایی متغیرهای پیشران (Driving Variables): نتایج نشان داد ۳ متغیر دارای بیشترین درجه خروجی عبارت‌انداز: 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 مربوط‌به متغیرهای

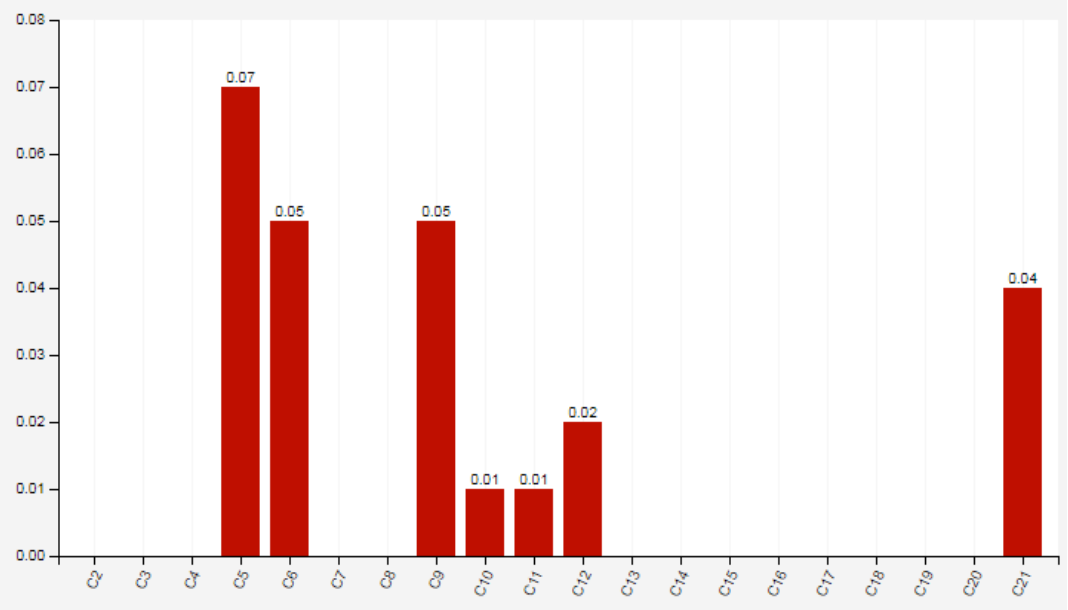
تاب‌آوری زنجیره تأمین، پایداری اقتصادی بلندمدت و اعتماد دیجیتال بود. این نتایج نشان می‌دهد پیامدهای نهایی سیستم در سطح تاب‌آوری و پایداری اقتصادی شکل می‌گیرد و اعتماد دیجیتال نقش واسطه‌ای مهمی در انتقال اثرات امنیت سایبری به عملکرد عملیاتی دارد.

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

۶. تحلیل سناریوها: سناریوهای محتمل بر اساس مهم‌ترین گره‌های شناسایی‌شده به‌شرح زیر تحلیل شد.

۶,۱. سناریوی تقویت هوش مصنوعی: با افزایش مقدار اولیه متغیر بلوغ هوش مصنوعی (C1) به ۰,۹: تصمیم‌گیری بلادرنگ به‌شدت 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 به‌عنوان اهرم تحول سیستم عمل می‌کند و اثرات غیرمستقیم آن از طریق حلقه‌های بازخوردی تقویت می‌شود. تغییرات حاصل از تقویت هوش مصنوعی در شکل ۳ قابل‌مشاهده است.

