



Journal Website

Article history:
Received 18 May 2026
Revised 15 September 2026
Accepted 21 September 2026
Initial Publication 21 September 2026
Final Publication 22 December 2027

Dynamic Management and Business Analysis

Volume 6, Issue 5, pp 1-29



E-ISSN: 3041-8933

Identification and Prioritization of Key Factors for Implementing Open Innovation in the Steel Industry Supply Chain

Mostafa. Zolfaghari¹, Mehdi. Roghani^{2*}, Shabnam. Razavian³

¹ Department of Management, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Management, Om.C., Islamic Azad University, Omidiyeh, Iran

³ Department of Mathematics, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

* Corresponding author email address: m.roghani2014@iau.ac.ir

Article Info

Article type:

Original Research

How to cite this article:

Zolfaghari, M., Roghani, M., & Razavian, S. (2027). Identification and Prioritization of Key Factors for Implementing Open Innovation in the Steel Industry Supply Chain. *Dynamic Management and Business Analysis*, 6(5), 1-29.

<https://doi.org/10.61838/dmbaj.439>



© 2027 the author(s). Published by Knowledge Management Scientific Association. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) License.

ABSTRACT

Objective: This study aimed to identify, structure, prioritize, and validate the key factors affecting the implementation of open innovation in the steel industry supply chain of Khuzestan.

Methods and Materials: A sequential exploratory mixed-methods design was employed. In the qualitative phase, 15 academic and executive experts from the steel industry were selected through purposive and snowball sampling, and data were collected using semi-structured interviews. Interpretive Structural Modeling was applied to determine relationships and hierarchical levels among the extracted factors, while MICMAC analysis was used to assess driving power and dependence. In the quantitative phase, a researcher-developed questionnaire was distributed to 110 participants, of whom 100 provided valid responses. The model was validated using partial least squares structural equation modeling in SmartPLS.

Findings: The qualitative phase identified 16 key factors. ISM revealed a five-level hierarchical structure in which macro-environmental and governance factors had the highest driving power of 16 and the lowest dependence of 1, whereas performance evaluation and key performance indicators had the lowest driving power of 1 and the highest dependence of 16. Legal and intellectual property factors also emerged as major drivers, with a driving power of 15 and dependence of 2. MICMAC analysis classified 12 factors as linkage variables and identified no autonomous factors. In the measurement model, factor loadings exceeded 0.83, Cronbach's alpha ranged from 0.806 to 0.873, composite reliability ranged from 0.884 to 0.921, and AVE ranged from 0.718 to 0.795. The Fornell-Larcker and HTMT criteria further confirmed discriminant validity.

Conclusion: Open innovation implementation in the steel supply chain is a systemic and multilevel process that requires interventions to begin with macro-level and legal drivers, followed by technological and networking infrastructures and subsequently organizational, knowledge-based, and human factors.

Keywords: Open Innovation, Supply Chain, Steel Industry, Interpretive Structural Modeling, MICMAC, Partial Least Squares

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The steel industry is one of the most strategically important and capital-intensive industrial sectors, with extensive upstream and downstream linkages to mining, energy, transportation, construction, infrastructure, automotive manufacturing, and international trade. Its supply chain is characterized by complex interactions among raw-material suppliers, production units, logistics providers, technology developers, distributors, and industrial customers. Consequently, disruptions, technological changes, environmental pressures, and market fluctuations occurring in one part of the system may propagate throughout the entire chain. Effective steel supply chain management therefore requires not only operational coordination but also the integration of technological, organizational, environmental, and strategic capabilities (Alam, 2025). Optimization studies have similarly demonstrated that steel supply chain decisions increasingly need to balance economic performance with sustainability, resilience, and multiple operational objectives (Askary et al., 2024). At the same time, contemporary industrial competition has weakened the effectiveness of closed innovation models in which knowledge generation and technological development are confined to organizational boundaries. Open innovation provides an alternative approach by enabling firms to deliberately exchange knowledge, ideas, technologies, and complementary resources with suppliers, customers, universities, research centers, technology firms, and other external partners. Evidence indicates that open innovation can contribute to business-model renewal and the creation of new value configurations (Yun et al., 2025), while the combination of Industry 4.0 capabilities and open innovation practices can facilitate the renewal of industrial clusters and established manufacturing systems (Zen et al., 2025). In supply chains, this logic extends innovation beyond the boundaries of individual firms and emphasizes the development of collaborative ecosystems. Research on open supply chain management has shown that integration of open innovation with digital twin networks can support the emergence of more intelligent, connected, and collaborative supply chains (Rahmanzadeh et al., 2023). Strategic alignment between open innovation and supply chain relationships can likewise contribute to sustainable competitive advantage (Gonyora et al., 2021). Digital technologies constitute another important enabler. Internet of Things technologies can improve visibility, traceability, coordination, and real-time information exchange (De Vass et al., 2021); the combined application of IoT and artificial intelligence can improve logistics and transportation decisions (Bhargava et al., 2022; Singh et al., 2021); and AI-enabled supply chain management can enhance information processing and decision support (Sharma & Dash, 2023). More broadly, artificial intelligence applications demonstrate the growing importance of data-driven capabilities in complex technological systems (Zohuri & Behgounia, 2023). In the steel industry specifically, Industry 4.0 strategies require alignment between technological investment, organizational readiness, and supply chain priorities (Motallebi et al., 2025), while open innovative approaches to demand forecasting and inventory management can improve responsiveness to market uncertainty (Sukolkit et al., 2024). Sustainability further intensifies the need for collaborative innovation. The transition toward low-carbon and defossilized steel requires extensive restructuring of energy, material, and logistics networks (Lopez et al., 2023), while green transformation in iron and steel depends on broader changes in innovation systems rather than isolated technological improvements (Mallett & Pal, 2022). Open innovation can support sustainability by mobilizing knowledge from multiple stakeholders

(do Prado et al., 2025) and facilitating sustainability transitions across organizational and ecosystem boundaries (Viale et al., 2022). Digital traceability technologies such as RFID and blockchain can further support circular steel supply chains (Rakshit et al., 2025), while open innovation frameworks integrating quality and life-cycle considerations can strengthen sustainable product development (Gajdzik et al., 2024). Nevertheless, steel supply chains continue to face managerial, operational, technological, and environmental barriers (Kumar et al., 2025), and their interconnected feedback structures make isolated interventions insufficient (Mohammadi et al., 2022). Effective implementation therefore requires strategic alignment (Wang, 2024), appropriate mechanisms for converting external knowledge into sustainable business value (Huang & Zhou, 2025), and a systematic understanding of the relative influence and dependence of implementation factors. Accordingly, the present study aimed to identify, structure, validate, and prioritize the key factors affecting the implementation of open innovation in the steel industry supply chain, with particular emphasis on the steel industry of Khuzestan.

Methods and Materials

This applied study adopted a sequential exploratory mixed-methods design comprising qualitative and quantitative phases. In the qualitative phase, relevant scientific literature and professional documents were initially reviewed to establish the preliminary conceptual framework. Semi-structured interviews were then conducted with 15 academic and executive experts selected through purposive and snowball sampling until theoretical saturation was reached. The participants consisted of five senior and middle managers from steel-related companies, seven specialists working in different areas of the supply chain, including raw-material procurement, production, inventory, logistics, distribution, and research and development, and three consultants or university academics familiar with open innovation and supply chain management. Interview questions addressed organizational responses to technological problems, collaboration with external partners, knowledge sharing, intellectual property, information infrastructure, organizational barriers, supplier and customer involvement, and the expected consequences of open innovation. The qualitative data were coded and organized into principal factors, and expert consensus was used to refine the final factor structure. Interpretive Structural Modeling was subsequently employed to determine pairwise relationships, construct the Structural Self-Interaction Matrix, develop the initial and final reachability matrices, identify factor levels, and derive the hierarchical model. MICMAC analysis was then conducted to classify factors according to their driving power and dependence. In the quantitative phase, a researcher-developed questionnaire based on the qualitative findings was distributed electronically to 110 eligible participants, from whom 100 valid questionnaires were obtained. The final sample consisted of 20 managers and supervisors, 40 technical experts and specialists, and 40 operational employees. Items were rated on a five-point Likert scale ranging from 1, completely disagree, to 5, completely agree. Data were analyzed using SPSS and SmartPLS. The reflective measurement model was evaluated through factor loadings, Cronbach's alpha, composite reliability, average variance extracted, the Fornell-Larcker criterion, and the heterotrait-monotrait ratio. The structural model was assessed using standardized path coefficients and bootstrapped t statistics, with an absolute t value greater than 1.96 regarded as statistically significant at the 95% confidence level.

Findings

The qualitative analysis identified 16 key factors affecting open innovation implementation: strategic and managerial factors; cultural and human factors; structural and organizational factors;

financial and economic factors; legal and intellectual property factors; technological and infrastructural factors; networking and ecosystem factors; supplier-related factors; customer and market factors; environmental and sustainability factors; macro-environmental and governance factors; risk management and resilience; knowledge management and absorptive capacity; human resource and talent management; performance evaluation and key performance indicators; and digital transformation and smartification. ISM analysis produced a five-level hierarchical structure. At the lowest and most influential level, macro-environmental and governance factors emerged as the fundamental driver. Legal and intellectual property, technological and infrastructural, networking and ecosystem, environmental and sustainability, and digital transformation factors formed the fourth, infrastructural level. Cultural and human, structural and organizational, financial and economic, supplier-related, risk and resilience, knowledge management, and human resource factors formed the third and most interaction-intensive level. Strategic and managerial factors together with customer and market factors constituted the second level as intermediate outcomes, while performance evaluation and key performance indicators occupied the first and most dependent level as the final system outcome.

The final reachability matrix reinforced this hierarchy. Macro-environmental and governance factors had the maximum driving power of 16 and minimum dependence of 1, making them the strongest systemic driver. Legal and intellectual property factors ranked second, with a driving power of 15 and dependence of 2. In contrast, performance evaluation and key performance indicators had the minimum driving power of 1 and maximum dependence of 16, confirming their status as the ultimate dependent outcome. Strategic and managerial factors showed a driving power of 3 and dependence of 13. MICMAC analysis classified macro-environmental/governance and legal/intellectual property factors as independent or driving variables. Twelve factors were classified as linkage variables, representing 75% of all identified factors and indicating a highly interconnected system. Strategic and managerial factors and performance evaluation were classified as dependent factors, while no autonomous factor was identified.

The quantitative findings supported the adequacy of the measurement model. All standardized factor loadings exceeded 0.83 and all corresponding *t* statistics were substantially greater than 1.96. Cronbach's alpha coefficients ranged from 0.806 to 0.873, while composite reliability values ranged from 0.884 to 0.921. Average variance extracted ranged from 0.718 to 0.795, exceeding the recommended minimum criterion for every construct and confirming convergent validity. The highest construct mean was observed for performance evaluation and key performance indicators at 3.951, followed by macro-environmental and governance factors at 3.912, whereas financial and economic factors had the lowest mean at 3.451. Discriminant validity was also supported. In the Fornell-Larcker matrix, the square root of AVE for every construct exceeded its correlations with the other constructs. The HTMT ratios ranged approximately from 0.49 to 0.74 and all remained below both the 0.90 and the more conservative 0.85 thresholds. Collectively, these findings confirmed adequate internal consistency, convergent validity, and discriminant validity and supported the empirical distinctiveness of the 16 constructs.

Discussion and Conclusion

The results indicate that the implementation of open innovation in the steel supply chain should be understood as a systemic transformation rather than as a discrete innovation project or technology adoption initiative. The five-level ISM hierarchy demonstrates that improvements in final performance emerge from a sequential and interconnected structure. Macro-environmental and governance conditions

occupy the deepest level because policy, regulation, institutional stability, economic conditions, and industry-level governance determine the feasible boundaries of organizational action. Legal and intellectual property arrangements then become essential because open innovation requires firms to exchange knowledge while maintaining appropriate protection of proprietary assets, confidential information, and jointly developed technologies.

The infrastructural layer demonstrates that open innovation cannot be institutionalized without technological connectivity, digital transformation, collaborative networks, sustainability-oriented infrastructures, and appropriate legal mechanisms. These conditions enable the more organization-specific linkage factors to function effectively. The third level is particularly important because it contains the largest concentration of mutually influential variables. Culture, organizational structure, finance, suppliers, resilience, knowledge management, and human resources operate simultaneously as recipients and transmitters of influence. Consequently, intervention in this layer may generate substantial system-wide effects, but poorly coordinated changes may also create unintended feedback effects.

Another notable result concerns the strategic and managerial factor. Despite its apparently fundamental label, it appeared as a relatively dependent variable rather than as a primary driver. This suggests that effective strategy is itself shaped by institutional, technological, organizational, financial, and knowledge conditions. Strategy therefore cannot be treated as an isolated top-down managerial decision; it develops from the organization's capacity to mobilize and coordinate the resources embedded across the supply chain. Similarly, customer and market factors operate as intermediate outcomes through which upstream and internal capabilities are translated into market responsiveness.

Performance evaluation and key performance indicators represented the final and most dependent level. This finding suggests that performance improvement cannot be achieved sustainably through direct pressure on output indicators alone. Rather, observable performance reflects the cumulative effects of governance, legal conditions, infrastructure, knowledge, people, partners, risk management, strategy, and market alignment. The MICMAC analysis strengthens this interpretation by showing that no factor is autonomous and that three-quarters of the identified variables belong to the linkage category. The system is therefore strongly interconnected, and fragmented interventions are unlikely to produce stable improvements.

The quantitative validation further strengthens confidence in this conceptual structure. Strong factor loadings, high internal consistency, satisfactory composite reliability, substantial AVE values, and confirmation of discriminant validity through both Fornell-Larcker and HTMT criteria indicate that the constructs represent empirically distinguishable dimensions of open innovation implementation. Overall, the study concludes that successful open innovation in the steel industry supply chain requires a staged but integrated approach beginning with macro-governance and legal foundations, continuing through technological, digital, networking, and sustainability infrastructure, and extending to organizational culture, structure, knowledge, human resources, suppliers, finance, and resilience. These capabilities subsequently shape strategic and market outcomes and ultimately determine measurable performance. The resulting framework provides a structured basis for prioritizing interventions and allocating managerial resources toward those factors with the greatest systemic leverage.

شناسایی و اولویت‌بندی عوامل کلیدی پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد

مصطفی ذوالفقاری^۱، مهدی روغنی^۲، شبنم رضویان^۳

۱. گروه مدیریت، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. گروه مدیریت، واحد امیدیه، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه، ایران

۳. گروه ریاضی، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: m.roghani2014@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

پژوهشی/اصیلی

نحوه استناد به این مقاله:

ذوالفقاری، مصطفی، روغنی، مهدی، و رضویان، شبنم. (۱۴۰۶). شناسایی و اولویت‌بندی عوامل کلیدی پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد. مدیریت پویا و تحلیل کسب و کار، ۶(۵)، ۲۹-۱.



© ۱۴۰۶ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده(گان) است. انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY 4.0) صورت گرفته است.

