

Paradigmatic Transition to Industry 4.0 in Iran's Industrial Ecosystem: A Review of Opportunities, Challenges, and Performance Implications

Alireza Eslami^{1*} , HamidReza Talaie¹ 

¹ Department of Industrial Management, Faculty of Administrative and Economic Sciences, Arak University, Arak, Iran

* Corresponding author email address: h-talaie@araku.ac.ir

Article Info

Article type:

Original Research

How to cite this article:

Eslami, A., & Talaie, H. (2025). Paradigmatic Transition to Industry 4.0 in Iran's Industrial Ecosystem: A Review of Opportunities, Challenges, and Performance Implications. *Decision Science and Intelligent Systems*. 2(4), 1-32.



© 2025 the authors. Published by KMAN Publication Inc. (KMANPUB), Ontario, Canada. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

ABSTRACT

The Fourth Industrial Revolution has fundamentally redefined global manufacturing paradigms; however, developing economies like Iran encounter unique friction points in their digital transition due to severe geopolitical and structural constraints. This study aims to provide a comprehensive and critical analysis of the state of digital maturity, identify context-specific localization barriers, and evaluate the performance implications of adopting emerging technologies within the Iranian industrial ecosystem. Adhering strictly to the SANRA guidelines, a systematic review was conducted across Scopus and Web of Science databases. Fourteen pivotal empirical studies published between 2000 and the end of 2025 were selected for analysis. These studies encompassed diverse sectors, including steel, automotive, petrochemicals, food industries, and SMEs. The synthesis reveals a pattern of heterogeneous digital development characterized by a maturity paradox: while major industries strategically align with human-centric Industry 5.0 concepts, they grapple with profound infrastructural gaps at the operational layer. Findings indicate that technology prioritization depends on a sanctions-driven economy. Specifically, the automotive sector prioritizes simulation and digital twins to circumvent hardware import restrictions. In contrast, process industries like petrochemicals and food favor the Internet of Things (IoT) to enhance supply chain transparency and resilience. Crucially, the analysis identifies that the primary impediments are not merely external technological lock-ins caused by sanctions, but rather deep-seated internal cultural friction, organizational resistance, and a lack of digital skills. Despite these hurdles, evidence suggests that digitalization has significantly reduced operational costs and improved sustainability indices. The study concludes that success requires a paradigmatic shift in policymaking from state interventionism to smart data governance. The proposed Resilient Digitalization Strategy model offers an operational roadmap for transforming defensive digital adoption into a sustainable competitive advantage.

Keywords: Industry 4.0; Digital Transformation; Internet of Things (IoT); Supply Chain Sustainability; Iran; Implementation Barriers.

Extended Abstract

Introduction

The Fourth Industrial Revolution, commonly conceptualized as Industry 4.0, represents a transformative paradigm shift characterized by the integration of cyber-physical systems, artificial intelligence, cloud computing, the Internet of Things (IoT), blockchain, simulation technologies, and big data analytics into industrial ecosystems. This transition has fundamentally altered production systems, supply chain architectures, and organizational management models across the globe. Contemporary industries increasingly rely on interconnected smart systems capable of autonomous decision-making, predictive maintenance, and real-time operational optimization. These technologies not only improve productivity and flexibility but also enhance sustainability, resilience, and competitiveness in highly volatile economic environments (Grabowska & Saniuk, 2022; Elnadi & Abdallah, 2023). While advanced economies have rapidly adopted Industry 4.0 infrastructures, developing countries continue to face structural, technological, and institutional barriers that complicate the transition toward digital manufacturing ecosystems. Within this broader global context, Iran occupies a unique position due to its large industrial base, dependence on energy-intensive industries, and prolonged exposure to geopolitical and economic sanctions. Iranian industries, including steel, automotive, petrochemical, food processing, and small and medium-sized enterprises (SMEs), are increasingly compelled to modernize operational structures and improve supply chain resilience in response to both international competition and domestic inefficiencies. Nevertheless, the process of digital transformation in Iran is heavily constrained by infrastructural limitations, restricted access to advanced technologies, organizational resistance, shortage of digital skills, and weak governance frameworks. Existing studies demonstrate that although Iranian industrial managers recognize the strategic importance of digitalization, there remains a substantial gap between technological awareness and successful implementation. Research on polluting industries, such as the glass sector, highlights financial limitations, cybersecurity concerns, and the absence of regulatory frameworks as major obstacles to Industry 4.0 implementation. Similarly, SMEs encounter severe challenges associated with liquidity shortages, inadequate infrastructure, and cultural resistance despite recognizing the operational benefits of big data and cloud-based systems (Kiani & Andalib Ardakani, 2023; Nasrollahi, Ramezani, & Sadraei, 2021). Moreover, recent investigations indicate that the transition toward Industry 5.0 concepts emphasizing human-centricity, sustainability, and resilience has already emerged in some strategic sectors, particularly steel manufacturing, even though the operational foundations of Industry 4.0 remain underdeveloped (Bayatzadeh & Talaie, 2024). In the food industry, IoT technologies have become increasingly important for ensuring traceability, product safety, and supply chain transparency (Sharifpour Arabi et al., 2025). Despite the growing body of empirical literature, research findings remain fragmented across individual industries and lack an integrated analytical perspective regarding digital maturity, localization barriers, and measurable performance implications. Therefore, this study aimed to provide a comprehensive and critical narrative review of Industry 4.0 adoption in Iran's industrial ecosystem, focusing specifically on digital maturity patterns, technological priorities, implementation barriers, and operational outcomes.

Methods and Materials

This study employed a narrative review methodology designed according to the SANRA quality reporting guidelines for narrative reviews. A systematic search strategy was conducted using two major

international scientific databases, namely Scopus and Web of Science, to identify empirical studies related to Industry 4.0 implementation in Iran. The search process included combinations of keywords associated with Industry 4.0 technologies and Iranian industrial contexts, including “Industry 4.0,” “Fourth Industrial Revolution,” “Smart Manufacturing,” “Internet of Things,” “Digital Twin,” “Cyber-Physical Systems,” “Big Data Analytics,” “Cloud Manufacturing,” “Iran,” and “Iranian.” The search fields included titles, abstracts, and keywords. Only peer-reviewed journal articles, review papers, and conference proceedings published in English between 2000 and the end of 2025 were considered eligible for inclusion.

The screening process was conducted in multiple stages. Initially, titles and abstracts were reviewed to evaluate thematic relevance to Industry 4.0 implementation, barriers, digital transformation, sustainability, supply chain resilience, and performance implications within Iranian industries. Studies focusing exclusively on purely technical engineering issues without organizational or industrial implications were excluded. Additional exclusion criteria included lack of full-text accessibility and studies conducted outside the Iranian industrial context. After completing the screening and quality assessment stages, fourteen empirical studies were selected for final analysis. These studies covered a wide range of industries, including steel manufacturing, automotive production, petrochemical supply chains, food industries, construction, telecommunications, textile manufacturing, and SMEs.

Data extraction focused on study characteristics, industrial sector, methodological approach, focal technologies, key findings, implementation barriers, and performance outcomes. The reviewed studies applied diverse analytical methods, including fuzzy DEMATEL, structural equation modeling, SWOT analysis, fuzzy Delphi, best-worst method, grey DEMATEL, and future-oriented scenario analysis. Extracted findings were synthesized narratively to identify recurring patterns, contextual differences, and critical themes related to digital maturity and technological adoption in Iran’s industrial ecosystem. The study did not perform meta-analysis or secondary statistical estimations. Instead, the review emphasized descriptive synthesis and comparative interpretation of empirical findings across industries.