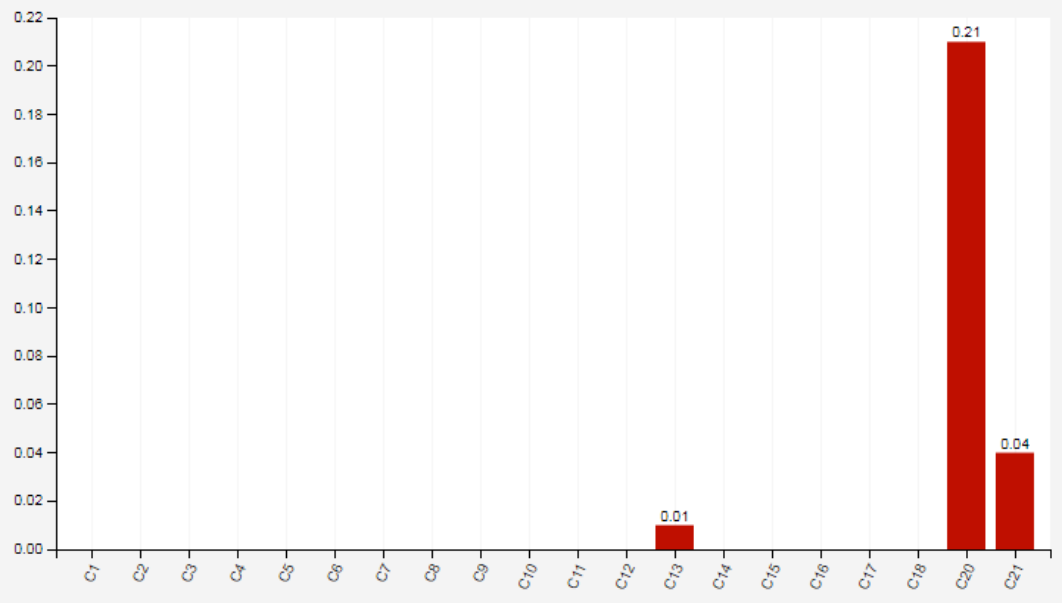
شکل ۳. سناریوی تقویت هوش مصنوعی



۶,۲. سناریوی تشدید تهدیدات سایبری: با افزایش منفی مقدار اولیه متغیر مدیریت ریسک سایبری (C19) (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

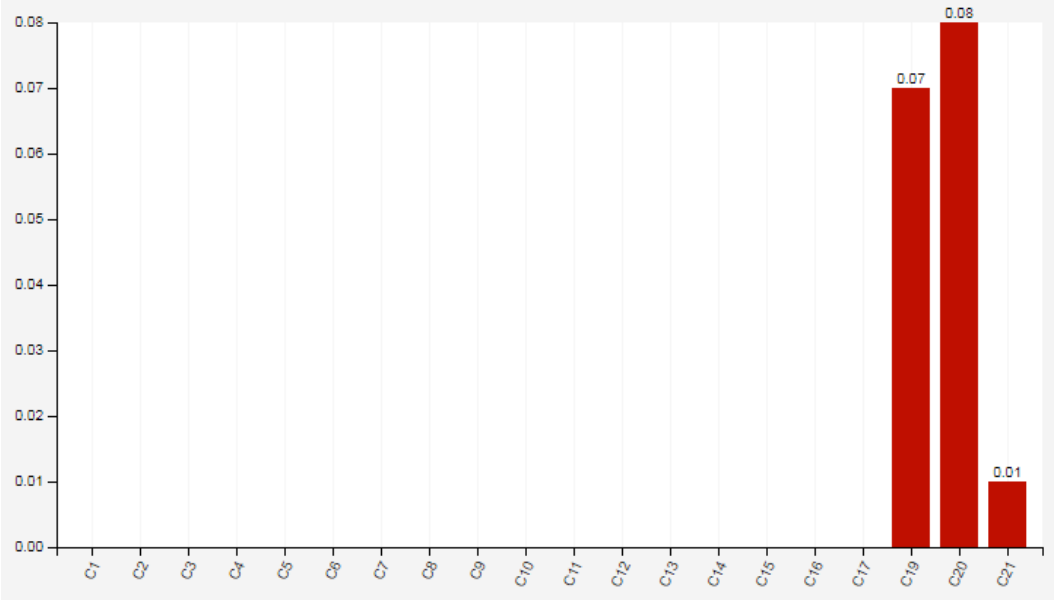
اختلالات امنیت سایبری است. تغییرات حاصل از تشدید تهدیدات سایبری در شکل ۴ قابل‌مشاهده است.