هدف: هدف این پژوهش، شناسایی، ساختار‌بندی، اولویت‌بندی و اعتبار‌سنجی عوامل کلیدی مؤثر بر پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد خوزستان بود. **روش‌شناسی:** این پژوهش با رویکرد آمیخته اکتشافی متوالی انجام شد. در بخش کیفی، ۱۵ نفر از خبرگان علمی و اجرایی صنعت فولاد با روش نمونه‌گیری هدفمند و گلوله‌برفی انتخاب شدند و داده‌ها از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته گردآوری شد. پس از استخراج عوامل، از مدل‌سازی ساختاری تفسیری برای تعیین روابط و سطح‌بندی عوامل و از تحلیل MICMAC برای تعیین قدرت نفوذ و وابستگی استفاده شد. در بخش کمی، پرسشنامه محقق‌ساخته میان ۱۱۰ نفر توزیع شد که ۱۰۰ پرسشنامه معتبر مورد تحلیل قرار گرفت. اعتبار‌سنجی مدل با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی در نرم‌افزار SmartPLS انجام شد. **یافته‌ها:** نتایج کیفی به شناسایی ۱۶ عامل کلیدی منجر شد. مدل ISM ساختاری پنج‌سطحی را نشان داد که در آن عوامل محیطی و حاکمیتی کلان با قدرت نفوذ ۱۶ و وابستگی ۱، بنیادی‌ترین عامل و ارزیابی عملکرد و شاخص‌های کلیدی با قدرت نفوذ ۱ و وابستگی ۱۶، وابسته‌ترین عامل بود. عوامل حقوقی و مالکیت فکری نیز با قدرت نفوذ ۱۵ و وابستگی ۲ در زمره محرک‌های اصلی قرار گرفتند. تحلیل MICMAC نشان داد ۱۲ عامل در ناحیه پیوندی قرار دارند و هیچ عامل خودمختاری شناسایی نشد. در مدل اندازه‌گیری، بارهای عاملی بیش از ۰.۸۳، آلفای کرونباخ بین ۰.۸۰۶ تا ۰.۸۷۳، پایایی ترکیبی بین ۰.۸۸۴ تا ۰.۹۲۱ و AVE بین ۰.۷۱۸ تا ۰.۷۹۵ بود. همچنین معیارهای فورنل-لارکر و HTMT روایی و اِکِرای مدل را تأیید کردند. **نتیجه‌گیری:** پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد ماهیتی سیستمی و چندسطحی دارد و موفقیت آن مستلزم آغاز مداخلات از عوامل کلان و حقوقی، تقویت زیرساخت‌های فناورانه و شبکه‌ای و سپس توسعه عوامل سازمانی، دانشی و انسانی است.

کلیدواژه‌گان: نوآوری باز، زنجیره تأمین، صنعت فولاد، مدل‌سازی ساختاری تفسیری، MICMAC، حداقل مربعات جزئی

مقدمه

صنعت فولاد یکی از صنایع راهبردی و زیربنایی در توسعه اقتصادی، صنعتی و زیرساختی کشورها محسوب می‌شود و عملکرد آن به دلیل ارتباط گسترده با بخش‌هایی مانند ساخت‌وساز، حمل‌ونقل، انرژی، خودروسازی، صنایع سنگین و پروژه‌های عمرانی، تأثیر مستقیمی بر ظرفیت تولید و رقابت‌پذیری اقتصاد ملی دارد. زنجیره تأمین فولاد نیز ساختاری گسترده، چندلایه و پیچیده دارد که از تأمین مواد اولیه و انرژی آغاز شده و تا تولید، انبارش، حمل‌ونقل، توزیع و ارتباط با مصرف‌کنندگان نهایی ادامه می‌یابد. چنین ساختاری سبب می‌شود هرگونه اختلال در یک حلقه بتواند پیامدهای گسترده‌ای برای سایر بخش‌های زنجیره ایجاد کند. مطالعات مرتبط با سیستم زنجیره تأمین صنعت فولاد نشان داده‌اند که هماهنگی میان تأمین، تولید، موجودی، توزیع و جریان اطلاعات، یکی از عناصر تعیین‌کننده در ارتقای کارایی این صنعت است و ضعف در یکپارچگی این فرایندها می‌تواند هزینه‌های عملیاتی، زمان تحویل و عدم اطمینان را افزایش دهد (Alam, 2025). از سوی دیگر، پیچیدگی روابط میان بازیگران، محدودیت منابع، نوسانات تقاضا و ضرورت رعایت الزامات اقتصادی و زیست‌محیطی موجب شده است که مدیریت زنجیره تأمین فولاد بیش از گذشته نیازمند رویکردهایی انعطاف‌پذیر، نوآورانه و نظام‌مند باشد. مدل‌های بهینه‌سازی زنجیره تأمین فولاد نیز نشان می‌دهند که تصمیم‌گیری در این حوزه دیگر نمی‌تواند صرفاً بر معیارهای هزینه و سود استوار باشد، بلکه هم‌زمان باید ابعاد پایداری، تاب‌آوری و عملکرد چندهدفه مورد توجه قرار گیرند (Askary et al., 2024).

تحولات سریع فناوری، افزایش فشارهای رقابتی، کوتاه‌شدن چرخه عمر فناوری‌ها و گسترش شبکه‌های بین‌سازمانی، سازمان‌ها را به سمت بازاندیشی در الگوهای سنتی نوآوری سوق داده است. در مدل سنتی، سازمان عمدتاً بر منابع داخلی تحقیق و توسعه و دانش انباشته درون مرزهای خود متکی بود، اما پیچیدگی فزاینده مسائل صنعتی سبب شده است اتکا به ظرفیت‌های داخلی به‌تنهایی برای دستیابی به نوآوری‌های پایدار کافی نباشد. در چنین شرایطی، مفهوم نوآوری باز بر جریان هدفمند دانش، فناوری، ایده و منابع میان سازمان و محیط بیرونی تأکید می‌کند و سازمان را قادر می‌سازد از ظرفیت دانشگاه‌ها، تأمین‌کنندگان، مشتریان، استارت‌آپ‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان، مراکز تحقیقاتی و حتی رقبا برای توسعه راه‌حل‌های جدید استفاده کند. پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که پویایی نوآوری باز می‌تواند از طریق بازطراحی مدل کسب‌وکار، افزایش انعطاف‌پذیری سازمان و بهره‌برداری از منابع دانشی بیرونی، زمینه ایجاد ارزش جدید را فراهم کند (Yun et al., 2025). همچنین، در صنایع و خوشه‌های صنعتی، هم‌افزایی میان فناوری‌های صنعت ۴.۰ و شیوه‌های نوآوری باز می‌تواند مسیر نوسازی، بازآفرینی ظرفیت‌ها و تحول ساختاری را تسریع کند (Zen et al., 2025). از این منظر، نوآوری باز صرفاً یک ابزار توسعه محصول نیست، بلکه به یک رویکرد راهبردی برای بازآرایی روابط میان بنگاه و اکوسیستم پیرامونی تبدیل شده است.

اهمیت این رویکرد در زنجیره تأمین زمانی بیشتر آشکار می‌شود که سازمان‌ها با مسائل پیچیده‌ای مواجه باشند که حل آنها نیازمند تبادل مستمر دانش و هماهنگی میان بازیگران متعدد است. مفهوم مدیریت زنجیره تأمین باز بر این ایده استوار است که جریان مواد، اطلاعات، فناوری و دانش باید در قالب شبکه‌ای از روابط شفاف و قابل‌همکاری مدیریت شود. توسعه فناوری‌هایی مانند دوقلوی دیجیتال، سیستم‌های سایبرفیزیکی و پلتفرم‌های مشارکتی، امکان شکل‌گیری چنین محیطی را فراهم کرده است و مطالعات نشان می‌دهند که ترکیب نوآوری باز با شبکه‌های دوقلوی دیجیتال می‌تواند زمینه ظهور زنجیره تأمین هوشمند و باز را ایجاد کند (Rahmanzadeh et al., 2023). در همین راستا، همسویی راهبردی میان نوآوری باز و مدیریت زنجیره تأمین می‌تواند به خلق مزیت رقابتی پایدار منجر شود، زیرا سازمان را قادر می‌سازد قابلیت‌های شرکای بیرونی را با اهداف راهبردی خود هماهنگ سازد و ظرفیت پاسخگویی به تغییرات بازار را افزایش دهد (Gonyora et al., 2024).

2021). بنابراین، در صنایع پیچیده‌ای مانند فولاد، نوآوری باز زمانی اثربخش خواهد بود که نه به‌صورت یک پروژه منفرد، بلکه به‌عنوان بخشی از منطق حاکم بر تعاملات زنجیره تأمین تعریف شود.

یکی از مهم‌ترین محرک‌های این تحول، گسترش فناوری‌های دیجیتال و صنعت ۴.۰ است. اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، تحلیل داده، سامانه‌های هوشمند برنامه‌ریزی و فناوری‌های ارتباطی امکان مشاهده بلادرنگ فرایندهای زنجیره تأمین، پیش‌بینی اختلالات و ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری را فراهم می‌کنند. کاربرد اینترنت اشیا در مدیریت زنجیره تأمین می‌تواند شفافیت، قابلیت ردیابی، هماهنگی و سرعت واکنش را بهبود بخشد، هرچند تحقق این مزایا به زیرساخت دیجیتال، آمادگی سازمانی، امنیت داده‌ها و قابلیت یکپارچه‌سازی سامانه‌ها وابسته است (De Vass et al., 2021). تلفیق هوش مصنوعی و اینترنت اشیا نیز در لجستیک و حمل‌ونقل صنعتی می‌تواند موجب بهینه‌سازی مسیرها، کاهش اتلاف منابع و افزایش کارایی جریان مواد شود (Bhargava et al., 2022). همچنین، استفاده هم‌زمان از هوش مصنوعی و اینترنت اشیا در زنجیره تأمین، امکان بهبود پیش‌بینی، مدیریت موجودی و هماهنگی بین بخش‌های مختلف را افزایش می‌دهد (Singh et al., 2021). توسعه راهکارهای هوشمند مدیریت زنجیره تأمین مبتنی بر هوش مصنوعی و پلتفرم‌های دیجیتال نیز نشان داده است که یکپارچگی داده و خودکارسازی تصمیم‌ها می‌تواند کیفیت مدیریت اطلاعات را بهبود دهد (Sharma & Dash, 2023). با این حال، بهره‌گیری از هوش مصنوعی در سیستم‌های پیچیده مستلزم داده‌های باکیفیت، زیرساخت محاسباتی مناسب و قابلیت تبدیل خروجی‌های تحلیلی به تصمیم‌های عملیاتی است؛ موضوعی که اهمیت ظرفیت فناوریانه و دانشی سازمان را برجسته می‌سازد (Zohuri & Behgounia, 2023).

این تحولات برای صنعت فولاد اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا این صنعت هم‌زمان با ضرورت دیجیتالی‌شدن، با نیاز به کاهش هزینه، افزایش انعطاف‌پذیری و بازطراحی راهبردهای زنجیره تأمین روبه‌رو است. ارزیابی راهبردهای صنعت ۴.۰ در زنجیره تأمین فولاد نشان می‌دهد که موفقیت تحول دیجیتال تنها به خرید فناوری وابسته نیست، بلکه باید تناسب میان قابلیت‌های داخلی، فرصت‌های محیطی، تهدیدهای بیرونی و شکاف‌های اجرایی نیز مورد توجه قرار گیرد (Motallebi et al., 2025). از سوی دیگر، سیستم‌های پیش‌بینی تقاضا و مدیریت موجودی مبتنی بر رویکردهای نوآورانه باز می‌توانند عدم‌اطمینان را در زنجیره تأمین فولاد کاهش دهند و هماهنگی میان تصمیم‌های تولید و تقاضای واقعی بازار را تقویت کنند (Sukolkit et al., 2024). فناوری‌های نوظهور همچنین امکان گسترش همکاری میان شرکت‌های فولادی و سایر بازیگران را فراهم ساخته‌اند؛ زیرا داده‌ها، دانش و بازخوردهای عملیاتی می‌توانند در بسترهای دیجیتال سریع‌تر به اشتراک گذاشته شوند. در چنین فضایی، نوآوری باز و تحول دیجیتال دو فرایند جداگانه نیستند، بلکه می‌توانند یکدیگر را تقویت کنند و از طریق گسترش مرزهای همکاری و افزایش سرعت انتقال دانش، ظرفیت نوآوری زنجیره تأمین را ارتقا دهند.

در کنار دیجیتالی‌شدن، مسئله پایداری به یکی دیگر از محورهای اصلی تحول صنعت فولاد تبدیل شده است. تولید فولاد از جمله فعالیت‌های صنعتی با مصرف بالای انرژی و منابع و انتشار قابل‌توجه آلاینده‌هاست و حرکت به سمت تولید سبز نیازمند تغییراتی گسترده در فناوری، تأمین مواد اولیه، انرژی و شیوه‌های مدیریت زنجیره تأمین است. بررسی گزینه‌های زنجیره تأمین برای فولاد سبز نشان داده است که گذار به صنعت فولاد کم‌کربن مستلزم بازآرایی جریان انرژی، مواد و زیرساخت‌ها و هماهنگی میان چندین بازیگر در سطوح مختلف است (Lopez et al., 2023). تحول سبز در صنایع آهن و فولاد نیز تنها از طریق نوآوری تکنولوژیک منفرد محقق نمی‌شود، بلکه نیازمند بازاندیشی در الگوهای نوآوری، ساختار نهادی و تعامل میان بخش عمومی و خصوصی است (Mallett & Pal, 2022). از این منظر، نوآوری باز می‌تواند یکی از سازوکارهای تسریع‌کننده گذار پایدار باشد، زیرا امکان ترکیب دانش و فناوری بازیگران مختلف و توسعه راه‌حلی را فراهم می‌کند که یک بنگاه به‌تنهایی قادر به ایجاد آنها نیست. پژوهش‌ها تأکید کرده‌اند که نوآوری باز می‌تواند از طریق مشارکت چندذی‌نفعی، اشتراک دانش

و توسعه مشترک فناوری‌ها، شیوه‌های پایداری را تقویت کند (do Prado et al., 2025). افزون بر این، نقش نوآوری باز در گذارهای پایداری فراتر از سطح بنگاه است و می‌تواند در تحول اکوسیستم‌ها و نظام‌های صنعتی نقش‌آفرین باشد (Viale et al., 2022).

مفهوم اقتصاد چرخشی نیز در این چارچوب اهمیت می‌یابد. صنعت فولاد به دلیل قابلیت بازیافت گسترده محصولات و مواد، ظرفیت بالایی برای حرکت به سمت زنجیره تأمین چرخشی دارد، اما تحقق این ظرفیت به ردیابی جریان مواد، شفافیت اطلاعات و هماهنگی بازیگران نیازمند است. توسعه چارچوب‌های مبتنی بر RFID و بلاک‌چین برای مدیریت زنجیره تأمین چرخشی در صنعت فولاد نشان داده است که فناوری‌های دیجیتال می‌توانند قابلیت ردیابی، اعتماد و شفافیت را افزایش دهند و زمینه مدیریت پایدارتر منابع را فراهم سازند (Rakshit et al., 2025). به همین ترتیب، طراحی نمونه‌های محصول در چارچوب نوآوری باز با تأکید بر کیفیت و ارزیابی چرخه عمر نشان می‌دهد که مشارکت ذی‌نفعان و تبادل دانش می‌تواند هم‌زمان اهداف نوآوری، کیفیت و پایداری را تقویت کند (Gajdzik et al., 2024). بنابراین، پیوند میان نوآوری باز، اقتصاد چرخشی و پایداری می‌تواند برای صنعت فولاد به یک قابلیت راهبردی تبدیل شود؛ مشروط بر آنکه سازوکارهای مناسب برای همکاری، اشتراک داده، حقوق مالکیت فکری و هماهنگی میان بازیگران ایجاد شود.

با وجود مزایای بالقوه نوآوری باز، پیاده‌سازی آن در زنجیره تأمین فولاد با موانع متعددی مواجه است. صنعت فولاد دارای سرمایه‌گذاری‌های سنگین، فناوری‌های پیچیده، الزامات ایمنی بالا، ساختارهای نسبتاً رسمی و روابط بلندمدت با تأمین‌کنندگان است و همین ویژگی‌ها می‌تواند پذیرش الگوهای باز نوآوری را دشوار سازد. پژوهش‌های مربوط به اولویت‌بندی موانع زنجیره تأمین صنعت فولاد نشان داده‌اند که محدودیت‌های مدیریتی، عملیاتی، زیرساختی و محیطی می‌توانند عملکرد زنجیره را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهند و شناخت اهمیت نسبی آنها برای تخصیص منابع ضروری است (Kumar et al., 2025). از سوی دیگر، شبیه‌سازی پویایی سیستم در زنجیره تأمین فولاد نشان می‌دهد که تأخیرها، حلقه‌های بازخورد و وابستگی‌های متقابل میان عرضه، موجودی، تولید و تقاضا می‌توانند رفتار سیستم را پیچیده کنند (Mohammadi et al., 2022). در چنین محیطی، استقرار نوآوری باز بدون توجه به ماهیت سیستمیک روابط می‌تواند به مداخلات پراکنده و کم‌اثر منجر شود. بنابراین، شناسایی عوامل کلیدی کافی نیست و لازم است روابط علی، قدرت نفوذ و وابستگی میان آنها نیز مشخص شود.