Findings

The synthesis of the selected studies revealed that digital maturity across Iranian industries follows a highly heterogeneous and uneven pattern. Unlike advanced industrial economies where Industry 4.0 transitions occur systematically throughout integrated value chains, Iranian industries exhibit isolated pockets of technological advancement surrounded by predominantly traditional operational systems. Digital maturity was found to depend heavily on organizational size, industry type, access to capital resources, and exposure to external supply chain pressures.

Heavy industries such as steel and petrochemicals demonstrated relatively high strategic awareness regarding Industry 4.0 concepts; however, operational implementation remained significantly underdeveloped. In the steel sector, analysis showed a substantial gap between the current level of digital readiness and the desired Industry 4.0 target status. The existing digital maturity score was reported at 0.16 compared to the target score of 0.84, indicating that only approximately 19% of the required technological infrastructure had been achieved. Interestingly, despite incomplete operational digitalization, strategic thinking within the steel industry had already shifted toward Industry 5.0 concepts emphasizing human-centricity and sustainability. Human-centered criteria were identified as the most important factors in supplier selection processes, surpassing purely technological considerations.

In the petrochemical and polyethylene industries, digital transformation was primarily driven by supply chain coordination and resilience rather than smart manufacturing itself. Industry 4.0 technologies explained approximately 62.3% of the variance in supply chain performance through improvements in integration and coordination mechanisms. Real-time monitoring systems, IoT platforms, and digital coordination tools significantly improved resilience against sanctions-related disruptions and market volatility. The findings suggested that digital transformation in this sector primarily served a defensive and survival-oriented function under conditions of economic uncertainty.

SMEs exhibited a distinctly different pattern of digital maturity characterized by pragmatic and tool-oriented technology adoption. Perceived cost emerged as the strongest implementation barrier, whereas competitive pressure acted as the primary driver of adoption. Big data analytics positively affected operational and financial performance, with a reported path coefficient of 0.392 for financial outcomes and 0.321 for market performance. Nevertheless, digital transformation among SMEs remained largely limited to process optimization rather than fundamental business model innovation.

In the automotive industry, simulation technologies and blockchain systems emerged as the most strategically prioritized Industry 4.0 technologies. Simulation achieved the lowest opportunity loss score of 0.0212, indicating the highest sustainability and operational efficiency potential under sanctions-related hardware limitations. Managers preferred software-oriented digital solutions because advanced robotics and hardware-intensive technologies were difficult to import and maintain under international restrictions.

In food industries, IoT technologies were primarily implemented to improve product traceability, quality assurance, and real-time monitoring of perishable goods. Technical and application-related factors were identified as the strongest determinants of successful implementation. Unlike many other industries, digital integration within food supply chains extended across multiple supply chain stages due to the inherent necessity of traceability and food safety.

The construction and urban development sectors displayed some of the lowest levels of digital maturity. Although digital twin technologies and big data analytics demonstrated considerable theoretical potential for smart city management and sustainability improvement, implementation barriers included traditional organizational culture, fragmented data systems, weak inter-organizational coordination, and inadequate regulatory frameworks. Organizational culture played a mediating role between big data utilization and sustainable supply chain outcomes.

The review further demonstrated that the most significant implementation barriers in Iran extended beyond technological constraints alone. Structural financial limitations, sanctions-induced technological isolation, cybersecurity concerns, weak digital governance, lack of standardized regulations, organizational resistance, digital skill shortages, and managerial conservatism collectively created a highly turbulent environment for digital transformation. Financial barriers were consistently identified as the primary causal factor affecting other organizational and managerial challenges. Additionally, the absence of transparent data governance mechanisms and uncertainty regarding data ownership significantly hindered broader digital ecosystem development.

Despite these barriers, the reviewed studies consistently reported measurable positive outcomes associated with Industry 4.0 implementation. Digital technologies improved operational coordination, reduced transaction costs, enhanced supply chain transparency, increased environmental sustainability, and strengthened resilience against market disruptions. Blockchain technologies reduced fraud risk and

information asymmetry, while big data analytics improved environmental and social sustainability indicators, particularly in construction and supply chain management sectors.

Discussion and Conclusion

The findings of this review indicate that Iran's transition toward Industry 4.0 reflects a unique and highly contextualized pattern shaped by geopolitical isolation, economic instability, infrastructural limitations, and institutional complexity. Unlike advanced industrial economies where digital transformation often follows integrated and systematic modernization trajectories, Iranian industries have adopted selective and fragmented digitalization strategies tailored primarily toward resilience and survival under conditions of uncertainty. This distinction is critically important because it demonstrates that digital transformation in developing and sanctioned economies cannot be fully interpreted through conventional Industry 4.0 frameworks derived from advanced economies.

One of the most notable conclusions emerging from this review is the existence of a digital maturity paradox within Iranian industries. Strategic awareness regarding Industry 4.0 and even Industry 5.0 concepts has expanded considerably among industrial leaders, particularly within steel and automotive sectors; however, operational infrastructures remain substantially underdeveloped. This mismatch between conceptual maturity and infrastructural readiness creates significant implementation risks and may undermine long-term sustainability if technological ambitions continue to exceed institutional capabilities.

The evidence also demonstrates that technology prioritization in Iran is strongly shaped by sanctions-related constraints. Industries consistently favor software-oriented, simulation-based, and coordination-enhancing technologies that reduce dependency on imported hardware and high-risk capital investments. Consequently, simulation, IoT, blockchain, and big data analytics have become the dominant technological pathways because they provide operational flexibility, reduce uncertainty, and improve resilience without requiring extensive physical modernization.

Another critical conclusion concerns the dominant role of organizational and cultural barriers. Although infrastructural and financial limitations remain substantial, the review suggests that the deeper impediments to digital transformation are rooted in organizational resistance, weak data-oriented cultures, managerial conservatism, and shortages of digital talent. Without cultural transformation and human capital development, technological investments alone are unlikely to produce sustainable digital ecosystems. Therefore, the future success of Industry 4.0 in Iran depends not merely on technology acquisition but on the emergence of data-driven managerial paradigms and digitally competent organizational cultures.

The review additionally highlights the strategic importance of governance reform. The absence of transparent regulatory systems, coherent digital policies, and effective data governance mechanisms significantly weakens industrial digitalization efforts. Sustainable digital transformation requires a paradigmatic shift from centralized state interventionism toward smart governance models emphasizing facilitation, interoperability, innovation ecosystems, and collaborative public-private partnerships.

Overall, despite profound structural and geopolitical challenges, the reviewed evidence confirms that Industry 4.0 technologies have already generated measurable improvements in operational performance, supply chain coordination, sustainability, and organizational resilience within several Iranian industries. These outcomes demonstrate that digital transformation remains both feasible and

strategically necessary even under highly constrained economic conditions. The proposed resilient digitalization perspective emerging from this review suggests that Iran's industrial future will depend on its ability to transform defensive digital adaptation into a coherent long-term competitive strategy grounded in local capabilities, human capital development, institutional modernization, and intelligent data governance.

گذار پارادایمی به صنعت ۴.۰ در اکوسیستم صنعتی ایران: مروری بر فرصت‌ها، چالش‌ها و پیامدهای عملکردی

علیرضا اسلامی^۱، حمیدرضا طلائی^{۱*}

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

* ایمیل نویسنده مسئول: h-talaie@araku.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله

پژوهشی اصیل

نحوه استناد به این مقاله:

اسلامی، علیرضا، و طلائی، حمیدرضا. گذار پارادایمی به صنعت ۴.۰ در اکوسیستم صنعتی ایران: مروری بر فرصت‌ها، چالش‌ها و پیامدهای عملکردی. علم تصمیم‌گیری و سیستم‌های هوشمند، ۲(۴)، ۳۲-۱.



© ۱۴۰۴ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده است. انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY-NC 4.0) صورت گرفته است.