شکل ٤. سناریوی تشدید تهدیدات سایبری



۶,۳. سناریوی تقویت حاکمیت سایبری: با افزایش مقدار اولیه متغیر بلوغ حاکمیت سایبری (C18) 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 نه‌تنها یک عامل کنترلی، بلکه یک توانمندساز عملکرد پایدار است. تغییرات حاصل از تقویت حاکمیت سایبری در شکل ۵ قابل‌مشاهده است.

شکل ۵. سناریوی تقویت حاکمیت سایبری



تحلیل سناریوهای انجام‌شده 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 برخورد است.

نمودار ساختاری زنجیره تأمین خودمختار مبتنی‌بر 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. به‌صورت 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 علّی جهت‌دار 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 داده 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 علّی 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. به‌بیان‌دیگر، توانمندسازهای دیجیتال زمانی به خلق ارزش منجر می‌شوند که در قالب این قابلیت‌ها نهادینه شوند. روابط میان این مؤلفه‌ها نیز تعاملی و هم‌افزا است؛ به‌گونه‌ای که بهبود در پیش‌بینی تقاضا موجب ارتقاء کیفیت برنامه‌ریزی و نگهداشت پیش‌بینانه موجب افزایش قابلیت اطمینان لجستیکی 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 هزینه ها، 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 به‌عنوان یک متغیر مستقل، بلکه به‌عنوان 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، سرمایه‌گذاری مجدد در فناوری‌های دیجیتال را تقویت نماید که خود یک حلقه بازخوردی تقویتی ایجاد می‌کند.

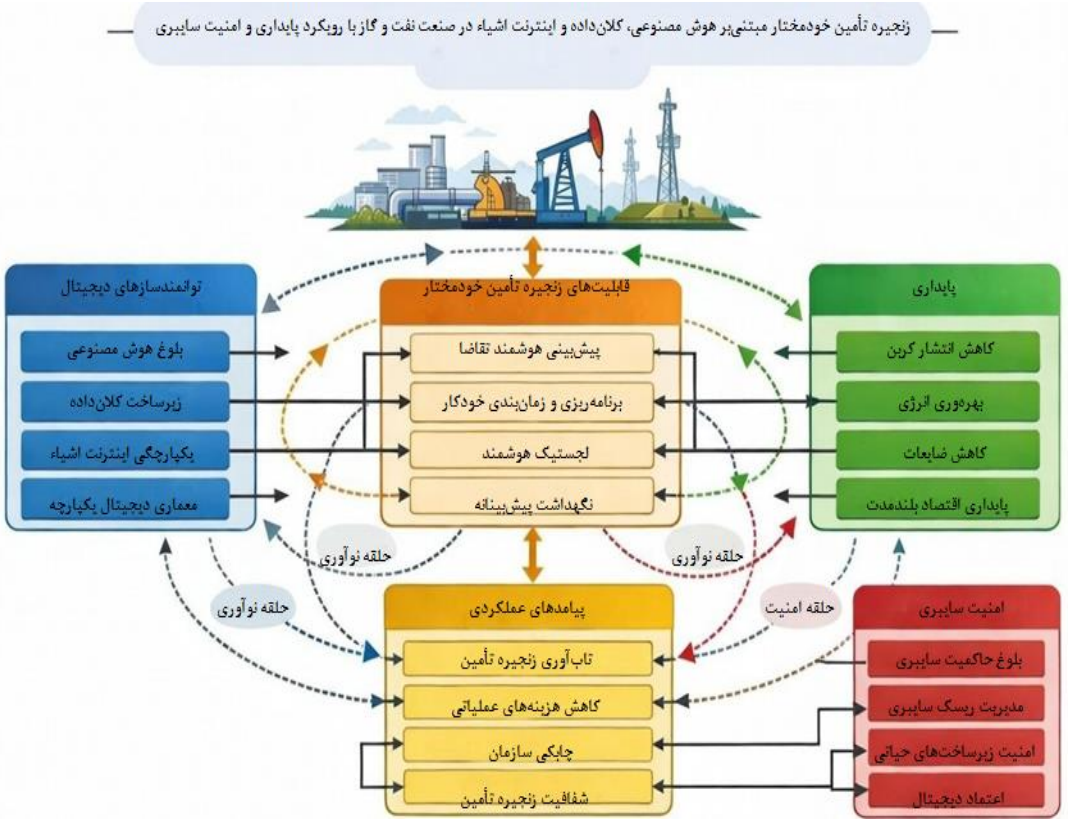
بعد امنیت سایبری امنیت سایبری در این مدل نقش سازوکار تثبیت‌کننده و تعدیل‌کننده را ایفا می‌کند. این بعد شامل بلوغ حاکمیت سایبری، مدیریت ریسک سایبری، امنیت زیرساخت‌های حیاتی و اعتماد دیجیتال است. با افزایش سطح دیجیتالی‌شدن و اتصال‌پذیری سیستم، آسیب‌پذیری سایبری نیز