بعد راهبردی و مدیریتی نیز در این زمینه تعیین‌کننده است. مطالعات مرتبط با راهبرد نوآوری باز نشان می‌دهند که عملکرد حاصل از این رویکرد تا حد زیادی به چگونگی طراحی و اجرای راهبرد، هماهنگی میان ظرفیت‌های داخلی و منابع بیرونی و توانایی سازمان در مدیریت جریان دانش وابسته است (Wang, 2024). همچنین، ارتباط میان نوآوری باز، کارآفرینی و مدل‌های کسب‌وکار پایدار نشان می‌دهد که بهره‌برداری مؤثر از ایده‌ها و منابع بیرونی نیازمند سازوکارهایی برای تبدیل دانش به ارزش اقتصادی و سازمانی است (Huang & Zhou, 2025). در صنعت فولاد، این مسئله می‌تواند در قالب همکاری با دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان، تأمین‌کنندگان فناوری، مشتریان صنعتی و شرکای لجستیکی نمود یابد. با این حال، اثربخشی چنین همکاری‌هایی به عوامل فرهنگی و انسانی مانند اعتماد، تمایل به اشتراک دانش، نگرش مدیران نسبت به همکاری بیرونی و پذیرش تغییر وابسته است. در سطح ساختاری نیز انعطاف سازمانی، سازوکارهای تصمیم‌گیری، نقش واحد تحقیق و توسعه و نحوه هماهنگی میان واحدهای مختلف می‌توانند موفقیت یا شکست نوآوری باز را تعیین کنند.

بعد حقوقی و مالکیت فکری نیز یکی از چالش‌های اساسی در نوآوری باز است. افزایش تعامل با بازیگران بیرونی می‌تواند نگرانی‌هایی در زمینه محرمانگی، مالکیت دانش، حقوق بهره‌برداری از فناوری و تقسیم منافع ایجاد کند. اگر سازمان‌ها از سازوکارهای قراردادی و حقوقی کافی برخوردار نباشند، تمایل آنها به اشتراک دانش کاهش می‌یابد و ظرفیت واقعی همکاری محدود می‌شود. از سوی دیگر، افراط در حفاظت از دانش نیز می‌تواند جریان یادگیری و نوآوری مشترک را مختل کند. بنابراین، یکی از مسائل مهم در زنجیره تأمین فولاد، یافتن تعادل میان حفاظت از دارایی‌های دانشی و ایجاد فضای کافی برای تبادل فناوری و ایده است. این مسئله با مدیریت دانش و ظرفیت جذب نیز ارتباط

مستقیم دارد؛ زیرا ورود دانش خارجی تنها زمانی به نوآوری منجر می‌شود که سازمان بتواند آن را شناسایی، ارزیابی، جذب و در فرایندهای خود به کار گیرد. در همین راستا، توسعه مدل‌های باز و هوشمند زنجیره تأمین نشان داده است که قابلیت‌های دیجیتال و ظرفیت تبادل دانش باید به صورت مکمل توسعه یابند (Rahmanzadeh et al., 2023).

از سوی دیگر، نقش تأمین‌کنندگان و مشتریان در نوآوری باز زنجیره تأمین اهمیت ویژه‌ای دارد. تأمین‌کنندگان می‌توانند منبع ایده‌های مربوط به مواد جدید، فناوری‌های تولید، تجهیزات و راهکارهای کاهش هزینه باشند، در حالی که مشتریان می‌توانند اطلاعات ارزشمندی درباره کیفیت، نیازهای بازار و فرصت‌های توسعه محصول ارائه کنند. توسعه رویکردهای پیش‌بینی تقاضا و مدیریت موجودی در صنعت فولاد نشان داده است که بهره‌گیری از اطلاعات بازار می‌تواند برنامه‌ریزی تولید و موجودی را بهبود بخشد (Sukolkit et al., 2024). هم‌زمان، مدیریت شبکه شرکا باید به گونه‌ای انجام شود که منافع متقابل، شفافیت و اعتماد حفظ شود. همسویی راهبردی میان همکاری‌های باز و اهداف زنجیره تأمین نیز یکی از پیش‌شرط‌های دستیابی به مزیت رقابتی پایدار محسوب می‌شود (Gonyora et al., 2021). از این رو، نوآوری باز در صنعت فولاد بیش از آنکه یک فعالیت محدود به واحد تحقیق و توسعه باشد، باید در سراسر شبکه تأمین و بازار نهادینه شود. در نهایت، مرور مطالعات نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های گذشته هر یک بر بخشی خاص از مسئله، مانند بهینه‌سازی زنجیره تأمین فولاد، پایداری، تحول دیجیتال، صنعت ۴.۰، مدیریت موجودی، اقتصاد چرخشی یا نوآوری باز تمرکز داشته‌اند (Askary et al., 2024; Motallebi et al., 2025; Rakshit et al., 2025). اگرچه این مطالعات شناخت ارزشمندی از ابعاد مختلف زنجیره تأمین و نوآوری فراهم کرده‌اند، هنوز نیاز به رویکردی یکپارچه برای شناسایی عوامل کلیدی پیاده‌سازی نوآوری باز و تعیین جایگاه، روابط و اولویت آنها در بستر صنعت فولاد وجود دارد. ماهیت وابسته و شبکه‌ای عوامل موجب می‌شود استفاده از روش‌هایی که تنها وزن یا اهمیت منفرد متغیرها را می‌سنجند، برای توضیح کامل ساختار مسئله کافی نباشد. از این رو، ترکیب شناسایی کیفی عوامل با مدل‌سازی ساختاری تفسیری و تحلیل قدرت نفوذ و وابستگی می‌تواند تصویری نظام‌مند از روابط میان مؤلفه‌ها ارائه دهد و سپس اعتبار این ساختار از طریق تحلیل کمی مورد بررسی قرار گیرد. چنین رویکردی می‌تواند علاوه بر رفع بخشی از شکاف موجود در ادبیات، برای مدیران صنعت فولاد نیز مشخص سازد که مداخله باید از کدام عوامل آغاز شود، کدام عوامل نقش زیرساختی یا واسطه‌ای دارند و نتایج نهایی از چه مسیرهایی شکل می‌گیرند. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر شناسایی و اولویت‌بندی عوامل کلیدی پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد و تبیین روابط ساختاری میان این عوامل با تمرکز بر صنعت فولاد خوزستان است.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر رویکرد، پژوهشی آمیخته با طرح اکتشافی متوالی بود که در دو مرحله کیفی و کمی انجام شد. انتخاب رویکرد آمیخته از آن جهت صورت گرفت که شناسایی عوامل کلیدی پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد مستلزم دستیابی به درکی عمیق از تجارب، دیدگاه‌ها و دانش ضمنی خبرگان و سپس آزمون تجربی، اعتبارسنجی و اولویت‌بندی عوامل استخراج‌شده در یک نمونه گسترده‌تر بود. در مرحله کیفی، ابتدا با مرور نظام‌مند منابع علمی، مقالات، پایان‌نامه‌ها، کتب و مستندات تخصصی مرتبط با نوآوری باز، مدیریت نوآوری، همکاری‌های بین‌سازمانی و مدیریت زنجیره تأمین، چارچوب اولیه مطالعه تدوین شد. سپس مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان علمی و اجرایی صنعت فولاد خوزستان انجام گرفت تا عوامل، شرایط، الزامات، موانع و پیامدهای مرتبط با پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین این صنعت شناسایی شود. جامعه مشارکت‌کنندگان بخش کیفی شامل مدیران، کارشناسان و صاحب‌نظرانی بود که از تجربه و دانش تخصصی کافی در زمینه زنجیره تأمین، مدیریت نوآوری، تحقیق و توسعه، تأمین مواد اولیه، تولید، لجستیک، توزیع یا

همکاری‌های بین‌سازمانی برخوردار بودند. انتخاب مشارکت‌کنندگان به روش نمونه‌گیری هدفمند و گلوله‌برفی انجام شد؛ به این ترتیب که ابتدا تعدادی از خبرگان واجد شرایط شناسایی شدند و سپس از آنان خواسته شد سایر افراد متخصص و دارای تجربه مرتبط را معرفی کنند. فرایند نمونه‌گیری و انجام مصاحبه‌ها تا دستیابی به اشباع نظری، یعنی مرحله‌ای که مصاحبه‌های جدید به استخراج مفهوم یا مقوله بنیادی جدیدی منجر نمی‌شد، ادامه یافت. در نهایت، ۱۵ نفر در مرحله کیفی شرکت کردند که شامل ۵ نفر از مدیران ارشد و میانی شرکت‌های فعال در صنعت فولاد، ۷ نفر از کارشناسان خبره حوزه‌های مختلف زنجیره تأمین از جمله تأمین مواد اولیه، تولید، مدیریت موجودی، لجستیک، توزیع و تحقیق و توسعه، و ۳ نفر از مشاوران و اعضای هیئت علمی دانشگاه آشنا با مفاهیم نوآوری باز و مدیریت زنجیره تأمین بودند. این ترکیب به‌گونه‌ای انتخاب شد که دیدگاه‌های عملیاتی، مدیریتی، راهبردی و دانشگاهی به‌طور هم‌زمان در فرایند شناسایی عوامل مورد توجه قرار گیرد.

در بخش کمی، جامعه آماری شامل مدیران، کارشناسان فنی، متخصصان و کارکنان اجرایی شاغل در شرکت‌های فعال در زنجیره تأمین صنعت فولاد خوزستان بود که به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم با فعالیت‌های تأمین، تولید، تحقیق و توسعه، مدیریت موجودی، لجستیک، توزیع و فرایندهای نوآوری سازمانی ارتباط داشتند. حجم جامعه واجد شرایط در زمان انجام پژوهش حدود ۳۰۰ نفر برآورد شد. با توجه به ماهیت مدل، هدف پژوهش و الزامات تحلیل‌های چندمتغیره، حجم نمونه نهایی ۱۰۰ نفر تعیین شد. برای دستیابی به نمونه‌ای متناسب با ساختار جامعه و جلوگیری از غلبه دیدگاه یک سطح سازمانی، از روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌ای استفاده شد. بدین منظور، جامعه برحسب جایگاه سازمانی به سه طبقه مدیران و سرپرستان، کارشناسان و متخصصان فنی، و کارکنان عملیاتی تقسیم شد و نمونه‌ها از هر طبقه انتخاب شدند. نمونه نهایی شامل ۲۰ نفر از مدیران و سرپرستان واحدهای مرتبط با زنجیره تأمین، ۴۰ نفر از کارشناسان و متخصصان فنی و ۴۰ نفر از کارکنان عملیاتی و اجرایی بود. پرسشنامه به‌صورت الکترونیکی در اختیار ۱۱۰ نفر از افراد واجد شرایط قرار گرفت که پس از بررسی میزان تکمیل و کیفیت پاسخ‌ها، ۱۰۰ پرسشنامه کامل و قابل تحلیل وارد مرحله نهایی تحلیل آماری شد. محدوده مکانی پژوهش شرکت‌های فعال در صنعت فولاد استان خوزستان و محدوده موضوعی آن کلیه حلقه‌های اصلی زنجیره تأمین، از تأمین مواد اولیه تا تولید، لجستیک، توزیع و ارتباط با مشتریان بود. گردآوری داده‌ها در بهار ۱۴۰۵ انجام شد.

گردآوری داده‌ها متناسب با مراحل مختلف پژوهش با استفاده از مطالعات اسنادی، مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با خبرگان و پرسشنامه محقق‌ساخته صورت گرفت. در مرحله نخست، مطالعات کتابخانه‌ای و اسنادی به‌منظور تدوین چارچوب مفهومی اولیه و شناسایی مؤلفه‌های بالقوه مؤثر بر پیاده‌سازی نوآوری باز انجام شد. در این مرحله، مقالات علمی، کتب تخصصی، پایان‌نامه‌ها، گزارش‌های حرفه‌ای و مستندات مرتبط با نوآوری باز، همکاری بین‌سازمانی، مدیریت فناوری و مدیریت زنجیره تأمین صنایع تولیدی و به‌ویژه صنعت فولاد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مرحله در تدوین راهنمای اولیه مصاحبه و تعیین محورهای اصلی گفت‌وگو با خبرگان مورد استفاده قرار گرفت.

ابزار اصلی مرحله کیفی، مصاحبه نیمه‌ساختاریافته بود. سؤالات مصاحبه به‌گونه‌ای تدوین شدند که ضمن برخورداری از ساختار مشترک برای همه مشارکت‌کنندگان، امکان پیگیری موضوعات جدید و تجربیات اختصاصی هر خبره نیز وجود داشته باشد. محورهای مصاحبه موضوعاتی مانند شیوه مواجهه شرکت‌های فولادی با مسائل و چالش‌های فنی زنجیره تأمین، سازوکارهای جست‌وجوی ایده و دانش خارج از سازمان، نگرش مدیران و کارکنان نسبت به ایده‌های جدید، تجربیات موفق و ناموفق همکاری با تأمین‌کنندگان، مشتریان، دانشگاه‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان، تمایل به اشتراک‌گذاری دانش و دستاوردهای فنی، مسائل مربوط به مالکیت فکری، محرمانگی و قراردادهای زیرساخت‌های اطلاعاتی مورد نیاز برای تبادل دانش، موانع فرهنگی و سازمانی نوآوری باز و پیامدهای احتمالی آن برای هزینه، کیفیت، سرعت تحویل، بهره‌وری و رقابت‌پذیری را دربر می‌گرفت. سؤال محوری مصاحبه نیز بر این موضوع متمرکز بود که «مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد خوزستان کدام‌اند و این عوامل چگونه بر یکدیگر اثر می‌گذارند؟» برای ارزیابی روایی محتوایی راهنمای

مصاحبه، نسخه اولیه سؤالات در اختیار تعدادی از اساتید دانشگاه، متخصصان مدیریت و خبرگان صنعت فولاد قرار گرفت و میزان شفافیت، تناسب، جامعیت و ارتباط هر سؤال با اهداف پژوهش بررسی شد. بر اساس بازخوردهای دریافت‌شده، اصلاحات لازم در ترتیب، ساختار و محتوای سؤالات اعمال شد. همچنین، دو پیش‌مصاحبه آزمایشی انجام گرفت تا قابل‌فهم‌بودن سؤالات و قابلیت آنها برای استخراج اطلاعات مورد نیاز بررسی شود. مدت زمان هر مصاحبه تقریباً ۴۵ تا ۶۰ دقیقه بود و با رضایت مشارکت‌کنندگان، محتوای مصاحبه‌ها ثبت و سپس به‌طور کامل پیاده‌سازی شد.

برای افزایش قابلیت اعتماد داده‌های کیفی، بخشی از متن مصاحبه‌ها به‌طور مستقل توسط دو کدگذار تحلیل شد و میزان توافق میان کدگذاران مورد بررسی قرار گرفت. پایایی فرایند کدگذاری با استفاده از ضریب توافق بین کدگذاران و فرمول هولستی محاسبه شد و ضریب حاصل بیش از ۰.۷۰ بود که نشان‌دهنده قابلیت اعتماد قابل قبول فرایند کدگذاری بود. افزون بر این، در موارد اختلاف میان کدگذاران، کدها و تعاریف مربوط به آنها مجدداً بررسی و از طریق بحث و توافق نهایی اصلاح شد. برای تقویت اعتبار یافته‌های کیفی، مضامین و عوامل استخراج‌شده در اختیار خبرگان قرار گرفت و در قالب فرایند دلفی، میزان تناسب و اهمیت آنها ارزیابی شد. عوامل فاقد اجماع کافی مورد بازنگری، ادغام یا حذف قرار گرفتند و مجموعه نهایی عوامل مورد توافق خبرگان، مبنای تدوین ابزار بخش کمی قرار گرفت.