انقلاب صنعتی چهارم پارادایم‌های تولید و مدیریت زنجیره تأمین را در مقیاس جهانی بازتعریف کرده است، اما اقتصادهای در حال توسعه نظیر ایران به واسطه محدودیت‌های ژئوپلیتیک و ساختاری، در مسیر این گذار با چالش‌های متمایزی روبرو هستند. هدف این پژوهش، ارائه یک تحلیل انتقادی و جامع از وضعیت بلوغ دیجیتال، شناسایی موانع بومی‌سازی شده و ارزیابی پیامدهای عملکردی استقرار فناوری‌های نوظهور در اکوسیستم صنعتی ایران است. این مطالعه مروری با تبعیت دقیق از دستورالعمل‌های استاندارد SANRA انجام پذیرفت. با جستجوی سیستماتیک در پایگاه‌های استنادی Scopus و Web of Science، تعداد ۱۴ مطالعه تجربی کلیدی که در بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا انتهای ۲۰۲۵ منتشر شده بودند، انتخاب و تحلیل شدند. این مطالعات طیف وسیعی از صنایع شامل فولاد، خودرو، پتروشیمی، غذایی و شرکت‌های کوچک و متوسط را پوشش می‌دادند. سنتز شواهد حاکی از شکل‌گیری الگوی توسعه دیجیتال ناهمگون و وجود یک پارادوکس بلوغ در صنایع ایران است؛ بدین معنا که در حالی که صنایع مادر در سطح استراتژیک به سمت مفاهیم انسان‌محور صنعت ۵.۰ گرایش دارند، در لایه عملیاتی با شکاف‌های زیرساختی عمیق مواجه هستند. یافته‌ها نشان می‌دهد اولویت‌بندی فناوری در ایران تابعی از اقتصاد تحریم است؛ به طوری که صنعت خودرو برای غلبه بر محدودیت‌های واردات سخت‌افزار، شبیه‌سازی را در اولویت قرار داده، در حالی که صنایع فرآیندی نظیر پتروشیمی برای تضمین شفافیت و تاب‌آوری، بر اینترنت اشیا تمرکز کرده‌اند. تحلیل‌ها بیانگر آن است که فراتر از قفل‌شدگی تکنولوژیک ناشی از تحریم‌ها، موانع اصلی شامل اصطکاک فرهنگی، فقدان مهارت‌های دیجیتال و حکمرانی داده‌ها است. با وجود چالش‌ها، پیاده‌سازی فناوری‌ها تأثیر معناداری بر کاهش هزینه‌های عملیاتی و ارتقای پایداری داشته است. مدل پیشنهادی استراتژی دیجیتالی‌سازی تاب‌آور، موفقیت در این مسیر را نیازمند تغییر پارادایم از تصدی‌گری دولتی به تنظیم‌گری هوشمند و گذار از خرید تجهیزات به مدیریت استعداد دیجیتال می‌داند.

کلیدواژه‌گان: صنعت ۴.۰، تحول دیجیتال، اینترنت اشیا، پایداری زنجیره تأمین، ایران، موانع پیاده‌سازی.

مقدمه

انقلاب صنعتی چهارم که با همگرایی فناوری‌های دیجیتال، فیزیکی و بیولوژیکی مشخص می‌شود، پارادایم‌های سنتی تولید و مدیریت زنجیره تأمین را در سطح جهانی دگرگون کرده است. این گذار فناورانه، که بر پایه سیستم‌های سایبری-فیزیکی، اینترنت اشیا، کلان‌داده‌ها و هوش مصنوعی بنا شده است، فرصت‌های بی‌نظیری را برای ارتقای بهره‌وری، انعطاف‌پذیری و پایداری در صنایع فراهم می‌آورد (Grabowska and Saniuk, 2022; Elnadi and Abdallah, 2023). در حالی که کشورهای توسعه‌یافته در حال تثبیت جایگاه خود در این اکوسیستم جدید هستند، کشورهای در حال توسعه با چالش‌های منحصربه‌فردی در مسیر گذار از اقتصاد منبع‌محور به اقتصاد دانش‌بنیان و کارایی‌محور روبرو هستند.

ایران به عنوان یکی از اقتصادهای بزرگ خاورمیانه، با ساختار صنعتی متنوعی که از صنایع سنگین همچون فولاد و خودرو تا صنایع مصرفی مانند غذا و نساجی را در بر می‌گیرد، در نقطه‌ای حیاتی از این تحول قرار دارد. صنعت فولاد به تنهایی حدود ۱ درصد از تولید ناخالص داخلی کشور را تشکیل می‌دهد و چشم‌انداز ۱۴۰۴ ایران بر افزایش تولید و کاهش وابستگی به نفت تأکید دارد (Noorollahi et al., 2025; Motallebi et al., 2021). با این حال، اکوسیستم صنعتی ایران با محدودیت‌های زمینه‌ای خاصی، از جمله تحریم‌های بین‌المللی، نوسانات ارزی و چالش‌های زیرساختی مواجه است که مسیر پذیرش فناوری‌های نوین را پیچیده می‌سازد (Taleghani and Sola, 2025). پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که اگرچه تمایل به دیجیتالی‌سازی در میان مدیران صنایع ایران وجود دارد، اما شکاف قابل توجهی میان آگاهی از فناوری و پیاده‌سازی موفق آن مشاهده می‌شود. برای مثال، در صنایع آلاینده مانند شیشه، مدیران با چالش‌های جدی در تأمین مالی و فقدان استراتژی‌های مدون برای گذار دیجیتال روبرو هستند (Kiani and Andalib Ardakani, 2023; Roshani and Sheikholeslami Kandelousi, 2025). از سوی دیگر، بنگاه‌های کوچک و متوسط که سهم عمده‌ای در اشتغال‌زایی دارند، علیرغم پتانسیل بالای کلان‌داده‌ها در بهبود عملکرد اقتصادی، با موانع زیرساختی و فرهنگی دست‌وپنجه نرم می‌کنند (Nasrollahi, Ramezani and Sadraei, 2021; Abdul Basit et al., 2024).

علاوه بر چالش‌های عملیاتی، فشار برای رعایت الزامات پایداری^۱ و حرکت به سمت تاب‌آوری^۲، صنایع ایران را ناگزیر به بازنگری در مدل‌های سنتی کرده است. مطالعات اخیر در صنعت فولاد ایران نشان می‌دهد که گذار به سمت صنعت ۵.۰ با تمرکز بر انسان‌محوری و پایداری، دیگر یک انتخاب لوکس نیست، بلکه یک ضرورت برای بقا در بازارهای رقابتی است (Bayatzadeh and Talaie, 2024; Koohestani and Majidi, 2025). همچنین، در زنجیره تأمین مواد غذایی، استفاده از اینترنت اشیا به عنوان راهکاری کلیدی برای تضمین سلامت و امنیت غذایی و کاهش ضایعات شناسایی شده است (Sharifpour Arabi et al., 2025). با این وجود، مطالعات موجود در خصوص تأثیرات صنعت ۴.۰ در ایران پراکنده است و عمدتاً بر مطالعات موردی در صنایع خاص متمرکز بوده و فاقد یک دیدگاه جامع‌نگر است (Fallahpour et al., 2021; Sheikh and Senfi, 2025).

فقدان یک تصویر یکپارچه از وضعیت بلوغ دیجیتال، موانع بومی‌سازی شده و پیامدهای عملکردی پیاده‌سازی صنعت ۴.۰ در ایران، سیاست‌گذاری کلان و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در سطح بنگاه‌ها را دشوار کرده است. از سوی دیگر، مسأله حکمرانی داده‌ها و سیاست‌گذاری‌های ملی در حوزه فناوری‌های نوظهور مانند اینترنت اشیا، همچنان به عنوان یک حلقه مفقوده در توسعه سیستم‌های نوآوری

¹ Sustainability

² Resilience

کشور مطرح است (Ghobakhloo, Fathi and Maroufkhani, 2021; Majumdar, Garg and Jain, 2021; Sadeghizadeh, A. H. D. Markazi and Shavvalpour, 2022).