افزایش می یابد. درنتیجه، 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؛ به‌گونه‌ای که ضعف در این حوزه می‌تواند موجب کاهش اعتماد دیجیتال، اختلال در شفافیت و تضعیف تاب‌آوری شود. در مقابل، تقویت حاکمیت سایبری موجب تثبیت و پایداری کل سیستم خواهد شد.

مدل مفهومی پژوهش حاضر یک ساختار شبکه‌ای غیرخطی با روابط چندجهته و بازخوردی را ترسیم می‌کند که در آن: توانمندسازهای دیجیتال پیشران‌های اولیه تحول‌اند؛ قابلیت‌های خودمختار هسته خلق ارزش عملیاتی هستند؛ پیامدهای عملکردی حلقه اتصال عملیات و راهبرد محسوب می‌شوند؛ پایداری هدف توسعه بلندمدت سیستم است؛ و امنیت سایبری شرط لازم تداوم و ثبات سیستم دیجیتال به‌شمار می‌رود.

لازم به ذکر است این پژوهش بر عوامل کلیدی و درونی مؤثر بر زنجیره تأمین خودمختار صنعت نفت و گاز تمرکز دارد. محدوده سیستم موردمطالعه شامل توانمندسازهای دیجیتال، قابلیت‌های خودمختار، پیامدهای عملکردی، پایداری و امنیت سایبری است. متغیرهایی مانند تحریم‌ها، ریسک ژئوپلیتیک و وابستگی به تأمین‌کنندگان خارجی، اگرچه می‌توانند بر سیستم تأثیرگذار باشند، اما به‌عنوان عوامل محیطی خارجی در نظر گرفته شده‌اند که خارج از روابط علی داخلی موردبررسی در این مدل قرار می‌گیرند. 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 می‌شود.

شکل ٦. نمودار ساختاری زنجیره تأمین خودمختار مبتنی‌بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء 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 مبتنی‌بر هوش مصنوعی، کلان داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با تأکید بر پایداری و امنیت سایبری بود. یافته‌های حاصل از مدل سازی 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 کلان‌داده 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 علّی را بر سایر مؤلفه‌های مدل دارند و به‌عنوان موتور محرک تحول دیجیتال عمل می‌کنند. این یافته با نتایج پژوهش‌های (Hu & Ghadimi, 2025; Sunmola & Baryannis, 2026) همسو است که بر نقش فناوری‌های هوشمند در بازآفرینی ساختار تصمیم‌گیری زنجیره تأمین تأکید کرده‌اند. بااین‌حال، 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. به‌عبارت‌دیگر، 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 به‌صورت 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» به‌عنوان 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., 2025) همخوانی دارد که «تصمیم‌گیری داده‌محور» دارای بالاترین امتیاز مرکزیت بوده و آن را زیربنای زنجیره‌های تأمین هوشمند معرفی کرده‌اند. بااین‌حال، 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.