ابزار گردآوری داده‌ها در مرحله کمی، پرسشنامه محقق‌ساخته‌ای بود که براساس مضامین، مقوله‌ها و شاخص‌های استخراج‌شده از مصاحبه‌های کیفی و نتایج فرایند دلفی طراحی شد. گویه‌های پرسشنامه ابعاد مختلف مرتبط با الزامات و عوامل کلیدی پیاده‌سازی نوآوری باز، ظرفیت‌های سازمانی و مدیریتی، همکاری‌های بین‌سازمانی، عوامل فرهنگی و فناورانه، شرایط محیطی و ساختاری و پیامدهای مورد انتظار در زنجیره تأمین صنعت فولاد را پوشش می‌دادند. پاسخ به گویه‌ها بر مبنای طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت از «کاملاً مخالفم» با امتیاز ۱ تا «کاملاً موافقم» با امتیاز ۵ انجام شد. روایی محتوایی پرسشنامه با استفاده از دیدگاه خبرگان علمی و اجرایی بررسی و اصلاحات پیشنهادی پیش از توزیع نهایی اعمال شد. روایی سازه در مرحله تحلیل مدل اندازه‌گیری و از طریق بررسی روایی همگرا و روایی واگرا مورد ارزیابی قرار گرفت. برای سنجش روایی همگرا از میانگین واریانس استخراج‌شده استفاده شد و مقادیر بیش از ۰.۵۰ به‌عنوان سطح مطلوب در نظر گرفته شد. روایی واگرا نیز با استفاده از معیار فورنل-لارکر و بررسی میزان تمایز تجربی سازه‌ها ارزیابی شد. پایایی ابزار کمی از طریق آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی بررسی شد و مقادیر بیشتر از ۰.۷۰ برای هر دو شاخص به‌عنوان نشان‌دهنده انسجام درونی و پایایی مناسب سازه‌ها در نظر گرفته شد. تحلیل داده‌ها متناسب با ماهیت آمیخته پژوهش در دو مرحله کیفی و کمی انجام شد. در مرحله کیفی، پس از پیاده‌سازی کامل مصاحبه‌ها، متن مصاحبه‌ها چندین بار مطالعه و فرایند تحلیل با استفاده از کدگذاری نظام‌مند انجام شد. در مرحله نخست، واحدهای معنایی مرتبط با موضوع پژوهش شناسایی و کدهای اولیه استخراج شدند. سپس کدهای مشابه یا مرتبط در قالب مفاهیم و مقوله‌های گسترده‌تر ادغام شدند و روابط میان مقوله‌ها مورد بررسی قرار گرفت. فرایند تحلیل در قالب کدگذاری باز، محوری و انتخابی انجام شد؛ به‌گونه‌ای که در کدگذاری باز، مفاهیم و کدهای اولیه از متن مصاحبه‌ها استخراج شدند، در کدگذاری محوری، ارتباط میان مقوله‌های اصلی و فرعی مشخص شد و در کدگذاری انتخابی، ساختار نهایی عوامل کلیدی پیاده‌سازی نوآوری باز شکل گرفت. برای مدیریت، سازمان‌دهی، بازیابی و مقایسه کدها و مضامین از نرم‌افزار MAXQDA استفاده شد. پس از استخراج اولیه عوامل، فرایند دلفی با مشارکت خبرگان انجام گرفت تا درباره ضرورت، تناسب و اهمیت عوامل شناسایی‌شده اجماع حاصل شود. عوامل تأییدشده در این مرحله، علاوه بر شکل‌دهی مدل مفهومی اولیه، مبنای طراحی گویه‌های پرسشنامه کمی قرار گرفتند.

در مرحله ساختاربندی روابط بین عوامل، از مدل‌سازی ساختاری تفسیری استفاده شد. در این فرایند، ابتدا روابط دوتایی میان عوامل کلیدی براساس قضاوت خبرگان تعیین و ماتریس خودتعاملی ساختاری تشکیل شد. سپس این ماتریس به ماتریس دسترسی اولیه تبدیل و با

اعمال اصل تعدی، ماتریس دسترسی نهایی استخراج شد. براساس مجموعه‌های دسترسی و پیش‌نیاز هر عامل، سطح‌بندی عوامل انجام گرفت و ساختار سلسله‌مراتبی روابط میان مؤلفه‌های پیاده‌سازی نوآوری باز تعیین شد. به این ترتیب، عوامل دارای نقش زیربنایی و محرک از عواملی که بیشتر تحت تأثیر سایر مؤلفه‌ها قرار داشتند تفکیک شدند. همچنین، قدرت نفوذ و میزان وابستگی هر عامل براساس ماتریس دسترسی نهایی محاسبه شد تا جایگاه نسبی عوامل در ساختار سیستم مشخص شود. این بخش امکان شناسایی عوامل کلیدی و تعیین اولویت آنها از منظر نقش ساختاری در پیاده‌سازی نوآوری باز را فراهم کرد.

در مرحله کمی، داده‌های جمع‌آوری شده ابتدا وارد نرم‌افزار SPSS شدند و از نظر کامل بودن پاسخ‌ها، وجود داده‌های نامعتبر و ویژگی‌های توصیفی مورد بررسی قرار گرفتند. شاخص‌های توصیفی شامل فراوانی، درصد، میانگین و انحراف معیار برای توصیف ویژگی‌های جمعیت‌شناختی پاسخ‌دهندگان و متغیرهای اصلی پژوهش محاسبه شد. در ادامه، برای اعتبارسنجی مدل مفهومی و بررسی روابط میان سازه‌های شناسایی شده از مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی با استفاده از نرم‌افزار SmartPLS بهره گرفته شد. تحلیل مدل در دو مرحله ارزیابی مدل اندازه‌گیری و مدل ساختاری صورت گرفت. در ارزیابی مدل اندازه‌گیری، بارهای عاملی شاخص‌ها، آلفای کرونباخ، پایایی ترکیبی، میانگین واریانس استخراج‌شده و شاخص‌های روایی واگرا بررسی شدند. پس از احراز کفایت مدل اندازه‌گیری، مدل ساختاری از طریق ضرایب مسیر، آماره t ، سطح معناداری، ضریب تعیین و شاخص‌های مرتبط با توان تبیینی مدل ارزیابی شد. برای آزمون معناداری ضرایب مسیر از روش بوت‌استرپ استفاده شد. تلفیق نتایج تحلیل کیفی، مدل‌سازی ساختاری تفسیری و مدل‌سازی معادلات ساختاری امکان شناسایی، ساختاربندی، اعتبارسنجی و اولویت‌بندی عوامل کلیدی پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد خوزستان را فراهم ساخت و در نهایت چارچوبی بومی و مبتنی بر شواهد برای تبیین روابط بین عوامل ارائه شد.

یافته‌ها

در بخش کیفی پژوهش، داده‌های حاصل از مطالعات اسنادی و مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با ۱۵ نفر از خبرگان علمی و اجرایی صنعت فولاد پس از پیاده‌سازی، کدگذاری و تجمیع مفاهیم مشابه مورد تحلیل قرار گرفت. حاصل این مرحله، شناسایی ۱۶ عامل اصلی مؤثر بر پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد خوزستان بود. این عوامل طیفی از متغیرهای درون‌سازمانی و برون‌سازمانی را دربر گرفتند و نشان دادند که استقرار نوآوری باز در این صنعت صرفاً به ظرفیت‌های فناورانه محدود نیست، بلکه مجموعه‌ای از الزامات مدیریتی، فرهنگی، ساختاری، اقتصادی، حقوقی، شبکه‌ای، بازاری، محیطی و دانشی را شامل می‌شود. عوامل نهایی استخراج‌شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱

عوامل کلیدی استخراج‌شده از بخش کیفی پژوهش

کد	عنوان عامل
۱	عوامل استراتژیک و مدیریتی
۲	عوامل فرهنگی و انسانی
۳	عوامل ساختاری و سازمانی
۴	عوامل مالی و اقتصادی
۵	عوامل حقوقی و مالکیت فکری
۶	عوامل تکنولوژیک و زیرساختی
۷	عوامل شبکه‌سازی و اکوسیستم



۸	عوامل مرتبط با تأمین‌کنندگان
۹	عوامل مرتبط با مشتریان و بازار
۱۰	عوامل زیست‌محیطی و پایداری
۱۱	عوامل محیطی و حاکمیتی کلان
۱۲	عوامل مدیریت ریسک و تاب‌آوری
۱۳	مدیریت دانش و ظرفیت جذب
۱۴	مدیریت منابع انسانی و استعدادها
۱۵	ارزیابی عملکرد و شاخص‌های کلیدی
۱۶	عوامل مرتبط با تحول دیجیتال و هوشمندسازی

پس از شناسایی عوامل، برای تعیین نوع و جهت روابط میان آنها از مدل‌سازی ساختاری تفسیری استفاده شد. نخست، ماتریس خودتعاملی ساختاری براساس قضاوت خبرگان تشکیل شد. در این ماتریس، نماد V نشان‌دهنده تأثیر عامل سطر بر عامل ستون، A بیانگر تأثیر عامل ستون بر عامل سطر، X نشان‌دهنده رابطه دوطرفه و O بیانگر نبود رابطه مستقیم میان دو عامل بود. نتایج این مرحله در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲

ماتریس خودتعاملی ساختاری عوامل

عامل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۱	A	V	A	A	A	A	A	V	A	A	A	O	A	A	A	X
۲	A	V	X	V	A	A	O	V	O	A	A	O	A	X	X	-
۳	A	V	V	V	A	A	O	V	V	O	A	O	A	X	-	-
۴	O	V	V	O	X	A	O	V	V	O	A	O	X	-	-	-
۵	O	O	O	O	V	A	O	O	O	V	O	X	-	-	-	-
۶	V	V	O	V	V	A	O	V	V	X	X	-	-	-	-	-
۷	A	O	O	V	V	A	V	V	V	X	-	-	-	-	-	-
۸	O	O	O	O	V	A	O	V	X	-	-	-	-	-	-	-
۹	A	V	V	V	V	O	V	X	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۰	O	O	O	O	V	O	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۱	V	V	V	V	V	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۲	A	V	V	V	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۳	O	V	V	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۴	O	V	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۵	O	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۶	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

بررسی ماتریس خودتعاملی نشان داد که بخشی از عوامل دارای روابط دوسویه و بازخوردی بودند. از جمله، میان عوامل فرهنگی و انسانی و عوامل ساختاری و سازمانی، میان عوامل تکنولوژیک و زیرساختی و شبکه‌سازی و اکوسیستم، میان عوامل مالی و اقتصادی و مدیریت ریسک و تاب‌آوری و نیز میان عوامل فرهنگی و انسانی و مدیریت منابع انسانی و استعدادها روابط متقابل مشاهده شد. این یافته نشان می‌دهد که تغییر در هر یک از این عوامل می‌تواند از طریق سازوکارهای بازخوردی، عامل مقابل را نیز تحت تأثیر قرار دهد.

عامل محیطی و حاکمیتی کلان در ماتریس اولیه در جایگاهی قرار گرفت که بخش قابل توجهی از عوامل دیگر را تحت تأثیر قرار می داد. عوامل مربوط به مشتریان و بازار نیز با مجموعه گسترده ای از مؤلفه های فرهنگی، ساختاری، مالی، تأمین کنندگان، مدیریت ریسک، دانش، منابع انسانی و ارزیابی عملکرد ارتباط داشتند. در مقابل، عامل ارزیابی عملکرد و شاخص های کلیدی عمدتاً از دیگر عوامل تأثیر می پذیرفت و ماهیتی پیامدی داشت. عوامل حقوقی و مالکیت فکری و زیست محیطی و پایداری نیز نسبت به بسیاری از مؤلفه ها فاقد رابطه مستقیم بودند و بخش مهمی از اثر آنها از طریق روابط غیرمستقیم آشکار شد.

در گام بعد، ماتریس خودتعاملی به ماتریس دسترسی اولیه تبدیل شد؛ به این صورت که نمادهای V ، A ، X و O مطابق قواعد ISM به مقادیر صفر و یک تبدیل شدند. تحلیل ماتریس اولیه نشان داد که عامل محیطی و حاکمیتی کلان از قوی ترین منابع اثرگذاری مستقیم بود، در حالی که ارزیابی عملکرد عمدتاً در نقش یک متغیر پیامدی ظاهر شد. همچنین عوامل تکنولوژیک و زیرساختی، شبکه سازی و اکوسیستم، تأمین کنندگان و مشتریان و بازار از روابط مستقیم گسترده ای برخوردار بودند. در مقابل، عوامل استراتژیک و مدیریتی، فرهنگی و انسانی، ساختاری و سازمانی و ارزیابی عملکرد، میزان قابل توجهی از تأثیرپذیری مستقیم را نشان دادند. در این مرحله روابط متقابل مستقیمی نیز میان برخی مؤلفه های فرهنگی و ساختاری، فناورانه و شبکه ای و مالی و مدیریت ریسک مشاهده شد.

پس از اعمال قاعده تعدی و لحاظ روابط غیرمستقیم، ماتریس دسترسی نهایی تشکیل شد. این ماتریس شبکه جامع تری از ارتباطات میان عوامل را نشان داد و مبنای تعیین نیروی محرک، وابستگی و سطح بندی قرار گرفت.

جدول ۳

ماتریس دسترسی نهایی عوامل

عامل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	قدرت نفوذ
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳
۲	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱۰
۳	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱۰
۴	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱۱
۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۵
۶	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
۷	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
۸	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
۹	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
۱۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
۱۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۶
۱۲	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
۱۳	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
۱۴	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۱۶	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
وابستگی	۱۳	۱۱	۱۱	۱۰	۲	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۶	۱۰	-



نتایج ماتریس دسترسی نهایی نشان داد که عامل ۱۱، یعنی عوامل محیطی و حاکمیتی کلان، با قدرت نفوذ ۱۶ و وابستگی ۱، بنیادی‌ترین محرک مدل بود. عامل ۵، یعنی عوامل حقوقی و مالکیت فکری، نیز با قدرت نفوذ ۱۵ و وابستگی ۲ در جایگاه دوم عوامل نفوذکننده قرار گرفت. در نقطه مقابل، عامل ۱۵، یعنی ارزیابی عملکرد و شاخص‌های کلیدی، دارای قدرت نفوذ ۱ و وابستگی ۱۶ بود و بنابراین وابسته‌ترین مؤلفه و خروجی نهایی سیستم شناخته شد. عامل ۱، یعنی عوامل استراتژیک و مدیریتی، نیز با قدرت نفوذ ۳ و وابستگی ۱۳ ماهیتی عمدتاً وابسته نشان داد.