بنابراین، هدف اصلی این مقاله مروری روایی، ارائه یک تحلیل جامع و انتقادی از وضعیت فعلی به‌کارگیری مفاهیم انقلاب صنعتی چهارم در صنایع کلیدی ایران است. این پژوهش به‌طور مشخص به دنبال پاسخگویی به سوالات زیر است:

۱. وضعیت نفوذ فناوری‌های پیشران در صنایع مختلف ایران چگونه است؟
۲. موانع و چالش‌های اصلی پیاده‌سازی این فناوری‌ها با توجه به بافتار اقتصادی-سیاسی خاص ایران چیست؟
۳. استفاده از این فناوری‌ها چه تأثیرات ملموسی بر شاخص‌های عملکردی، پایداری و تاب‌آوری زنجیره تأمین در ایران داشته است؟

روش‌شناسی

استراتژی جستجو و انتخاب منابع

به منظور تضمین شفافیت، تکرارپذیری و کیفیت روش‌شناختی، این مطالعه دقیقاً بر اساس موازین استاندارد بین‌المللی مقیاس ارزیابی کیفیت گزارش‌دهی مطالعات مروری^۱ طراحی و اجرا شده است (Baethge, Goldbeck-Wood and Mertens, 2019). در راستای ترسیم سیمایی جامع، بی‌طرفانه و مبتنی بر شواهد از وضعیت گذار به پارادایم صنعت ۴.۰ در زیست‌بوم صنعتی ایران، یک جستجوی نظام‌مند و گسترده در دو پایگاه استنادی معتبر، شامل «اسکوپوس»^۲ و «وب آو ساینس»^۳، به عمل آمد. راهبرد جستجو در این پژوهش با رویکردی حساس و با هدف بیشینه‌سازی پوشش ادبیات موضوع، بر مبنای ترکیب منطقی واژگان کلیدی مرتبط با مولفه‌های فناورانه انقلاب صنعتی چهارم و متغیرهای جغرافیایی مختص به ایران تدوین گردید.

بدین منظور و جهت اطمینان از احاطه کامل بر تمامی ابعاد موضوع، رشته‌جستجوی نهایی با بهره‌گیری از عملگرهای منطقی در سه بلوک مفهومی مجزا اما درهم‌تنیده سازماندهی شد. بلوک نخست، بر مفاهیم بنیادین و فناوری‌های پیشران و تحول‌آفرین در عرصه صنعت ۴.۰ تمرکز داشت؛ حال آنکه بلوک دوم، دامنه جستجو را به‌طور مشخص به بافتار جغرافیایی و صنعتی کشور ایران محدود می‌ساخت. در نهایت، بلوک سوم به عنوان فیلتر کیفیت‌سنجی عمل نموده و با هدف تضمین اعتبار علمی داده‌ها، نتایج بازیابی‌شده را صرفاً به مدارک معتبر شامل مقالات اصیل پژوهشی، مقالات مروری و مقالات ارائه‌شده در کنفرانس‌های معتبر محدود کرد. شایان ذکر است که این فرآیند کاوش با استفاده از دستورهای دقیق^۴ و در فیله‌های فراداده‌ای «عنوان»، «چکیده» و «کلمات کلیدی» اجرا گردید تا ضمن کاهش نویز اطلاعاتی، از بازیابی تمامی اسناد مرتبط اطمینان حاصل شود.

```
( TITLE-ABS-KEY("Industry 4.0") OR TITLE-ABS-KEY("Fourth Industrial Revolution") OR TITLE-ABS-KEY("Industrie 4.0") OR TITLE-ABS-KEY("Smart Manufacturing") OR TITLE-ABS-KEY("Industrial Internet of Things") OR TITLE-ABS-KEY("IIoT") OR TITLE-ABS-KEY("Cyber Physical Systems") OR TITLE-ABS-KEY("Cyber-Physical Systems") OR TITLE-ABS-KEY("Digital Twin") OR TITLE-ABS-KEY("Smart Factory") OR TITLE-ABS-KEY("Big Data Analytics") OR TITLE-ABS-KEY("Cloud Manufacturing") ) AND ( TITLE-ABS-KEY("Iran") OR TITLE-ABS-KEY("Iranian") ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE,"ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE,"re" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE,"cp" ) )
```

¹ SANRA

² Scopus

³ Web of Science

⁴ Syntax

معیارهای ورود و غربالگری

در ادامه، فرآیند غربالگری و اعتبارسنجی منابع طی یک پروتکل چندمرحله‌ای و نظام‌مند به انجام رسید تا از همسویی کامل داده‌ها با اهداف پژوهش اطمینان حاصل شود. در گام نخست، عناوین و چکیده آثار بازیابی شده جهت احراز انطباق موضوعی با محورهای کلیدی پیاده‌سازی، چالش‌ها و پیامدهای استقرار صنعت ۴۰ در بستر صنایع داخلی، مورد تدقیق و پایش قرار گرفتند. بر این اساس، معیارهای شمول^۱ به‌گونه‌ای تدوین گردیدند که تنها مطالعاتی که به‌طور صریح و اختصاصی به واکاوی کاربست یکی از فناوری‌های نوین انقلاب صنعتی چهارم در اتمسفر صنعتی ایران پرداخته بودند، در دایره تحلیل قرار گیرند. افزون بر الزام تمرکز بر زیست‌بوم ایران، نگارش به زبان انگلیسی و همچنین دسترسی‌پذیری به متن کامل^۲ مقاله جهت استخراج داده‌های متقن و جزئیات روش‌شناختی، از دیگر پیش‌شرط‌های ضروری برای ورود آثار به فرآیند ارزیابی بود.

در مقابل و به منظور پالایش دقیق‌تر نتایج، معیارهای عدم شمول بر حذف نوشتارهایی متمرکز بود که صرفاً به جنبه‌های فنی و مهندسی محض پرداخته بودند. همچنین، مطالعاتی که قلمرو جغرافیایی پژوهش آن‌ها خارج از مرزهای ایران تعریف شده بود، از دامنه بررسی کنار گذاشته شدند. فرجام این غربالگری کیفی و بررسی سطح دسترسی، منجر به گزینش نهایی ۱۴ مقاله تمام‌متن گردید؛ آثاری که به دلیل برخورداری از غنای اطلاعاتی مطلوب و انسجام محتوایی، صلاحیت لازم را برای ورود به مرحله «سنتز روایی» و تحلیل نهایی احراز نمودند (جدول ۱).