یافته های 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 قابل‌توجه اعتماد دیجیتال، کاهش شفافیت زنجیره، تضعیف تصمیم‌گیری بلادرنگ و درنهایت افت تاب‌آوری سیستم شد.

این یافته با پژوهش (Mohammed et al., 2022) همسو است که بر آسیب‌پذیری فزاینده زیرساخت‌های صنعتی دیجیتال تأکید دارند. بااین‌حال، نوآوری پژوهش حاضر در آن است که امنیت سایبری را نه‌تنها 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 شکنندگی 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., 2023) 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؛ به‌گونه‌ای که تحول دیجیتال نه صرفاً به‌عنوان پروژه فناوری، بلکه به‌عنوان راهبرد تحقق اهداف ESG و توسعه پایدار تعریف شود.

بر اساس یافته‌های پژوهش، می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد: خودمختاری زنجیره تأمین در صنعت نفت و گاز مبتنی‌بر 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، مشروط‌بر آنکه زیرساخت دیجیتال به‌درستی 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 به‌عنوان ابزار پشتیبان تصمیم برای مدیران صنعت نفت و گاز مورداستفاده 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 درگرو 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. به‌منظور کاهش خطای ذهنی خبرگان در تعیین روابط، ترکیب روش نگاشت‌شناختی فازی با مدل‌سازی معادلات ساختاری پیشنهاد می‌گردد. در این راستا، پیشنهاد می‌شود فرضیه «تأثیر معنادار متغیرهای ریسک بر بهره‌وری عملیاتی» با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده 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» به‌عنوان

ورودی مدل تعریف و رفتار سیستم در بلندمدت تحلیل شود.

سپاسگزاری

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

تعارض منافع

تعارض منافع نداریم.

ORCID

Amir Ehsan Zahedi http://orcid.org/0000-0001-9491-9023
Mehran Esmaeili http://orcid.org/0009-0009-8745-9749

پیوست ۱. پرسشنامه پژوهش

بسمه‌تعالی

پاسخگوی گرامی؛

با عرض سلام و خسته نباشید، پرسشنامه حاضر به‌منظور «طراحی چهارچوب زنجیره تأمین خودمختار مبتنی‌بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با رویکرد پایداری و امنیت سایبری» تنظیم گردیده است. لذا خواهشمندیم با تکمیل پرسشنامه ذیل ما را در دستیابی به نتیجه‌ای منطقی و قابل‌اعتماد مساعدت نمایید. مطمئناً نظرات شما عزیزان در دستیابی به هدف پژوهش مؤثر خواهد بود. خواهشمندیم ضمن مطالعه صفحات پیوست، نظر خود را در مورد هر یک از سنجه‌های مطرح‌شده اعلام فرمایید.

با تشکر فراوان

ویژگی‌های فردی:

۱. مدرک تحصیلی: کارشناسی☐ کارشناسی ارشد☐ دکتری ☐

۲. حوزه تخصصی: مدیریت زنجیره تأمین ☐فناوری اطلاعات و تحول دیجیتال ☐امنیت سایبری HSE☐ و پایداری ☐

۳. سابقه فعالیت حرفه‌ای: ۱۰ تا ۱۵ سال ☐۱۶ تا ۲۰ سال ☐بیش از ۲۰ سال ☐

۴. سمت سازمانی: کارشناس ارشد ☐مدیر میانی ☐مدیر ارشد ☐مشاور ☐عضو هیئت‌علمی ☐

لطفاً میزان تأثیر متغیرها را بر اساس طیف تعریف‌شده در جدول نشانه‌گذاری نمایید.