بخش عمده عوامل در محدوده قدرت نفوذ و وابستگی نسبتاً بالا قرار گرفتند. این الگو بیانگر آن است که سیستم پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد ماهیتی شبکه‌ای دارد و اکثر عوامل نه صرفاً علت و نه صرفاً معلول هستند، بلکه هم‌زمان در معرض اثرپذیری و اثرگذاری قرار دارند. عوامل فرهنگی و انسانی، ساختاری و سازمانی، مالی و اقتصادی، تکنولوژیک و زیرساختی، شبکه‌سازی، تأمین‌کنندگان، مشتریان و بازار، زیست‌محیطی و پایداری، مدیریت ریسک، مدیریت دانش، مدیریت منابع انسانی و تحول دیجیتال در این بخش قرار گرفتند. سطح‌بندی عوامل از طریق مقایسه مجموعه دستیافتنی، مجموعه پیشایند و اشتراک این دو مجموعه انجام شد. در نخستین تکرار، عامل ۱۵ به دلیل آنکه مجموعه دستیافتنی آن تنها خود عامل را دربر می‌گرفت، در بالاترین سطح قرار گرفت. پس از حذف آن، فرایند به‌صورت تکراری ادامه یافت. عامل ۱ دارای مجموعه دستیافتنی شامل عوامل ۱، ۹ و ۱۵ بود و پس از حذف عامل سطح نخست، همراه با عامل ۹ در سطح دوم قرار گرفت. عوامل ۲، ۳، ۴، ۸، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ در سطح سوم؛ عوامل ۵، ۶، ۷، ۱۰ و ۱۶ در سطح چهارم؛ و عامل ۱۱ به‌تنهایی در سطح پنجم قرار گرفت. نتیجه نهایی سطح‌بندی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴

نتایج نهایی سطح‌بندی عوامل در مدل ISM

سطح	کد عوامل	عوامل	ویژگی ساختاری	پیامد مدیریتی
سطح ۱؛ بالاترین و وابسته‌ترین	۱۵	ارزیابی عملکرد و شاخص‌های کلیدی	نتیجه نهایی	به‌عنوان خروجی نهایی و شاخص پایش عملکرد سیستم ارزیابی شود
سطح ۲	۹، ۱	عوامل استراتژیک و مدیریتی؛ عوامل مرتبط با مشتریان و بازار	خروجی‌های میانی	بهبود آنها مستلزم تقویت پیش‌نیازهای سطوح پایین‌تر است
سطح ۳	۲، ۳، ۴، ۸، ۱۲، ۱۳، ۱۴	فرهنگی و انسانی؛ ساختاری و سازمانی؛ مالی و اقتصادی؛ تأمین‌کنندگان؛ مدیریت ریسک و تاب‌آوری؛ مدیریت دانش و ظرفیت جذب؛ مدیریت منابع انسانی و استعدادها	عوامل پیوندی استراتژیک	به دلیل تراکم بالای تعاملات، کانون اصلی مداخلات مدیریتی هستند
سطح ۴	۵، ۶، ۷، ۱۰، ۱۶	حقوقی و مالکیت فکری؛ تکنولوژیک و زیرساختی؛ شبکه‌سازی و اکوسیستم؛ زیست‌محیطی و پایداری؛ تحول دیجیتال و هوشمندسازی	عوامل زیرساختی	بسترهای نهادی، فنی و شبکه‌ای اجرای نوآوری باز را فراهم می‌کنند
سطح ۵؛ پایین‌ترین و نفوذکننده‌ترین	۱۱	عوامل محیطی و حاکمیتی کلان	محرک اصلی	ریشه‌ای‌ترین عامل مدل است و تغییرات سیستم از این سطح آغاز می‌شود

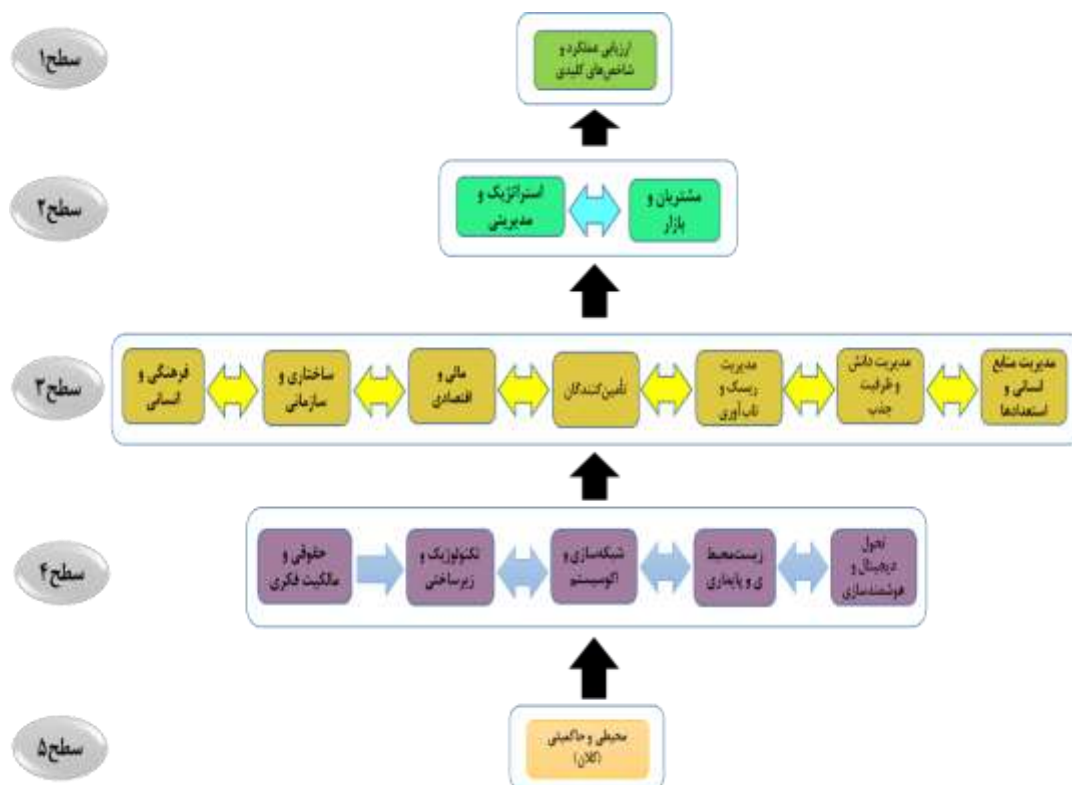
تحلیل مجموعه‌های دستیافتنی و پیشایند نیز این ساختار را تأیید کرد. عامل ۱۵ تنها یک خروجی و ۱۶ ورودی داشت و در سطح نخست قرار گرفت. عوامل ۱ و ۹ به دلیل وابستگی بالا و قرارگیری پس از خروجی نهایی، سطح دوم را تشکیل دادند. در سطح سوم، عوامل

فرهنگی و انسانی، ساختاری و سازمانی، مالی و اقتصادی، تأمین کنندگان، مدیریت ریسک، مدیریت دانش و منابع انسانی به دلیل تعداد بالای روابط مشترک و تعامل با سایر اجزای سیستم قرار گرفتند. در سطح چهارم، عوامل حقوقی، تکنولوژیک، شبکه‌ای، زیست‌محیطی و تحول دیجیتال با قدرت محرک نسبتاً بالا به‌عنوان زیرساخت‌های سیستم مشخص شدند. نهایتاً عامل محیطی و حاکمیتی کلان با بیشترین دامنه دسترسی و کمترین وابستگی، در پایین‌ترین و بنیادی‌ترین سطح جای گرفت.

عامل ۱۱ با دسترسی به تمامی عوامل سیستم، نقش ریشه‌ای داشت، در حالی که عامل ۱۵ تنها به خودش دسترسی داشت. عامل ۵ نیز دامنه خروجی بسیار گسترده و ورودی محدود داشت. عوامل ۶، ۷، ۱۰ و ۱۶ نیز خروجی‌های گسترده‌ای نشان دادند و از این رو در لایه زیرساختی قرار گرفتند. در مقابل، عوامل ۱ و ۹ در نزدیکی خروجی نهایی جای گرفتند و عمدتاً منعکس‌کننده نتایج حاصل از عملکرد سطوح پایین‌تر بودند.

شکل ۱

مدل ساختاری تفسیری پنج‌سطحی عوامل کلیدی پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد



مدل ساختاری تفسیری حاصل نشان داد که جهت غالب تأثیر از سطح پنجم به سطح نخست است. به این ترتیب، تغییر در محیط کلان و حاکمیتی ابتدا بر زیرساخت‌های حقوقی، فناوریانه، شبکه‌ای، زیست‌محیطی و دیجیتال اثر می‌گذارد؛ این عوامل سپس زمینه تغییر در مؤلفه‌های فرهنگی، ساختاری، مالی، تأمین کنندگان، ریسک، دانش و منابع انسانی را فراهم می‌کنند؛ پیامد این تعاملات در سطح بعدی در قالب جهت‌گیری‌های استراتژیک و پاسخ‌گویی به بازار ظاهر شده و در نهایت در شاخص‌های ارزیابی عملکرد منعکس می‌شود. برای تحلیل دقیق‌تر قدرت نفوذ و وابستگی عوامل، تحلیل MICMAC انجام شد. نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.



قدرت نفوذ و میزان وابستگی عوامل در تحلیل MICMAC

کد	عامل	وابستگی	قدرت نفوذ	طبقه MICMAC
۱	عوامل استراتژیک و مدیریتی	۱۳	۳	وابسته
۲	عوامل فرهنگی و انسانی	۱۱	۱۰	پیوندی
۳	عوامل ساختاری و سازمانی	۱۱	۱۰	پیوندی
۴	عوامل مالی و اقتصادی	۱۰	۱۱	پیوندی
۵	عوامل حقوقی و مالکیت فکری	۲	۱۵	مستقل/نفوذکننده
۶	عوامل تکنولوژیک و زیرساختی	۱۰	۱۴	پیوندی
۷	عوامل شبکه‌سازی و اکوسیستم	۱۰	۱۴	پیوندی
۸	عوامل مرتبط با تأمین‌کنندگان	۱۰	۱۴	پیوندی
۹	عوامل مرتبط با مشتریان و بازار	۱۰	۱۴	پیوندی
۱۰	عوامل زیست‌محیطی و پایداری	۱۰	۱۴	پیوندی
۱۱	عوامل محیطی و حاکمیتی کلان	۱	۱۶	مستقل/نفوذکننده
۱۲	عوامل مدیریت ریسک و تاب‌آوری	۱۰	۱۴	پیوندی
۱۳	مدیریت دانش و ظرفیت جذب	۱۰	۱۴	پیوندی
۱۴	مدیریت منابع انسانی و استعدادها	۱۰	۱۴	پیوندی
۱۵	ارزیابی عملکرد و شاخص‌های کلیدی	۱۶	۱	وابسته
۱۶	عوامل مرتبط با تحول دیجیتال و هوشمندسازی	۱۰	۱۴	پیوندی

تحلیل MICMAC سه گروه اصلی از عوامل را آشکار ساخت. در ناحیه عوامل مستقل یا نفوذکننده، عوامل محیطی و حاکمیتی کلان و حقوقی و مالکیت فکری قرار گرفتند. عامل محیطی و حاکمیتی با قدرت نفوذ ۱۶ و وابستگی ۱، قوی‌ترین محرک سیستم و عامل حقوقی و مالکیت فکری با قدرت نفوذ ۱۵ و وابستگی ۲، دومین عامل مستقل بود. بنابراین، تحولات سیاستی، مقرراتی، نهادی و حقوقی می‌توانند آثار زنجیره‌ای قابل توجهی بر سایر ابعاد پیاده‌سازی نوآوری باز ایجاد کنند.

در ناحیه پیوندی، ۱۲ عامل از مجموع ۱۶ عامل، معادل ۷۵ درصد عوامل، قرار گرفتند. این گروه شامل عوامل فرهنگی و انسانی، ساختاری و سازمانی، مالی و اقتصادی، تکنولوژیک و زیرساختی، شبکه‌سازی و اکوسیستم، تأمین‌کنندگان، مشتریان و بازار، زیست‌محیطی و پایداری، مدیریت ریسک، مدیریت دانش، منابع انسانی و تحول دیجیتال بود. وجود تعداد زیادی از عوامل در این ناحیه بیانگر پیچیدگی بالای سیستم است؛ زیرا این عوامل هم قدرت نفوذ بالایی دارند و هم به شدت از سایر متغیرها تأثیر می‌پذیرند. در نتیجه، تغییر در هر یک از آنها می‌تواند از طریق حلقه‌های بازخوردی، آثار مستقیم و غیرمستقیم متعددی ایجاد کند.

در ناحیه وابسته، عوامل استراتژیک و مدیریتی و ارزیابی عملکرد قرار گرفتند. عامل ارزیابی عملکرد با وابستگی ۱۶ و قدرت نفوذ ۱، وابسته‌ترین مؤلفه سیستم بود و عامل استراتژیک و مدیریتی نیز با وابستگی ۱۳ و قدرت نفوذ ۳، بیشتر ماهیت پیامدی نشان داد. هیچ‌یک از عوامل در ناحیه خودمختار قرار نگرفتند. فقدان عامل خودمختار نشان داد که تمامی مؤلفه‌های شناسایی شده به شبکه کلی پیاده‌سازی نوآوری باز متصل هستند و هیچ عامل حاشیه‌ای یا منفک از سیستم وجود ندارد.

پس از استخراج ساختار ISM و تحلیل MICMAC، مدل حاصل با استفاده از مدل سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. مدل اندازه گیری از نوع بازتابی بود و برای ارزیابی آن از بارهای عاملی، آماره t ، آلفای کرونباخ، پایایی ترکیبی و میانگین واریانس استخراج شده استفاده شد. نتایج در جدول ۶ گزارش شده است.

جدول ۶

نتایج ارزیابی مدل اندازه گیری، روایی همگرا و پایایی سازه ها

سطح	سازه	گویه	بار عاملی	t	α	میانگین	SD	CR	AVE
۵	محیطی و حاکمیتی	Q۱	۰.۸۵۱	۱۷.۴۲۱	۰.۸۷۳	۳.۹۱۲	۰.۸۴۱	۰.۹۲۱	۰.۷۹۵
		Q۲	۰.۹۰۲	۲۱.۶۸۱					
		Q۳	۰.۸۶۷	۱۹.۱۵۲					
۴	حقوقی و مالکیت فکری	Q۴	۰.۸۷۴	۱۸.۹۳۱	۰.۸۴۵	۳.۷۲۱	۰.۹۱۱	۰.۹۰۷	۰.۷۶۵
		Q۵	۰.۸۹۱	۲۰.۱۴۱					
۴	تکنولوژیک و زیرساختی	Q۶	۰.۸۶۲	۱۸.۴۷۱	۰.۸۳۲	۳.۸۵۱	۰.۸۸۱	۰.۸۹۸	۰.۷۴۵
		Q۷	۰.۸۸۳	۱۹.۶۲۱					
۴	شبکه سازی و اکوسیستم	Q۸	۰.۸۴۵	۱۶.۸۹۱	۰.۸۲۱	۳.۶۸۱	۰.۹۲۱	۰.۸۹۲	۰.۷۳۴
		Q۹	۰.۸۷۶	۱۸.۳۵۱					
۴	زیست محیطی و پایداری	Q۱۰	۰.۸۳۲	۱۵.۷۴۱	۰.۸۰۶	۳.۵۴۱	۰.۹۵۱	۰.۸۸۴	۰.۷۱۸
		Q۱۱	۰.۸۵۸	۱۷.۲۳۱					
۴	تحول دیجیتال و هوشمندسازی	Q۱۲	۰.۸۶۹	۱۸.۹۴۱	۰.۸۳۸	۳.۷۹۱	۰.۸۷۲	۰.۹۰۳	۰.۷۵۲
		Q۱۳	۰.۸۷۹	۱۹.۴۱۱					
۳	فرهنگی و انسانی	Q۱۴	۰.۸۶۱	۱۸.۸۵۱	۰.۸۳۵	۳.۶۲۱	۰.۸۹۱	۰.۸۹۹	۰.۷۴۸
		Q۱۵	۰.۸۷۹	۱۹.۲۳۱					
۳	ساختاری و سازمانی	Q۱۶	۰.۸۵۴	۱۷.۴۲۱	۰.۸۲۹	۳.۵۸۱	۰.۹۱۱	۰.۸۹۵	۰.۷۴۲
		Q۱۷	۰.۸۷۳	۱۸.۶۷۱					
۳	مالی و اقتصادی	Q۱۸	۰.۸۴۸	۱۶.۹۳۱	۰.۸۱۸	۳.۴۵۱	۰.۹۴۱	۰.۸۸۸	۰.۷۲۶
		Q۱۹	۰.۸۶۲	۱۶.۹۳۱					
۳	تأمین کنندگان	Q۲۰	۰.۸۳۷	۱۷.۸۴۱	۰.۸۱۲	۳.۵۱۱	۰.۹۳۱	۰.۸۸۶	۰.۷۲۱
		Q۲۱	۰.۸۵۹	۱۶.۱۲۱					
۳	مدیریت ریسک	Q۲۲	۰.۸۴۴	۱۷.۴۵۱	۰.۸۱۵	۳.۴۸۱	۰.۹۲۲	۰.۸۸۹	۰.۷۲۸
		Q۲۳	۰.۸۶۵	۱۶.۷۴۲					
۳	مدیریت دانش	Q۲۴	۰.۸۶۸	۱۷.۹۲۱	۰.۸۳۶	۳.۶۷۲	۰.۸۸۲	۰.۹۰۲	۰.۷۵۳
		Q۲۵	۰.۸۸۲	۱۸.۲۳۱					
۳	منابع انسانی	Q۲۶	۰.۸۵۶	۱۹.۵۴۲	۰.۸۲۵	۳.۵۶۲	۰.۹۰۲	۰.۸۹۴	۰.۷۳۸
		Q۲۷	۰.۸۷۱	۱۷.۳۴۱					
۲	استراتژیک و مدیریتی	Q۲۸	۰.۸۷۶	۱۸.۵۶۲	۰.۸۴۲	۳.۸۲۱	۰.۸۶۱	۰.۹۰۵	۰.۷۵۹
		Q۲۹	۰.۸۸۵	۱۹.۱۲۱					
۲	مشتریان و بازار	Q۳۰	۰.۸۵۹	۲۰.۰۳۱	۰.۸۲۸	۳.۷۳۲	۰.۸۹۲	۰.۸۹۳	۰.۷۳۷
		Q۳۱	۰.۸۷۲	۱۷.۶۸۱					
۱	ارزیابی عملکرد و شاخص های کلیدی	Q۳۲	۰.۸۹۳	۲۰.۸۷۱	۰.۸۵۶	۳.۹۵۱	۰.۸۲۲	۰.۹۱۳	۰.۷۷۴
		Q۳۳	۰.۹۰۷	۲۲.۱۴۱					