جدول ۱: خلاصه مشخصات مطالعات وارد شده به مطالعه

ردیف	نویسنده (سال)	صنعت / حوزه مورد مطالعه	رویکرد / متدولوژی	فناوری‌های محوری	یافته کلیدی / تمرکز اصلی مطالعه
۱	کیانی و غن‌دلیب اردکانی (۱۴۰۲) (Kiani and Andalib Ardakani, ۲۰۲۳)	صنعت (آلاینده)	شیشه‌سازی و فاز	ANP (امنیت سایبری، اینترنت اشیا)	شناسایی چالش‌های پیاده‌سازی؛ چالش‌های مالی به عنوان «علت» اصلی و چالش‌های مدیریتی به عنوان «معلول» اصلی شناسایی شدند. امنیت سایبری و فقدان قوانین، مهم‌ترین موانع در صنایع آلاینده هستند.
۲	نصراللهی و همکاران (۱۴۰۰) (Nasrollahi, Ramezani and Sadraei, ۲۰۲۱)	شرکت‌های کوچک و متوسط (SMEs) تولیدی	مدل‌سازی معادلات ساختاری	کلان‌داده	پذیرش کلان‌داده بر عملکرد عملیاتی و اقتصادی تاثیر مثبت دارد اما تاثیر آن بر عملکرد اجتماعی تایید نشد. ۱۲ عامل کلیدی در پذیرش شناسایی شد.
۳	فلاح‌پور و همکاران (۱۴۰۰) (Fallahpour et al., ۲۰۲۱)	صنعت نساجی	بهترین-بدترین فاز و استنتاج فاز	کلیات صنعت ۴۰ در انتخاب تأمین‌کننده	توسعه مدلی برای ارزیابی پایداری تأمین‌کنندگان با رویکرد صنعت ۴۰. معیار «قیمت» همچنان مهم‌ترین عامل اقتصادی است، اما معیارهای صنعت ۴۰ مانند اشتراک‌گذاری داده‌ها نیز ادغام شدند.
۴	قباخلو و نگ (۱۳۹۸) (Ghobakhloo, Fathi and Maroufkhani, ۲۰۲۱)	SMEهای تولیدی	پیمایش تطبیقی (ایران-مالزی) و مدل‌سازی معادلات ساختاری	فناوری‌های دیجیتال و اطلاعاتی تولید هوشمند	تحلیل تطبیقی نشان داد که در ایران، هزینه ادراک شده مهم‌ترین مانع و فشار رقابتی اصلی‌ترین پیشران برای پذیرش فناوری است.
۵	صادقی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) (Sadeghizadeh, A. D. Markazi and Shavvalpour, ۲۰۲۲)	نظام (سیاست‌گذاری ملی)	نواوری	روشنمایی	بررسی نقش حکمرانی در توسعه اینترنت اشیا در ایران. شناسایی شکاف‌ها در سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری و تسهیل‌گری برای گذار به اکوسیستم نواوری اینترنت اشیا.

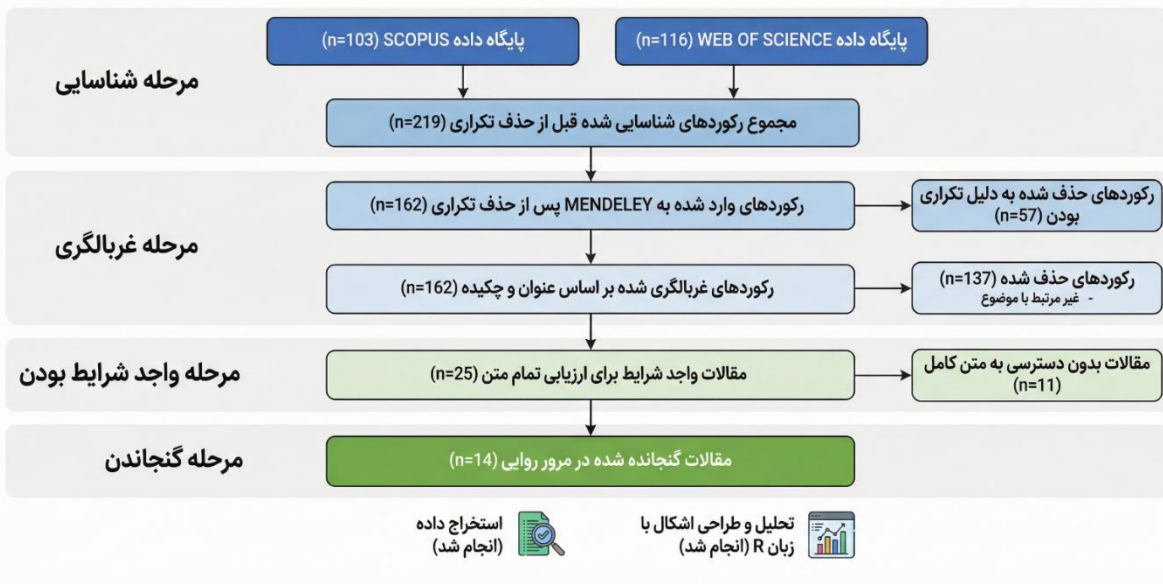
¹ Inclusion Criteria

² Full-text

۶	زاللی و همکاران (۲۰۲۴) (Zali et al., ۲۰۲۴)	برنامه ریزی شهری (شهر هوشمند)	آینده پژوهی	دوقلوهای دیجیتال شهری	تدوین نقشه راه برای پیاده سازی دوقلوهای دیجیتال در شهرهای ایران. موانع اصلی شامل تحریم ها و ضعف زیرساخت ها است. همکار بخش عمومی و خصوصی برای موفقیت حیاتی است.
۷	محقق و همکاران (۱۴۰۳) (Mohaghar, Ghasemi and Taghipour, ۲۰۲۶)	صنعت پلی اتیلن (زنجیره تأمین)	مدل سازی معادلات ساختاری	اینترنت اشیا، بلاک چین، اتوماسیون	فناوری های صنعت ۴.۰ با بهبود هماهنگی و یکپارچگی زنجیره تأمین، عملکرد را ارتقا می دهند و تاب آوری در برابر تحریم ها و نوسانات بازار را افزایش می دهند.
۸	یوسفی و همکاران (۱۴۰۳) (Yousefi et al., ۲۰۲۴)	صنایع غذایی (زنجیره تأمین)	تحلیل عاملی تاییدی و دیمتل خاکستری	اینترنت اشیا	شناسایی عوامل کلیدی موفقیت. عوامل پیاده سازی برنامه های کاربردی و اقتصادی تأثیرپذیرترین، و عوامل فنی تأثیرگذارترین عوامل در زنجیره تأمین غذا هستند.
۹	نوروززاده و همکاران (۱۴۰۴) (Norouzzadeh et al., ۲۰۲۵)	صنعت ساخت و ساز	مدل سازی معادلات ساختاری	کلان داده	تحلیل نقش فرهنگ سازمانی و کلان داده در پایداری زنجیره تأمین. کلان داده نقش میانجی بین فرهنگ سازمانی و پایداری ایفا می کند.
۱۰	مطلبی و همکاران (۱۴۰۴) (Motallebi et al., ۲۰۲۵)	صنعت فولاد	تحلیل نظریه بازی ها و تحلیل شکاف	کلیات صنعت ۴.۰ (سایبر-فیزیکی)	شکاف عمیق بین وضعیت موجود و وضعیت مطلوب در صنعت فولاد ایران. ارائه استراتژی های ترکیبی برای گذار به صنعت ۴.۰ با تمرکز بر زیرساخت ها.
۱۱	مبارکی و همکاران (۱۴۰۴)	ساختمان و مسکن	ارزیابی چرخه حیات	شبیه سازی انرژی،	ارزیابی زیست محیطی ساختمان ها در ۴ اقلیم ایران. سیستم های اسپلیت تا ۴۰٪ انتشار کربن را نسبت به سیستم های مرکزی کاهش می دهند.
۱۲	شیخ و صنفی (۱۴۰۴) (Sheikh and Senfi, ۲۰۲۵)	صنعت خودرو	تصمیم گیری چندمعیاره	شبیه سازی، بلاک چین	رتبه بندی تکنولوژی ها بر اساس پایداری. شبیه سازی و بلاک چین بهترین عملکرد پایدار را دارند، در حالی که رایانش ابری و پهپادها کمترین امتیاز را گرفتند.
۱۳	سعادت مند و همکاران (۱۴۰۱) (Saadatmand, Safaie and Dastjerdi, ۲۰۲۲)	مخابرات سیار	مدل سازی معادلات ساختاری	دیجیتالی سازی در منابع انسانی	مدیریت فرآیندهای دیجیتالی شده نقش میانجی کامل در رابطه بین مدیریت استعداد و عملکرد سازمانی دارد. تأکید بر گذار از مدیریت سنتی به دیجیتال.
۱۴	بیاتزاده و طلائی (۱۴۰۳) (Bayatzadeh and Talaie, ۲۰۲۴)	صنعت فولاد	دلفی فازی بهترین-بدترین فازی	صنعت ۵.۰، ربات های همکار	گذار از صنعت ۴.۰ به صنعت ۵.۰. معیار انسان محوری مهم ترین عامل در انتخاب تأمین کننده پایدار و تاب آور شناسایی شد، بالاتر از معیارهای صرفاً تکنولوژیک.