گویه	تأثیر بسیار قوی مثبت	تأثیر قوی مثبت	تأثیر متوسط مثبت	تأثیر ضعیف مثبت	بدون تأثیر	تأثیر ضعیف منفی	تأثیر متوسط منفی	تأثیر قوی منفی	تأثیر بسیار قوی منفی
بلوغ هوش مصنوعی تا چه اندازه بر پیش‌بینی هوشمند تقاضا تأثیر دارد؟									
بلوغ هوش مصنوعی تا چه اندازه بر برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خودکار تأثیر دارد؟									
بلوغ هوش مصنوعی تا چه اندازه بر تصمیم‌گیری بلادرنگ تأثیر دارد؟									
زیرساخت کلان‌داده تا چه اندازه بر پیش‌بینی هوشمند تقاضا تأثیر دارد؟									
زیرساخت کلان‌داده تا چه									

گویه	تأثیر بسیار قوی مثبت	تأثیر قوی مثبت	تأثیر متوسط مثبت	تأثیر ضعیف مثبت	بدون تأثیر	تأثیر ضعیف منفی	تأثیر متوسط منفی	تأثیر قوی منفی	تأثیر بسیار قوی منفی
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 علّی 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

۱. حسینی، مریم، عندلیب اردکانی، داود، ناصر صدرآبادی، علیرضا و حسینی بامکان، سید مجتبی. (۱۴۰۴). ارائه مدل شبکه‌ای عوامل مؤثر بر پیاده‌سازی صنعت ۴٫۰ در مدیریت زنجیره تاب‌آور. *مطالعات مدیریت صنعتی*، ۲۳ (۷۸)، ۱۹۷-۲۴۱. https://doi.org/10.22054/jims.2025.88102.2986

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

۳. 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)، ۱۲۹-۱۶۰. https://doi.org/10.22054/jims.2023.65741.2752

References

4. Alrumaih, T. N. I., Alenazi, M. J. F., AlSowaygh, N. A., Humayed, A., & Alablani, I. A. (2023). Cyber resilience in industrial networks: A state of the art, challenges, and future directions. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 35*, Article 101781. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101781
5. Bibri, S. E., Alexandre, A., & Sharifi, A. (2023). 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, 6*, Article 9, 1–35. https://doi.org/10.1186/s42162-023-00259-2
6. Büyüközkan, G., & Göçer, F. (2018). Digital supply chain: Literature review. *Computers in Industry, 98*, 157–177. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.02.010
7. Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 38*(5), 360–387. https://doi.org/10.1108/09600030810882816
8. Hu, Y., & Ghadimi, P. (2025). Developing supply chain resilience with advanced digital technology: A review. *IFAC-PapersOnLine, 59*(10), 2880–2885. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.484
9. Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks. *International Journal of Production Research, 58*(10), 2904–2915. https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1750727
10. Ivanov, D., Tsipoulanidis, A., & Schönberger, J. (2025). *Global supply chain and operations management*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95859-5
11. Kache, F., & Seuring, S. (2017). Challenges and opportunities of digital information at the intersection of big data analytics and supply chain management. *International*

Journal of Operations & Production Management, 37(1), 10–36. https://doi.org/10.1108/IJOPM-02-2015-0078