تمام بارهای عاملی گزارش‌شده بیش از ۰.۸۳ بود و آماره‌های t مربوط به آنها نیز به مراتب از مقدار بحرانی ۱.۹۶ بیشتر بود؛ بنابراین ارتباط گویه‌ها با سازه‌های مربوطه در سطح ۰.۰۵ معنادار بود. آلفای کرونباخ همه سازه‌ها از ۰.۸۰۶ تا ۰.۸۷۳ و پایایی ترکیبی از ۰.۸۸۴ تا ۰.۹۲۱ متغیر بود و همگی بالاتر از حد ۰.۷۰ قرار داشتند. میانگین واریانس استخراج‌شده نیز برای تمام سازه‌ها بالاتر از ۰.۵۰ بود و از ۰.۷۱۸ تا ۰.۷۹۵ تغییر می‌کرد. بنابراین، پایایی درونی و روایی همگرایی مدل اندازه‌گیری تأیید شد.

از نظر توصیفی، بالاترین میانگین مربوط به ارزیابی عملکرد و شاخص‌های کلیدی با میانگین ۳.۹۵۱ و پس از آن محیطی و حاکمیتی با میانگین ۳.۹۱۲ بود. تکنولوژیک و زیرساختی با میانگین ۳.۸۵۱ و استراتژیک و مدیریتی با میانگین ۳.۸۲۱ نیز مقادیر نسبتاً بالایی داشتند. کمترین میانگین در میان سازه‌ها مربوط به مالی و اقتصادی با مقدار ۳.۴۵۱ بود.

برای ارزیابی روایی و اگر، ابتدا معیار فورنل-لارکر بررسی شد. در جدول ۷، مقادیر قطر اصلی معرف ریشه دوم AVE هر سازه و مقادیر زیر قطر بیانگر همبستگی بین سازه‌ها هستند.

جدول ۷

ماتریس فورنل-لارکر سازه‌های پژوهش

سازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۱	۰.۸۹															
۲	۰.۵۸	۰.۸۷														
۳	۰.۶۱	۰.۵۱	۰.۸۶													
۴	۰.۵۵	۰.۵۴	۰.۵۸	۰.۸۵												
۵	۰.۴۹	۰.۴۶	۰.۵۱	۰.۵۳	۰.۸۴											
۶	۰.۵۷	۰.۴۹	۰.۵۵	۰.۵۲	۰.۴۸	۰.۸۶										
۷	۰.۵۳	۰.۴۸	۰.۵۳	۰.۵۵	۰.۴۶	۰.۵۰	۰.۸۶									
۸	۰.۵۵	۰.۴۹	۰.۵۴	۰.۵۳	۰.۴۴	۰.۵۲	۰.۶۳	۰.۸۶								
۹	۰.۵۱	۰.۴۶	۰.۵۰	۰.۴۹	۰.۴۳	۰.۴۸	۰.۵۷	۰.۵۹	۰.۸۵							
۱۰	۰.۴۸	۰.۴۳	۰.۴۸	۰.۵۱	۰.۴۲	۰.۴۶	۰.۵۳	۰.۵۴	۰.۵۶	۰.۸۴						
۱۱	۰.۵۰	۰.۴۵	۰.۴۹	۰.۵۰	۰.۴۱	۰.۴۷	۰.۵۴	۰.۵۵	۰.۵۳	۰.۵۴	۰.۸۵					
۱۲	۰.۵۳	۰.۴۷	۰.۵۲	۰.۵۲	۰.۴۴	۰.۴۹	۰.۵۸	۰.۵۶	۰.۵۴	۰.۵۲	۰.۵۶	۰.۸۶				
۱۳	۰.۵۱	۰.۴۶	۰.۴۹	۰.۵۱	۰.۴۲	۰.۴۸	۰.۵۹	۰.۵۶	۰.۵۲	۰.۵۱	۰.۵۴	۰.۵۷	۰.۸۶			
۱۴	۰.۵۴	۰.۴۸	۰.۵۳	۰.۵۴	۰.۴۵	۰.۵۰	۰.۵۷	۰.۵۸	۰.۵۴	۰.۵۱	۰.۵۳	۰.۵۷	۰.۵۵	۰.۸۵		
۱۵	۰.۵۲	۰.۴۶	۰.۵۰	۰.۵۲	۰.۴۳	۰.۴۸	۰.۵۴	۰.۵۵	۰.۵۲	۰.۴۹	۰.۵۱	۰.۵۴	۰.۵۵	۰.۵۵	۰.۸۵	
۱۶	۰.۵۰	۰.۴۴	۰.۴۸	۰.۴۹	۰.۴۱	۰.۴۶	۰.۵۲	۰.۵۳	۰.۴۹	۰.۴۷	۰.۴۹	۰.۵۲	۰.۵۳	۰.۵۳	۰.۶۱	۰.۸۸

در تمام سازه‌ها مقدار قطر اصلی از ضرایب همبستگی همان سازه با سایر سازه‌ها بیشتر بود. بنابراین، هر سازه واریانس بیشتری را با شاخص‌های خود نسبت به سایر سازه‌ها به اشتراک گذاشت و معیار فورنل-لارکر تأیید شد. به‌طور کلی، مقادیر قطر اصلی در محدوده تقریبی ۰.۸۴ تا ۰.۸۹ قرار داشت، در حالی که همبستگی‌های بین‌سازه‌ای در تمامی موارد پایین‌تر از این مقادیر بودند. الگوی همبستگی‌ها همچنین نشان داد سازه‌هایی که در مدل ISM در سطوح نزدیک قرار داشتند، ارتباط بیشتری با یکدیگر داشتند؛ در مقابل، سازه‌هایی که در سطوح دورتر مدل واقع شده بودند، عموماً همبستگی‌های ضعیف‌تری نشان دادند.

برای اطمینان بیشتر از تمایز مفهومی سازه‌ها، شاخص HTMT نیز محاسبه شد. نتایج در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸

نتایج روایی واگرا براساس معیار HTMT

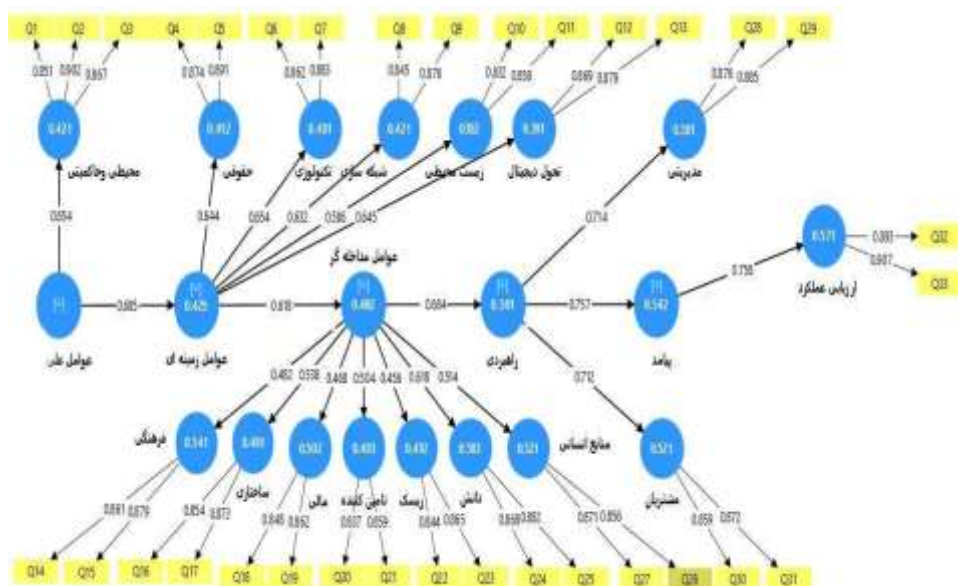
سازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۱	-															
۲	۰.۶۷	-														
۳	۰.۷۰	۰.۶۱	-													
۴	۰.۶۴	۰.۶۳	۰.۶۸	-												
۵	۰.۵۷	۰.۵۴	۰.۵۹	۰.۶۲	-											
۶	۰.۶۵	۰.۵۸	۰.۶۴	۰.۶۱	۰.۵۶	-										
۷	۰.۶۱	۰.۵۶	۰.۶۲	۰.۶۴	۰.۵۴	۰.۵۹	-									
۸	۰.۶۳	۰.۵۸	۰.۶۳	۰.۶۲	۰.۵۲	۰.۶۱	۰.۷۴	-								
۹	۰.۵۸	۰.۵۴	۰.۵۹	۰.۵۸	۰.۵۱	۰.۵۶	۰.۶۷	۰.۶۸	-							
۱۰	۰.۵۵	۰.۵۱	۰.۵۶	۰.۵۹	۰.۵۰	۰.۵۴	۰.۶۲	۰.۶۳	۰.۶۵	-						
۱۱	۰.۵۸	۰.۵۳	۰.۵۷	۰.۵۸	۰.۴۹	۰.۵۵	۰.۶۳	۰.۶۴	۰.۶۳	۰.۶۳	-					
۱۲	۰.۶۱	۰.۵۵	۰.۶۰	۰.۶۱	۰.۵۲	۰.۵۷	۰.۶۷	۰.۶۶	۰.۶۲	۰.۶۱	۰.۶۶	-				
۱۳	۰.۵۹	۰.۵۴	۰.۵۷	۰.۶۰	۰.۵۰	۰.۵۶	۰.۶۹	۰.۶۵	۰.۶۱	۰.۵۹	۰.۶۳	۰.۷۱	-			
۱۴	۰.۶۲	۰.۵۷	۰.۶۱	۰.۶۳	۰.۵۳	۰.۵۹	۰.۶۶	۰.۶۸	۰.۶۳	۰.۶۰	۰.۶۲	۰.۶۶	۰.۶۸	-		
۱۵	۰.۶۰	۰.۵۵	۰.۵۹	۰.۶۱	۰.۵۱	۰.۵۶	۰.۶۳	۰.۶۴	۰.۶۱	۰.۵۷	۰.۵۹	۰.۶۳	۰.۶۴	۰.۷۴	-	
۱۶	۰.۵۸	۰.۵۲	۰.۵۶	۰.۵۸	۰.۴۹	۰.۵۴	۰.۶۱	۰.۶۲	۰.۵۸	۰.۵۵	۰.۵۷	۰.۶۱	۰.۶۲	۰.۶۹	۰.۷۱	-

تمام مقادیر HTMT کمتر از ۰.۹۰ و حتی کمتر از ۰.۸۵ بودند؛ بنابراین روایی واگرای مدل براساس معیار سخت‌گیرانه HTMT نیز تأیید شد. مقادیر مشاهده‌شده تقریباً از ۰.۴۹ تا ۰.۷۴ تغییر داشتند. بیشترین مقادیر در روابط بین برخی سازه‌های نزدیک و مرتبط مفهومی مشاهده شد، اما حتی این مقادیر نیز فاصله قابل‌توجهی با آستانه ۰.۸۵ داشتند. این یافته، همراه با نتایج فورنل-لارکر، نشان داد که هر یک از ۱۶ سازه مدل از تمایز تجربی کافی برخوردار است.

پس از تأیید پایایی، روایی همگرا و روایی واگرای مدل اندازه‌گیری، مدل ساختاری مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله، روابط میان متغیرهای پنهان از طریق ضرایب مسیر استانداردشده و معناداری آنها براساس آماره t ارزیابی شد. در تفسیر نتایج، مقدار مطلق آماره t بیشتر از ۱.۹۶ به‌عنوان معیار معناداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. ضرایب مسیر نیز جهت و شدت روابط میان سازه‌ها را نشان دادند؛ به‌طوری‌که مقدار مطلق بزرگ‌تر ضریب مسیر معرف اثر قوی‌تر بود و علامت ضریب، جهت رابطه را مشخص می‌کرد.

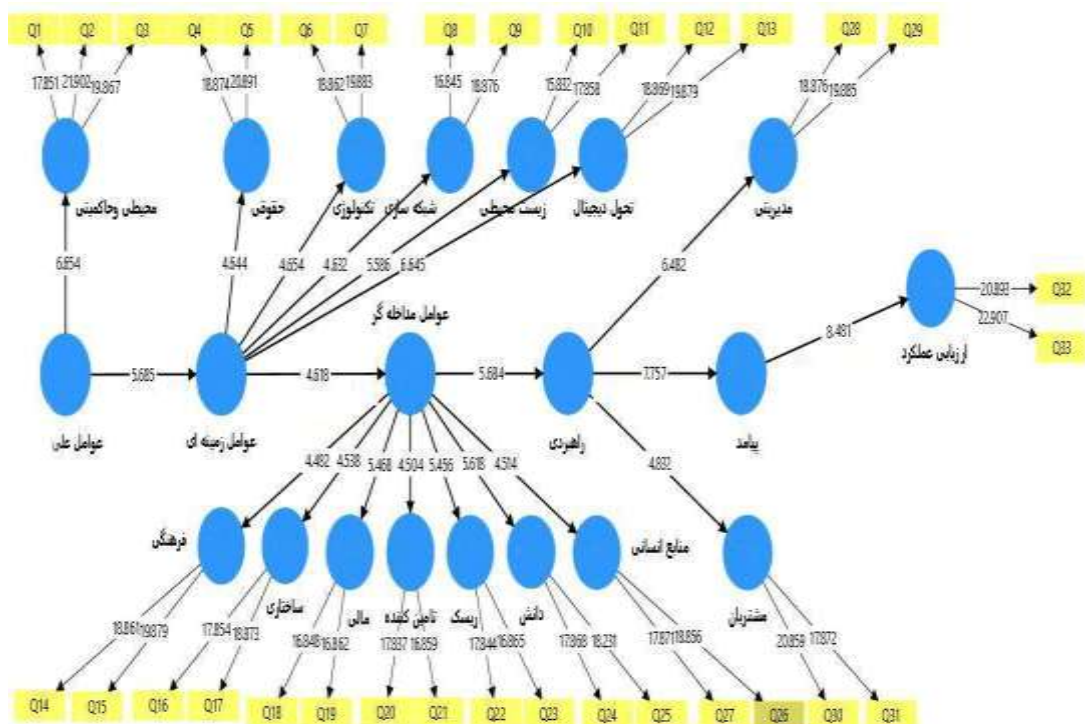
شکل ۲

ضرایب مسیر استاندارد و بارهای عاملی مدل پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد



شکل ۳

مقادیر آماره t و معناداری ضرایب مسیر مدل ساختاری



در مدل ضرایب استاندارد، روابط میان متغیرهای پنهان با ضرایب مسیر و روابط میان متغیرهای پنهان و گویه‌های متناظر با بارهای عاملی نمایش داده شدند. یافته‌های مدل اندازه‌گیری نشان داده بود که بارهای عاملی تمامی گویه‌ها در سطح مطلوب قرار داشتند و از این رو شاخص‌ها سهم معناداری در اندازه‌گیری سازه‌های مربوطه داشتند. در سطح مدل ساختاری نیز ضرایب مسیر بیانگر جهت و شدت تأثیر سازه‌ها بر یکدیگر بودند و مبنای آزمون تجربی روابط حاصل از مدل ISM قرار گرفتند.