پس از نهایی سازی لیست مقالات منتخب، داده های کمی و کیفی کلیدی به صورت نظام مند استخراج و در کاربرگ های استاندارد طبقه بندی شدند. به منظور ارائه تصویری شفاف از الگوهای حاکم بر داده ها و تسهیل تفسیر تطبیقی یافته ها، از محیط نرم افزار آماری R (نسخه ۴.۵.۲) و کتابخانه ggplot2 جهت ترسیم نمودارها استفاده گردید. شایان ذکر است که رویکرد این پژوهش در پردازش داده ها صرفاً توصیفی و مبتنی بر بصری سازی بوده و هیچ گونه تحلیل آماری ثانویه، برآورد مجدد یا متاآنالیز بر روی داده های گزارش شده در مطالعات اولیه صورت نگرفته است. هدف از این اقدام، نمایش عینی شواهد موجود در قالب منسجم و قابل درک بوده است (شکل ۱).

فلوچارت PRISMA برای مطالعه مروری روایی



شکل ۱. فلوچارت PRISMA جهت تشریح فرآیند شناسایی، غربالگری و معیارهای شمول برای گزینش مقالات

یافته‌ها و تحلیل انتقادی

وضعیت بلوغ دیجیتال در صنایع ایران: یک چشم‌انداز ناهمگون

بررسی جامع متون پژوهشی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۱۴۰۴ نشان می‌دهد که وضعیت بلوغ دیجیتال در اکوسیستم صنعتی ایران از یک الگوی توسعه نامتوازن^۱ پیروی می‌کند. برخلاف کشورهای توسعه‌یافته که در آن‌ها گذار به صنعت ۴.۰ اغلب به صورت سیستماتیک و یکپارچه در طول زنجیره ارزش رخ می‌دهد، در ایران شاهد جزایر ایزوله‌ای از پیشرفت تکنولوژیک در میان اقیانوسی از سیستم‌های سنتی هستیم. شواهد تجربی برگرفته از مطالعات انجام شده بر روی صنایع کلیدی کشور (نظیر فولاد، خودرو، پتروشیمی، و صنایع کوچک و متوسط) حاکی از آن است که سطح آمادگی الکترونیک^۲ و بلوغ دیجیتال، تابع شدیدی از اندازه سازمان، نوع مالکیت و فشار خارجی زنجیره تأمین است (جدول ۲).

جدول ۲: ماتریس تحلیل تطبیقی وضعیت بلوغ و اولویتهای فناورانه در صنایع ایران

بخش صنعتی	سطح بلوغ دیجیتال	محرك اصلی پذیرش	فناوری‌های اولویت‌دار	گلوگاه اصلی
صنایع (فولاد/پتروشیمی)	مادر	تاب‌آوری و هماهنگی زنجیره تأمین	مانیتورینگ بلادرنگ، پلتفرم‌های یکپارچه	فرسودگی ماشین‌آلات، عدم یکپارچگی داده‌ها
صنعت خودرو	متوسط	کاهش هزینه و دور زدن تحریم	شبیه‌سازی، بلاک‌چین	دسترسی به سخت‌افزار پیشرفته (ریاتیک)
صنایع غذایی (FMCG)	متوسط به بالا	ایمنی محصول و اعتماد مشتری	اینترنت اشیاء، ردیابی (Traceability)	زیرساخت اینترنت ناپایدار، هزینه سنسورها
صنعت ساختمان	پایین	الزامات پایداری و ایمنی	مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، کلان‌داده	فرهنگ سازمانی سنتی، مقاومت در برابر تغییر
SMEها	پایین	بقای اقتصادی و فروش	تحلیل داده‌های بازار، ابزارهای ابری ساده	محدودیت شدید نقدینگی، فقدان مهارت

¹ Uneven Development

² E-Readiness

صنایع سنگین و مادر: شکاف میان استراتژی و واقعیت عملیاتی

صنایع مادر در ایران، به‌ویژه صنعت فولاد و پتروشیمی، به دلیل سهم قابل توجه در تولید ناخالص داخلی و دسترسی بیشتر به منابع سرمایه‌ای، پیشگامان نظری پذیرش فناوری‌های نسل چهارم محسوب می‌شوند، اما در عمل با چالش‌های ساختاری عمیقی روبرو هستند.

الف) صنعت فولاد: جاه‌طلبی صنعت ۵.۰ در بستر نابالغ صنعت ۴.۰

صنعت فولاد ایران که حدود ۱ درصد از تولید ناخالص داخلی کشور را تأمین می‌کند، یکی از استراتژیک‌ترین بخش‌ها برای پیاده‌سازی تحول دیجیتال است. با این حال، تحلیل‌های کمی دقیق، شکاف عمیقی را بین وضعیت موجود و وضعیت مطلوب نشان می‌دهد. مطالعه مطلبی و همکاران (۱۴۰۴) با استفاده از تحلیل شکاف^۱ نشان داد که در حالی که نمره هدف برای شاخص‌های عملکردی صنعت ۴.۰ در این بخش عدد ۰.۸۴ (در مقیاس ۰ تا ۱) تعیین شده است، وضعیت فعلی این صنعت نمره ۰.۱۶ را نشان می‌دهد (Motallebi et al., 2025). این تفاوت فاحش^۲ حاکی از آن است که زیرساخت‌های فعلی، تنها حدود ۱۹ درصد از نیازهای تحول دیجیتال را پوشش می‌دهند (جدول ۳).

جدول ۳: تأثیرات کمی و کیفی پیاده‌سازی صنعت ۴.۰ بر شاخص‌های عملکردی

منبع	شواهد کمی / کیفی (استخراج شده از مطالعات)	شاخص بهبود یافته	بعد عملکردی
(Mohaghar, Ghasemi and Taghipour, ۲۰۲۶)	صنعت ۴.۰ توانسته است ۶۲.۳٪ از واریانس عملکرد زنجیره تأمین را تبیین کند.	هماهنگی زنجیره تأمین	کارایی عملیاتی
(Nasrollahi, Ramezani and Sadraei, ۲۰۲۱)	ضریب تأثیر مثبت ۰.۳۹۲ پذیرش کلان‌داده بر عملکرد مالی.	عملکرد مالی	SMEها
(Sheikh and Senfi, ۲۰۲۵)	شبهه‌سازی با نمره ۰.۲۱۲ کمترین هزینه فرصت را در پایداری ایجاد کرده است.	کاهش هزینه فرصت	پایداری
(Norouzzadeh et al., ۲۰۲۵)	ضریب تأثیر ۰.۶۱۰ کلان‌داده بر شاخص‌های زیست‌محیطی در صنعت ساختمان.	پایداری زیست‌محیطی	پایداری
(Yousefi et al., ۲۰۲۴; Motallebi et al., ۲۰۲۵)	استفاده از بلاک‌چین و اینترنت اشیا منجر به افزایش شفافیت و کاهش ریسک تقلب شده است.	مدیریت ریسک	تاب‌آوری
(Hayati and Zahabi, ۲۰۲۵)	شناسایی دقیق شکاف ۲۵ درصدی در تجویز داروهای مدرن بین استان‌های محروم و برخوردار با استفاده از تحلیل داده.	عدالت در دسترسی	سیاست‌گذاری