12. Koot, M., Mes, M., & Iacob, M. E. (2021). A systematic literature review of supply chain decision making supported by the Internet of Things and big data analytics. *Computers & Industrial Engineering, 154*, Article 107076. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107076
13. Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial AI. *Manufacturing Letters, 18*, 20–23. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002
14. Min, H. (2019). Artificial intelligence in supply chain management. *International Journal of Logistics Research and Applications, 23*(1), 1–19. https://doi.org/10.1080/13675560902736537
15. Mohammed, A. S., Reinecke, P., Burnap, P., Rana, O., & Anthi, E. (2022). Cybersecurity challenges in the offshore oil and gas industry: An industrial cyber-physical systems perspective. *Computers & Security*, *118*, Article 102731. https://doi.org/10.1145/3548691
16. Mohsen, B. M., Nahleh, Y. A., & Mohsen, M. (2026). Sustainable digitalization of manufacturing supply chains: An integrated framework for resilience, efficiency, and circularity. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, *19*, Article 100325. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2026.100325
17. Onukwulu, E. C., Agho, M. O., Eyo-Udo, N. L., Sule, A. K., & Azubuike, C. (2025). Advances in automation and AI for enhancing supply chain productivity in oil and gas. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science, 10*(1), 654–687. https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2024.912057
18. Radanliev, P., De Roure, D., Nicolescu, R., Huth, M., & Santos, O. (2021). Artificial intelligence and the Internet of Things in Industry 4.0. *CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction, 3*(4), 329–338. https://doi.org/10.1007/s42486-021-00057-3
19. Radanliev, P., De Roure, D., Page, K., Nurse, J. R. C., & Santos, O. (2020). Cyber risk at the edge: Current and future trends on cyber risk analytics and artificial intelligence in the industrial Internet of Things and Industry 4.0 supply chains. *Cybersecurity, 3*, Article 13, 1–21. https://doi.org/10.1186/s42400-020-00052-8
20. Radhakrishnan, G. V., Gabhane, M., Jha, S., Al Said, N., & Murthy, B. S. N. V. R. (2025). AI and IoT in supply chains: Creating intelligent and autonomous business operations. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, *10*(11), 1–18. https://doi.org/10.52783/jisem.v10i11s.1664
21. Sunmola, F., & Baryannis, G. (2026). Strategic and autonomous orchestration of artificial intelligence and blockchain integration for supply chains. *Systems, 14*(4), Article 363. https://doi.org/10.3390/systems14040363
22. Vial, G. (2019). Understanding digital transformation. *Journal of Strategic Information Systems*, *28*(2), 118–144. https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003
23. Wamba, S. F., Gunasekaran, A., Akter, S., Ren, S. J.-F., Dubey, R., & Childe, S. J. (2017). Big data analytics and firm performance: Effects of dynamic capabilities. *Journal of Business Research, 70*, 356–365. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.08.009

References [In Persian]

1. Zahedi, A. E., & Haghighat, M. (2025). Barriers, capabilities and consequences of supply chain intelligence in Iranian industry. *Iranian Journal of Information Processing and Management, 41*(2), 441–468. https://doi.org/10.22034/jipm.2025.2061431.2019 [In Persian]
2. Karimi, H., Jamshidi, M. J., & Bakhsham, M. (2023). Identifying components and driving indicators in green supply chain management based on Internet of Things. *Industrial Management Studies, 21*(69), 129–160. https://doi.org/10.22054/jims.2023.65741.2752 [In Persian]
3. Hosinie, M., Andalib Ardakani, D., Naser Sadrabadi, A., & Hosseini Bamkan, S. M. (2025). Presenting a network model of influencing factors in the implementation of Industry 4.0 in resilient supply chain management. *Industrial Management Studies, 23*(78), 197–241. https://doi.org/10.22054/jims.2025.88102.2986 [In Persian]

استناد به این مقاله: زاهدی، امیراحسان.، اسماعیلی، مهران. (۱۴۰۵). طراحی چهارچوب زنجیره تأمین خودمختار مبتنی‌بر هوش مصنوعی، کلان‌داده و اینترنت اشیاء در صنعت نفت و گاز با رویکرد پایداری و امنیت سایبری، *مدیریت صنعتی، ۲۴(۸۱)*، ۱۸۱-۲۱۶.
DOI: 10.22054/jims.2026.92638.3028

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