نتایج بوت‌استرپ و مقادیر آماره t برای بررسی معناداری روابط ساختاری مورد استفاده قرار گرفت. ملاک تصمیم‌گیری آن بود که در آزمون دوطرفه و سطح اطمینان ۹۵ درصد، مقادیر بزرگ‌تر از ۱.۹۶ یا کوچک‌تر از -۱.۹۶ نشان‌دهنده وجود رابطه معنادار باشند، در حالی که مقادیر واقع‌شده در فاصله -۱.۹۶ تا ۱.۹۶ از نظر آماری معنادار تلقی نشوند. بدین ترتیب، مدل کمی امکان آزمون تجربی روابط ساختاری شناسایی‌شده در مرحله کیفی و ISM را فراهم کرد.

در مجموع، نتایج کیفی و کمی از یک ساختار چندسطحی و به‌شدت به‌هم‌پیوسته برای پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد حکایت داشت. عوامل محیطی و حاکمیتی کلان و حقوقی و مالکیت فکری نقش محرک‌های بنیادی را ایفا کردند؛ عوامل فناورانه، شبکه‌ای، دیجیتال و سایر عوامل پیوندی سازوکار انتقال اثرات در سیستم بودند؛ عوامل استراتژیک و بازار به‌عنوان خروجی‌های میانی ظاهر شدند؛ و ارزیابی عملکرد و شاخص‌های کلیدی در نهایت وابسته‌ترین و پیامدی‌ترین جزء مدل بود. هم‌زمان، نتایج PLS-SEM نشان داد که ابزار سنجش ۱۶ سازه از پایایی، روایی همگرا و روایی واگرایی مطلوب برخوردار است و بنابراین ساختار استخراج‌شده از مرحله کیفی از پشتوانه اندازه‌گیری کمی مناسبی برخوردار بود.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد خوزستان ماهیتی چندبعدی، شبکه‌ای و سلسله‌مراتبی دارد و نمی‌توان آن را به یک عامل منفرد، یک فناوری خاص یا یک تصمیم مدیریتی محدود کرد. در بخش کیفی، ۱۶ عامل اصلی شامل عوامل استراتژیک و مدیریتی، فرهنگی و انسانی، ساختاری و سازمانی، مالی و اقتصادی، حقوقی و مالکیت فکری، تکنولوژیک و زیرساختی، شبکه‌سازی و اکوسیستم، تأمین‌کنندگان، مشتریان و بازار، زیست‌محیطی و پایداری، محیطی و حاکمیتی کلان، مدیریت ریسک و تاب‌آوری، مدیریت دانش و ظرفیت جذب، مدیریت منابع انسانی و استعدادها، ارزیابی عملکرد و شاخص‌های کلیدی و تحول دیجیتال و هوشمندسازی شناسایی شد. این گستردگی نشان می‌دهد که نوآوری باز در صنعت فولاد، بیش از آنکه صرفاً یک فرایند تحقیق و توسعه باشد، نوعی بازآرایی نظام‌مند در منطق تعامل سازمان با محیط، شرکای زنجیره تأمین، فناوری، دانش و بازار است. این نتیجه با دیدگاه‌هایی همسو است که نوآوری باز را نه یک ابزار منفرد، بلکه سازوکاری برای بازطراحی مدل کسب‌وکار، تجدید ظرفیت‌های صنعتی و تقویت تعاملات بین‌سازمانی معرفی کرده‌اند (Yun et al., 2025; Zen et al., 2025). همچنین، نتایج با مطالعاتی همخوان است که نشان داده‌اند دستیابی به عملکرد مطلوب در زنجیره تأمین فولاد مستلزم یکپارچگی میان ابعاد عملیاتی، فناورانه، مدیریتی و محیطی است (Alam, 2025; Askary et al., 2024). بنابراین، یافته اصلی این پژوهش تأکید می‌کند که موفقیت در نوآوری باز زمانی حاصل می‌شود که مدیریت زنجیره تأمین از رویکرد بخشی فاصله گرفته و به سمت یک معماری بین‌سازمانی و چندسطحی حرکت کند.

نتایج مدل‌سازی ساختاری تفسیری نشان داد که عامل «محیطی و حاکمیتی کلان» با قدرت نفوذ ۱۶ و وابستگی ۱، بنیادی‌ترین محرک سیستم است و در پایین‌ترین سطح مدل قرار می‌گیرد. این یافته بیان می‌کند که سیاست‌های کلان، چارچوب‌های تنظیم‌گری، شرایط اقتصادی، جهت‌گیری‌های صنعتی، حمایت‌های نهادی و قواعد حاکم بر تعاملات بین‌سازمانی، بستر اولیه برای شکل‌گیری یا محدودشدن نوآوری

باز هستند. در صنعت فولاد که ماهیتی سرمایه‌بر، انرژی‌بر و وابسته به سیاست‌گذاری‌های کلان دارد، این نتیجه منطقی است؛ زیرا بسیاری از تصمیمات مربوط به توسعه فناوری، سرمایه‌گذاری، همکاری با بازیگران بیرونی، واردات فناوری، توسعه زیرساخت و حرکت به سمت تولید سبز تحت تأثیر محیط نهادی قرار دارند. این نتیجه با یافته‌های مربوط به گذار سبز در صنعت فولاد نیز همخوان است؛ مطالعات نشان داده‌اند که تحول صنعت آهن و فولاد تنها از طریق نوآوری فنی در سطح بنگاه امکان‌پذیر نیست و نیازمند پشتیبانی نهادی، سیاستی و بازطراحی سازوکارهای حکمرانی است (Mallett & Pal, 2022). همچنین، توسعه زنجیره تأمین فولاد سبز و کم‌کربن مستلزم هماهنگی میان انرژی، مواد، زیرساخت و سیاست‌های صنعتی است (Lopez et al., 2023). بنابراین، محیط کلان در این پژوهش به‌درستی به‌عنوان محرک ریشه‌ای ظاهر شده است؛ عاملی که می‌تواند سایر مؤلفه‌ها را فعال یا محدود کند.

دومین عامل نفوذکننده در تحلیل MICMAC، عوامل حقوقی و مالکیت فکری با قدرت نفوذ ۱۵ و وابستگی ۲ بود. این نتیجه اهمیت ایجاد چارچوب‌های روشن برای مالکیت دانش، محرمانگی، قراردادهای همکاری، نحوه بهره‌برداری از فناوری و تقسیم منافع ناشی از نوآوری مشترک را نشان می‌دهد. ماهیت نوآوری باز بر جریان دانش میان مرزهای سازمانی استوار است، اما بدون قواعد حقوقی شفاف، سازمان‌ها معمولاً تمایل کمتری به اشتراک دانش حساس یا ورود به همکاری‌های بلندمدت دارند. این موضوع به‌ویژه در زنجیره تأمین فولاد اهمیت دارد، زیرا بخش قابل‌توجهی از نوآوری‌ها به فناوری‌های فرایندی، تجهیزات، فرمولاسیون‌ها، الگوریتم‌های پیش‌بینی، طراحی‌های صنعتی و دانش عملیاتی مرتبط است. از منظر نظری، این یافته با مطالعاتی همسو است که بر نقش سازوکارهای همکاری در ایجاد ارزش پایدار از نوآوری باز تأکید کرده‌اند (Viale et al., 2022). همچنین، توسعه مدل‌های نوآوری باز مبتنی بر همکاری و تبادل داده مستلزم ایجاد سازوکارهای اعتماد و حفاظت از دانش است (Gajdzik et al., 2024). بنابراین، عامل حقوقی در مدل حاضر صرفاً یک متغیر حمایتی نیست، بلکه یکی از زیرساخت‌های بنیادین برای فعال‌سازی شبکه‌های نوآوری محسوب می‌شود.

نتایج سطح‌بندی نشان داد که عوامل تکنولوژیک و زیرساختی، شبکه‌سازی و اکوسیستم، زیست‌محیطی و پایداری و تحول دیجیتال و هوشمندسازی در سطح زیرساختی قرار دارند. این جایگاه نشان می‌دهد که این عوامل واسطه انتقال اثرات محیط کلان به سطوح میانی سیستم هستند. در واقع، حتی اگر سیاست‌ها و قوانین مساعد باشند، نبود زیرساخت دیجیتال، ضعف ارتباطات شبکه‌ای، محدودیت‌های تکنولوژیک یا فقدان الزامات پایداری می‌تواند مانع عملیاتی‌شدن نوآوری باز شود. این نتیجه با یافته‌های مربوط به صنعت ۴.۰ در زنجیره تأمین فولاد همسو است؛ پژوهش‌ها نشان داده‌اند که موفقیت راهبردهای صنعت ۴.۰ در این صنعت به آمادگی زیرساختی، قابلیت‌های دیجیتال و هماهنگی بین سازمانی وابسته است (Motallebi et al., 2025). همچنین، نقش فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا در افزایش شفافیت، ردیابی و هماهنگی زنجیره تأمین مورد تأکید قرار گرفته است (De Vass et al., 2021). کاربرد هوش مصنوعی و اینترنت اشیا در بهینه‌سازی لجستیک و تصمیم‌گیری نیز نشان می‌دهد که زیرساخت فناورانه می‌تواند یک محرک مهم در افزایش کارایی و انعطاف‌پذیری باشد (Bhargava et al., 2022; Singh et al., 2021). از سوی دیگر، استفاده از سامانه‌های هوشمند مدیریت زنجیره تأمین و ابزارهای تحلیلی نیز می‌تواند تصمیم‌گیری و هماهنگی را بهبود بخشد (Sharma & Dash, 2023). بنابراین، جایگاه سطح چهارم برای این عوامل از نظر نظری و تجربی قابل توجیه است.

یافته مهم دیگر، قرارگرفتن هفت عامل فرهنگی و انسانی، ساختاری و سازمانی، مالی و اقتصادی، تأمین‌کنندگان، مدیریت ریسک و تاب‌آوری، مدیریت دانش و ظرفیت جذب و مدیریت منابع انسانی و استعدادها در سطح سوم و ناحیه پیوندی بود. این سطح متراکم‌ترین بخش مدل و کانون اصلی تعاملات سیستم است. قرارگیری این عوامل در ناحیه پیوندی بیانگر آن است که هم از عوامل زیرساختی و محیطی تأثیر می‌پذیرند و هم خود بر پیامدهای راهبردی و عملکردی اثر می‌گذارند. این نتیجه اهمیت عوامل نرم سازمانی را در کنار فناوری برجسته می‌کند.

برای مثال، وجود زیرساخت دیجیتال بدون فرهنگ همکاری، ظرفیت جذب دانش، ساختار منعطف و نیروی انسانی توانمند لزوماً به نوآوری باز موفق منجر نمی‌شود. این یافته با مطالعاتی همسو است که بر همسویی راهبردی نوآوری باز با سازوکارهای زنجیره تأمین برای ایجاد مزیت رقابتی تأکید کرده‌اند (Gonyora et al., 2021). همچنین، پژوهش‌های حوزه نوآوری باز نشان داده‌اند که ارزش‌آفرینی از تعاملات بیرونی به توانایی سازمان در جذب، ترکیب و بهره‌برداری از دانش خارجی وابسته است (Huang & Zhou, 2025). نقش منابع انسانی و دانش در این زمینه نیز بسیار مهم است، زیرا ظرفیت جذب بدون کارکنان متخصص، یادگیرنده و متمایل به همکاری شکل نمی‌گیرد.

قرار گرفتن تأمین‌کنندگان در سطح سوم نیز از منظر زنجیره تأمین اهمیت ویژه‌ای دارد. تأمین‌کنندگان در صنعت فولاد نه فقط تأمین‌کنندگان مواد اولیه یا تجهیزات، بلکه منابع مهم دانش فنی، راه‌حل‌های فرایندی و نوآوری‌های مشترک محسوب می‌شوند. تعامل نزدیک با تأمین‌کنندگان می‌تواند به کاهش عدم‌اطمینان، بهبود کیفیت، تسریع حل مسائل و توسعه فناوری‌های جدید منجر شود. در همین راستا، مطالعات مربوط به زنجیره تأمین باز و شبکه‌های دوقلوی دیجیتال نیز نشان داده‌اند که ادغام تأمین‌کنندگان در شبکه‌های دانش و اطلاعات، یکی از مؤلفه‌های کلیدی تحول زنجیره تأمین هوشمند است (Rahmanzadeh et al., 2023). یافته حاضر همچنین با دیدگاه‌های مرتبط با اقتصاد چرخشی همسو است؛ زیرا توسعه زنجیره تأمین چرخشی در صنعت فولاد نیازمند ردیابی جریان مواد، همکاری تأمین‌کنندگان و اشتراک اطلاعات است (Rakshit et al., 2025). بنابراین، نقش تأمین‌کنندگان در مدل حاضر باید فراتر از خرید و تأمین سنتی تفسیر شود و آنها به عنوان بخشی از شبکه نوآوری تلقی شوند.

نتایج همچنین نشان داد که عوامل استراتژیک و مدیریتی و مشتریان و بازار در سطح دوم قرار دارند و ماهیتی خروجی‌محورتر نسبت به عوامل زیرساختی و پیوندی دارند. این یافته از یک منظر مهم است؛ زیرا در نگاه اولیه انتظار می‌رود عامل استراتژیک و مدیریتی در پایین‌ترین سطح و در جایگاه محرک قرار گیرد، اما مدل نشان داد که راهبردهای اثربخش خود حاصل تعامل مجموعه‌ای از عوامل محیطی، زیرساختی، فرهنگی، مالی، دانشی و فناورانه‌اند. این نتیجه بیان می‌کند که استراتژی نوآوری باز باید بر بستر ظرفیت‌های واقعی سازمان و زنجیره تأمین شکل گیرد، نه صرفاً از طریق تصمیم بالا به پایین. این تفسیر با یافته‌هایی همسو است که نشان می‌دهند اثربخشی راهبرد نوآوری باز به نحوه هم‌راستایی آن با ظرفیت‌های سازمانی و ساختار عملکرد بستگی دارد (Wang, 2024). همچنین، پویایی‌های نوآوری باز می‌توانند از طریق تغییر مدل کسب‌وکار و پاسخ‌گویی به فرصت‌های بازار، مسیرهای جدید ارزش‌آفرینی ایجاد کنند (Yun et al., 2025). قرارگیری مشتریان و بازار در همین سطح نیز نشان می‌دهد که پاسخ‌گویی بازار نتیجه‌ای از عملکرد موفق لایه‌های زیرین است و نوآوری باز زمانی ارزشمند است که نهایتاً در قالب پاسخ بهتر به نیاز مشتری، کاهش زمان پاسخ، بهبود کیفیت یا توسعه محصول متجلی شود.