نکته قابل تأمل و انتقادی در ادبیات این حوزه، تضاد میان بلوغ تکنولوژیک و بلوغ مفهومی است. در حالی که زیرساخت‌های صنعت ۴.۰ هنوز به طور کامل در صنعت فولاد ایران عملیاتی نشده‌اند، بیات‌زاده و طلایی (۱۴۰۳) در مطالعه خود نشان می‌دهند که پارادایم‌های مدیریتی در این صنعت به سمت مفاهیم صنعت ۵.۰ با تمرکز بر انسان‌محوری^۳ و تاب‌آوری حرکت کرده‌اند (Bayatzadeh and Talaie, 2024). این پژوهش نشان داد که معیار انسان‌محوری اکنون به عنوان مهم‌ترین عامل در انتخاب تأمین‌کنندگان در صنعت فولاد شناخته می‌شود. این یافته از منظر آسیب‌شناسی بلوغ دیجیتال بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا نشان می‌دهد که صنعت فولاد ایران ممکن است در حال تجربه نوعی جهش مفهومی باشد، بدین معنا که پیش از آنکه فرآیندهای اتوماسیون و دیجیتالی‌سازی کامل شود (صنعت ۴.۰)، دغدغه‌های پایداری اجتماعی و تعامل انسان-ماشین (صنعت ۵.۰) وارد معادلات استراتژیک شده‌اند. این همپوشانی پارادایم‌ها، اگرچه نشان‌دهنده چشم‌انداز مترقی مدیران است، اما در غیاب زیرساخت فنی بالغ، می‌تواند منجر به پیچیدگی و شکست پروژه‌ها شود.

ب) صنعت پتروشیمی و پلی‌اتیلن: چالش هماهنگی در زنجیره ارزش

¹ Gap Analysis

² Gap

³ Human-centricity

در صنعت پتروشیمی، به‌ویژه در بخش پلی‌اتیلن، بلوغ دیجیتال بیش از آنکه بر تولید هوشمند متمرکز باشد، بر هماهنگی زنجیره تأمین متمرکز شده است. محقر و همکاران (۱۴۰۴) در مطالعه تجربی خود بر روی ۳۴۴ خبره در صنعت پلی‌اتیلن ایران، نشان دادند که فناوری‌های صنعت ۴.۰ توانسته‌اند ۵۵.۳ درصد از واریانس عملکرد زنجیره تأمین را از طریق میانجی‌گری هماهنگی و یکپارچگی تبیین کنند (Mohaghar, Ghasemi and Taghipour, 2026).

تحلیل انتقادی این یافته‌ها نشان می‌دهد که بلوغ دیجیتال در این صنعت، واکنشی به فشارهای بیرونی است تا یک استراتژی درون‌زاد. به عبارت دیگر، شرکت‌های پتروشیمی ایرانی نه لزوماً برای نوآوری، بلکه برای بقا و تاب‌آوری در برابر اختلالات عرضه و تقاضا به سمت ابزارهای دیجیتال روی آورده‌اند. یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که استفاده از سیستم‌های مانیتورینگ بلادرنگ، نه یک انتخاب لوکس، بلکه تنها راهکار عملیاتی برای مدیریت عدم قطعیت‌های ناشی از سهمیه‌بندی مواد اولیه و اختلالات لجستیکی در ایران بوده است (Mohaghar, Ghasemi and Taghipour, 2026). بنابراین، می‌توان استدلال کرد که بلوغ دیجیتال در این بخش، ماهیتی تدافعی و تاب‌آور دارد.

ج) صنایع انرژی‌بر و آلاینده (مانند شیشه): عقب‌ماندگی ناشی از فقر مالی

در مقابل صنایع نفت و فولاد، وضعیت در سایر صنایع انرژی‌بر نظیر صنعت شیشه متفاوت است. کیانی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از رویکرد Fuzzy DEMATEL نشان دادند که این صنعت در مراحل اولیه بلوغ دیجیتال قرار دارد. در این صنعت، چالش‌های مالی به عنوان تأثیرگذارترین مانع شناسایی شده است که مستقیماً بر چالش‌های مدیریتی و سازمانی تأثیر می‌گذارد (Kiani and Andalib, 2023). Ardakani, 2023).

استدلال علمی در اینجا این است که در صنایعی که حاشیه سود تحت فشار هزینه‌های انرژی و مواد اولیه است (مانند شیشه)، بلوغ دیجیتال اولویت خود را از دست می‌دهد. برخلاف صنعت خودرو که در آن شبیه‌سازی و واقعیت افزوده به عنوان راهکارهای کاهش هزینه پذیرفته شده‌اند (Sheikh and Senfi, 2025)، در صنعت شیشه ایران، هنوز توجیه اقتصادی سرمایه‌گذاری در هوش مصنوعی برای مدیران ارشد محرز نشده است. این تفاوت نشان می‌دهد که بلوغ دیجیتال در ایران تابعی از «توان مالی صنعت» است و یک نسخه واحد برای تمام صنایع وجود ندارد.

بنگاه‌های کوچک و متوسط: پارادوکس انعطاف‌پذیری و فقر منابع

بنگاه‌های کوچک و متوسط که ستون فقرات اشتغال در ایران محسوب می‌شوند، الگوی متفاوتی از بلوغ دیجیتال را نسبت به صنایع بزرگ تجربه می‌کنند. ادبیات موجود نشان می‌دهد که در این بخش، پذیرش فناوری نه یک تصمیم استراتژیک بلندمدت، بلکه واکنشی عمل‌گرایانه به فشارهای محیطی است.

مطالعه قباخلو و همکاران (۱۳۹۸) با مقایسه تطبیقی میان شرکت‌های ایران و مالزی، نشان داد که اگرچه مدل‌های استاندارد پذیرش فناوری در هر دو کشور صادق است، اما وزن عوامل در ایران متفاوت است. در ایران، هزینه ادراک‌شده^۱ بازدارنده اصلی است، در حالی که فشار رقابتی محرک اصلی محسوب می‌شود (Ghobakhloo and Ching, 2019). این یافته با پژوهش نصرالهی و همکاران (۲۰۲۱) همسویی دارد که نشان دادند SME‌های ایرانی با وجود محدودیت‌های زیرساختی، به سمت پذیرش کلان‌داده^۲ حرکت کرده‌اند، اما نه برای نوآوری رادیکال، بلکه برای بهبود عملکرد عملیاتی و اقتصادی کوتاه‌مدت (Nasrollahi, Ramezani and Sadraei, 2021).

¹ Perceived Cost

² Big Data

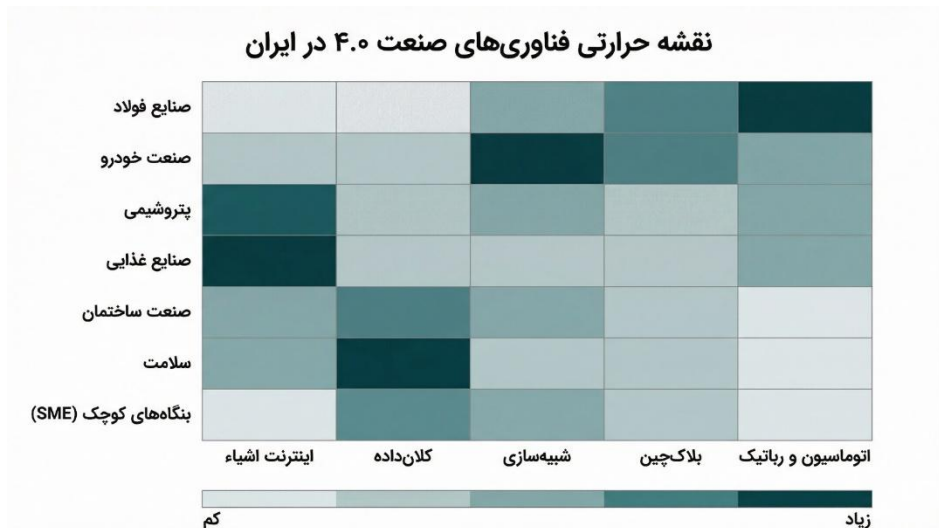
تحلیل انتقادی: بلوغ دیجیتال در SMEهای ایرانی در مرحله ابزار-محور^۱ باقی مانده است. به این معنا که این شرکت‌ها به جای تغییر مدل کسب‌وکار، صرفاً ابزارهای دیجیتال را برای بهینه‌سازی فرآیندهای فعلی به کار می‌گیرند. این رویکرد اگرچه ریسک کمتری دارد، اما مانع از بهره‌برداری کامل از پتانسیل انقلاب صنعتی چهارم می‌شود.