قرار گرفتن «ارزیابی عملکرد و شاخص‌های کلیدی» در سطح نخست با قدرت نفوذ ۱ و وابستگی ۱۶، آن را به وابسته‌ترین و نهایی‌ترین پیامد سیستم تبدیل کرد. این یافته نشان می‌دهد که عملکرد را نباید صرفاً با مداخلات مستقیم بهبود داد، بلکه ارتقای واقعی شاخص‌های عملکرد زمانی رخ می‌دهد که زنجیره‌ای از عوامل ریشه‌ای و واسطه‌ای به صورت هماهنگ اصلاح شوند. این نتیجه با مطالعات سیستم‌دینامیک در زنجیره تأمین فولاد هم‌راستا است که نشان داده‌اند نتایج عملکردی مانند موجودی، ظرفیت تولید و پاسخ‌گویی به تقاضا محصول تعامل حلقه‌های متعدد بازخورد و تأخیر در سیستم هستند (Mohammadi et al., 2022). همچنین، مدل‌های بهینه‌سازی زنجیره تأمین فولاد نیز تأکید می‌کنند که عملکرد مطلوب نتیجه تعادل میان چندین معیار اقتصادی، عملیاتی و پایداری است (Askary et al., 2024). بنابراین، بهبود شاخص‌های عملکردی باید به عنوان پیامد نهایی یک معماری سیستمی دیده شود، نه هدفی که با یک اقدام منفرد قابل تحقق باشد.

یافته‌های مربوط به تحلیل MICMAC نیز اهمیت ساختار شبکه‌ای مدل را تقویت کرد. قرار گرفتن ۱۲ عامل از ۱۶ عامل در ناحیه پیوندی نشان داد که نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد با سطح بالایی از وابستگی متقابل همراه است. این امر بدان معناست که مداخله

در یک عامل می‌تواند آثار دومینویی ایجاد کند و در عین حال تحت تأثیر واکنش سایر عوامل قرار گیرد. چنین الگویی با ماهیت پیچیده زنجیره تأمین فولاد همخوان است، زیرا این صنعت شامل روابط گسترده بین تأمین مواد اولیه، تولید، انرژی، لجستیک، مشتریان، مقررات و فناوری است (Alam, 2025). همچنین، مطالعات مربوط به اولویت‌بندی موانع زنجیره تأمین فولاد نشان داده‌اند که عوامل مختلف به صورت مستقل عمل نمی‌کنند و مدیریت مؤثر مستلزم توجه هم‌زمان به چندین دسته از محدودیت‌هاست (Kumar et al., 2025). از این رو، یافته حاضر تأکید می‌کند که مداخلات مدیریتی در حوزه نوآوری باز باید هماهنگ و چندبعدی باشند و از تمرکز افراطی بر یک عامل واحد اجتناب شود. نتایج مدل اندازه‌گیری نیز از اعتبار ساختار استخراج‌شده حمایت کرد. بارهای عاملی همه گویه‌ها بیش از ۰.۸۳، آلفای کرونباخ همه سازه‌ها بیش از ۰.۸۰، پایایی ترکیبی بیش از ۰.۸۸ و میانگین واریانس استخراج‌شده بیش از ۰.۷۱ بود. همچنین معیار فورنل-لارکر و HTMT تمایز مناسب سازه‌ها را تأیید کردند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ۱۶ عامل شناسایی‌شده از نظر تجربی نیز ساختارهایی متمایز اما مرتبط را تشکیل می‌دهند. این موضوع از نظر مفهومی اهمیت دارد، زیرا برخی سازه‌ها مانند فرهنگ، ساختار، دانش، منابع انسانی و تحول دیجیتال ممکن است در عمل همپوشانی داشته باشند، اما نتایج نشان داد که هر یک سهم مستقل و قابل تشخیصی در تبیین نوآوری باز دارند. همچنین، ارتباط نسبی بین سازه‌های نزدیک در مدل با ادبیات موجود همسو است؛ برای مثال، پیوند میان فناوری دیجیتال و نوآوری باز در نوسازی خوشه‌های صنعتی مورد تأکید قرار گرفته است (Zen et al., 2025) و نقش ابزارهای دیجیتال در تقویت شبکه‌سازی و شفافیت نیز در مطالعات زنجیره تأمین مشاهده شده است (De Vass et al., 2021). از سوی دیگر، ارتباط میان پایداری و نوآوری باز نیز با نتایج پژوهش‌هایی هماهنگ است که نشان داده‌اند همکاری باز می‌تواند توسعه راهکارهای پایدار و چرخه‌ای را تسریع کند (do Prado et al., 2025; Viale et al., 2022).

در مجموع، یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که پیاده‌سازی نوآوری باز در زنجیره تأمین صنعت فولاد نیازمند حرکت از عوامل ریشه‌ای به سمت عوامل زیرساختی، سپس عوامل پیوندی و در نهایت پیامدهای راهبردی و عملکردی است. محیط کلان و نظام حقوقی نقطه آغاز تغییر هستند؛ فناوری، شبکه‌سازی، پایداری و تحول دیجیتال بستر را فراهم می‌کنند؛ فرهنگ، ساختار، دانش، منابع انسانی، مالی، ریسک و تأمین‌کنندگان سازوکارهای عملیاتی و تعاملی را شکل می‌دهند؛ و در نهایت، استراتژی، بازار و عملکرد به عنوان نتایج این فرایند ظاهر می‌شوند. این ساختار با مطالعاتی که نوآوری باز را ابزاری برای تحول پایدار، دیجیتال و شبکه‌ای صنایع می‌دانند همخوان است (Gajdzik et al., 2025; Rahmanzadeh et al., 2023; al., 2024). همچنین، نقش مدیریت موجودی هوشمند و پیش‌بینی تقاضا در صنعت فولاد نشان می‌دهد که داده و تعاملات بازار باید در کنار زیرساخت‌های فنی توسعه یابند (Sukolkrit et al., 2024). بنابراین، نوآوری باز در صنعت فولاد باید به عنوان یک قابلیت سیستمی و بین‌سازمانی مورد توجه قرار گیرد، نه صرفاً مجموعه‌ای از پروژه‌های همکاری فناورانه. این پژوهش با چند محدودیت همراه بود. نخست، بخش کیفی بر دیدگاه ۱۵ نفر از خبرگان علمی و اجرایی صنعت فولاد خوزستان استوار بود؛ بنابراین، هر چند نمونه‌گیری تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت، ممکن است برخی دیدگاه‌های خاص سایر شرکت‌های فولادی یا مناطق صنعتی کشور در مدل منعکس نشده باشد. دوم، بخش کمی با نمونه ۱۰۰ نفر انجام شد و اگرچه این حجم برای تحلیل مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت، افزایش حجم نمونه می‌توانست ثبات برآوردها و قابلیت تعمیم نتایج را تقویت کند. سوم، داده‌های کمی بر مبنای پرسشنامه و ادراک پاسخ‌دهندگان جمع‌آوری شد و ممکن است تحت تأثیر سوگیری خودگزارشی یا تمایل به ارائه پاسخ‌های مطلوب قرار گرفته باشد. همچنین، ماهیت مقطعی مطالعه امکان بررسی تغییرات زمانی در روابط میان عوامل را محدود می‌کند. در نهایت، ساختار ISM بر قضاوت خبرگان استوار است و با وجود کنترل‌های انجام‌شده، بخشی از روابط استخراج‌شده می‌تواند از تجربه و ادراک آنان متأثر باشد.

پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده مدل حاضر را در سایر قطب‌های فولادی کشور و همچنین در صنایع سرمایه‌بر مشابه مانند پتروشیمی، معدن، سیمان و خودروسازی آزمون کنند تا میزان تعمیم‌پذیری ساختار مشخص شود. استفاده از نمونه‌های بزرگ‌تر در مرحله کمی و به‌کارگیری طرح‌های طولی می‌تواند امکان بررسی پویایی روابط میان عوامل در طول زمان را فراهم آورد. همچنین پیشنهاد می‌شود از روش‌هایی مانند ANP، DEMATEL، تحلیل شبکه، مدل‌سازی پویایی سیستم و تحلیل سناریو در کنار ISM استفاده شود تا شدت روابط، حلقه‌های بازخورد و پیامدهای تغییرات محیطی با دقت بیشتری بررسی شوند. مطالعه نقش میانجی مدیریت دانش، ظرفیت جذب، اعتماد بین‌سازمانی و بلوغ دیجیتال نیز می‌تواند به توسعه مدل نظری کمک کند. افزون بر این، پژوهش‌های آینده می‌توانند اثر متغیرهای تعدیل‌گر مانند اندازه شرکت، سطح دیجیتالی‌شدن، نوع مالکیت و شدت رقابت را بررسی کنند.

پیشنهاد می‌شود مدیران صنعت فولاد استقرار نوآوری باز را به‌صورت مرحله‌ای و از عوامل ریشه‌ای آغاز کنند. در سطح نخست، لازم است سازوکارهای حقوقی همکاری، مالکیت فکری، محرمانگی و تقسیم منافع میان شرکا شفاف شود و واحدهای سازمانی مسئول پایش تغییرات سیاستی و محیطی تقویت شوند. در مرحله بعد، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دیجیتال، سامانه‌های تبادل داده، شبکه‌سازی با دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان، تأمین‌کنندگان و مشتریان و نیز توسعه ابزارهای هوشمند مدیریت زنجیره تأمین در اولویت قرار گیرد. هم‌زمان باید فرهنگ مشارکت، نظام‌های انگیزشی، آموزش کارکنان، مدیریت دانش و ظرفیت جذب تقویت شود. توصیه می‌شود شاخص‌های مشخصی برای سنجش مشارکت خارجی، سرعت انتقال دانش، تعداد پروژه‌های مشترک، کاهش هزینه، کاهش زمان تحویل، بهبود کیفیت و اثرات زیست‌محیطی طراحی شوند تا ارزیابی عملکرد نه به‌عنوان یک فعالیت مستقل، بلکه به‌عنوان بازتابی از عملکرد کل اکوسیستم نوآوری باز مورد استفاده قرار گیرد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازین اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازین و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

شفافیت داده‌ها

داده‌ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.



References

- Alam, S. (2025). A Study on Supply Chain System of Manufacturing Steel Industry. *International Journal of Science, Engineering and Technology*, 13(3).
- Askary, M., Makui, A., & Tajik, M. (2024). A Robust Multi-Objective MIP Model to Optimize the Supply Chain of Steel Industry Taking into Account the Sustainability Approach. *RAIRO-Operations Research*, 58(2), 1059-1091. <https://doi.org/10.1051/ro/2024004>
- Bhargava, A., Bhargava, D., Kumar, P. N., Sajja, G. S., & Ray, S. (2022). Industrial IoT and AI Implementation in Vehicular Logistics and Supply Chain Management for Vehicle Mediated Transportation Systems. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13(Suppl 1), 673-680. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01581-2>
- De Vass, T., Shee, H., & Miah, S. J. (2021). IoT in Supply Chain Management: Opportunities and Challenges for Businesses in Early Industry 4.0 Context. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 14(2), 148-161. <https://doi.org/10.31387/oscm0450293>
- do Prado, G. F., de Souza, J. T., & Piekarski, C. M. (2025). Sustainable and Innovative: How Can Open Innovation Enhance Sustainability Practices? *Sustainability*, 17(2), 454. <https://doi.org/10.3390/su17020454>
- Gajdzik, B., Siwiec, D., Wolniak, R., & Pacana, A. (2024). Approaching Open Innovation in Customization Frameworks for Product Prototypes with Emphasis on Quality and Life Cycle Assessment (QLCA). *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(1), 100268. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100268>
- Gonyora, A. M., Migiyo, S., Ngwenya, B., & Mashau, P. (2021). Investigating Open Innovation Strategic Alignment for Sustainable Competitive Advantage in the Automotive Supply Chain in South Africa. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 15, 554. <https://doi.org/10.4102/jtscm.v15i0.554>
- Huang, J., & Zhou, P. (2025). Open Innovation and Entrepreneurship: A Review from the Perspective of Sustainable Business Models. *Sustainability*, 17(3), 939. <https://doi.org/10.3390/su17030939>
- Kumar, R., Tiwari, S., & Kansara, S. (2025). Barriers Prioritization of the Indian Steel Industry Supply Chain: Applying AHP and Fuzzy AHP Method. *Vision*, 29(2), 200-208. <https://doi.org/10.1177/09722629211065687>
- Lopez, G., Galimova, T., Fasihi, M., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2023). Towards Defossilised Steel: Supply Chain Options for a Green European Steel Industry. *Energy*, 273, 127236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127236>
- Mallett, A., & Pal, P. (2022). Green Transformation in the Iron and Steel Industry in India: Rethinking Patterns of Innovation. *Energy Strategy Reviews*, 44, 100968. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100968>
- Mohammadi, M. A., Sayadi, A. R., Khoshfarman, M., & Kashan, A. H. (2022). A Systems Dynamics Simulation Model of a Steel Supply Chain: Case Study. *Resources Policy*, 77, 102690. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102690>
- Motallebi, S., Zandieh, M., Tabriz, A. A., & Tirkolaee, E. B. (2025). Assessing the Industry 4.0 Strategies for a Steel Supply Chain: SWOT, Game Theory, and Gap Analysis. *Heliyon*, 11(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41374>
- Rahmanzadeh, S., Pishvae, M. S., & Govindan, K. (2023). Emergence of Open Supply Chain Management: The Role of Open Innovation in the Future Smart Industry Using Digital Twin Network. *Annals of Operations Research*, 329(1), 979-1007. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04254-2>
- Rakshit, S., Islam, N., & Paul, T. (2025). Advancing Circular Supply Chain Management in the Steel Industry: An RFID-Enabled Blockchain Framework for Sustainability. *Annals of Operations Research*, 1-27. <https://doi.org/10.1007/s10479-025-06673-x>
- Sharma, P., & Dash, B. (2023). Smart SCM Using AI and Microsoft 365. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 12(1), 44-54. <https://doi.org/10.17148/IJARCCE.2023.12106>
- Singh, S., Gupta, A., & Shukla, A. P. (2021). Optimizing Supply Chain through Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI). Tashkent, Uzbekistan.
- Sukolkot, N., Arunyanart, S., & Apichottanakul, A. (2024). An Open Innovative Inventory Management Based Demand Forecasting Approach for the Steel Industry. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(4), 100407. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100407>
- Viale, R., Etzkowitz, H., & Ranga, M. (2022). Open Innovation and Its Role in Sustainability Transitions: Toward a Research Agenda. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(3), 141. <https://doi.org/10.3390/joitmc8030141>
- Wang, S. (2024). *The Development of Open Innovation Strategy Model on Technology Firm Performance in Shenzhen*, China Siam University].
- Yun, J. J., Zhao, X., Del Gaudio, G., Della Corte, V., & Sadoi, Y. (2025). Leveraging Business Model Innovation through the Dynamics of Open Innovation: A Multi-Country Investigation in the Restaurant Industry. *European Journal of Innovation Management*, 28(4), 1342-1365. <https://doi.org/10.1108/EJIM-07-2023-0607>
- Zen, A. C., Santos, C. A. F. D., Spindler, E. D. S., & Pimenta Alonso, A. M. (2025). The Role of Industry 4.0 and Open Innovation Practices in the Renewal Path of an Industrial Cluster. *European Planning Studies*, 1-19. <https://doi.org/10.1080/09654313.2025.2527349>



Zohuri, B., & Behgounia, F. (2023). Application of Artificial Intelligence Driving Nano-Based Drug Delivery System. In (pp. 145-212). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89925-3.00007-1>