صنعت خودرو: پیشگامی در شبیه‌سازی و پایداری

صنعت خودروی ایران به دلیل سابقه طولانی و ارتباطات بین‌المللی، سطح بالاتری از بلوغ تکنولوژیک را نسبت به سایر صنایع مونتاژی نشان می‌دهد. پژوهش شیخ و صنفی (۱۴۰۴) با استفاده از متدولوژی نوین فازی نشان داد که در این صنعت، اولویت‌بندی فناوری‌ها به شدت تحت تأثیر الزامات پایداری است. نکته جالب توجه این است که شبیه‌سازی و بلاک‌چین به عنوان فناوری‌هایی با کمترین هزینه فرصت شناسایی شده‌اند، در حالی که فناوری‌های پرهزینه‌تر مانند پهپادها یا رایانش ابری در اولویت‌های پایین‌تر قرار دارند (Sheikh and Senfi, 2025). این اولویت‌بندی نشان‌دهنده یک بلوغ‌گزینی در صنعت خودروی ایران است. مدیران این صنعت دریافته‌اند که در شرایط تحریم و محدودیت دسترسی به سخت‌افزارهای پیشرفته رباتیک، سرمایه‌گذاری بر روی فناوری‌های نرم‌افزاری بازدهی سریع‌تر و پایداری دارد. بنابراین، بلوغ در اینجا به معنای هوشمندی در انتخاب تکنولوژی‌های در دسترس تعبیر می‌شود.

صنعت غذایی و کالاهای تندمصرف (FMCG): بلوغ مبتنی بر سلامت و ایمنی

در صنعت غذا، محرک اصلی بلوغ دیجیتال متفاوت است: ایمنی و ردیابی. مطالعه یوسفی و همکاران (۱۴۰۳) بر روی زنجیره تأمین شرکت‌های بزرگ غذایی ایران نشان داد که پیاده‌سازی اینترنت اشیا در این بخش، بیش از آنکه با هدف اتوماسیون تولید باشد، با هدف نظارت بلادرنگ^۲ بر فاسدشدنی‌ها و تضمین کیفیت انجام می‌شود (Yousefi et al., 2024). یافته‌های این پژوهش نشان داد که عوامل فنی و قابلیت کاربرد در طول زنجیره تأثیرگذارترین عوامل در موفقیت اینترنت اشیا هستند (شکل ۲). این امر حاکی از آن است که در صنعت غذایی ایران، بلوغ دیجیتال به صورت جزیره‌ای نیست و به دلیل ماهیت محصول، یکپارچگی در طول زنجیره الزامی شده است. این ویژگی، صنعت غذا را از نظر یکپارچگی دیجیتال^۳ در جایگاهی بالاتر از بسیاری از صنایع تولیدی دیگر قرار می‌دهد.



شکل ۲. نقشه حرارتی فناوری‌های صنعت ۴.۰ در بخش‌های کلیدی ایران.

¹ Tool-centric

² Real-time Monitoring

³ Digital Integration

این ماتریس، شدت پذیرش شش فناوری دیجیتال اصلی (اینترنت اشیا، کلان داده، شبیه‌سازی، بلاکچین، اتوماسیون/رباتیک) را در صنایع مختلف ایران نشان می‌دهد. سلول‌های تیره‌تر نشان‌دهنده درجه بالاتری از پیاده‌سازی و تمرکز استراتژیک هستند، در حالی که سلول‌های روشن‌تر نشان‌دهنده سطوح پایین‌تر پذیرش هستند. همانطور که مشاهده شد، صنایع غذایی و پتروشیمی برای قابلیت ردیابی، وابستگی زیادی به اینترنت اشیا نشان می‌دهند، در حالی که صنعت خودرو ترجیح قوی برای شبیه‌سازی دارد. نکته قابل توجه این است که رباتیک به دلیل محدودیت‌های واردات سخت‌افزار، کمترین نفوذ را در اکثر بخش‌ها نشان می‌دهد. منبع: بر اساس داده‌های محقر و همکاران (۱۴۰۴)، شیخ و صنفی (۱۴۰۴) و یوسفی و همکاران (۱۴۰۳) ترکیب شده است.

صنعت ساختمان و شهرسازی: رؤیای دوقلوهای دیجیتال در حصار واقعیت‌ها

بخش ساختمان و شهرسازی در ایران یکی از پیچیده‌ترین الگوهای بلوغ را به نمایش می‌گذارد. از یک سو، پتانسیل عظیمی برای استفاده از دوقلوهای دیجیتال شهری^۱ برای مدیریت کلان‌شهرها وجود دارد، اما از سوی دیگر، موانع زیرساختی و مدیریتی بسیار جدی هستند. زالی و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه آینده‌پژوهانه خود نشان دادند که توسعه دوقلوهای دیجیتال در ایران با موانع جدی پذیرش سازمانی و قوانین و مقررات روبرو است. تحلیل سناریوهای این پژوهش نشان می‌دهد که وضعیت مطلوب تنها در صورتی محقق می‌شود که همکاری بین بخش دولتی و خصوصی به طور رادیکال تغییر کند (Zali et al., 2024).

همزمان، نوروززاده و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهشی بر روی زنجیره تأمین صنعت ساختمان، نشان دادند که مشکل اصلی نبود تکنولوژی نیست، بلکه فرهنگ سازمانی است. این مطالعه اثبات کرد که فرهنگ سازمانی نقش میانجی حیاتی در رابطه بین تحلیل کلان‌داده و پایداری زنجیره تأمین ایفا می‌کند. به بیان دیگر، بدون وجود فرهنگی که داده‌محوری را تشویق کند، بلوغ دیجیتال در صنعت ساختمان ایران در حد طرح‌های گرافیکی و ماکت‌های دیجیتال باقی مانده و به تصمیم‌گیری هوشمند منجر نمی‌شود (Norouzzadeh et al., 2025).

فناوری‌های پیش‌بینی در بستر بومی: از زیرساخت‌های فیزیکی تا حکمرانی داده‌ها

تحلیل مقالات منتخب نشان می‌دهد که نفوذ فناوری‌های صنعت ۴.۰ در ایران از یک الگوی تک‌خطی پیروی نمی‌کند. در حالی که در سطح جهانی، همگرایی همزمان تمام فناوری‌ها مد نظر است، در بستر بومی ایران، اولویت‌بندی فناوری‌ها به شدت تحت تأثیر «فشار برای شفافیت» و «نیاز به بهینه‌سازی منابع» شکل گرفته است. بر این اساس، دو فناوری اینترنت اشیا و تحلیل کلان‌داده بیشترین نفوذ و بالاترین سطح بحث استراتژیک را به خود اختصاص داده‌اند.

اینترنت اشیا: گذار از اتصال‌دهی به یکپارچگی زنجیره ارزش

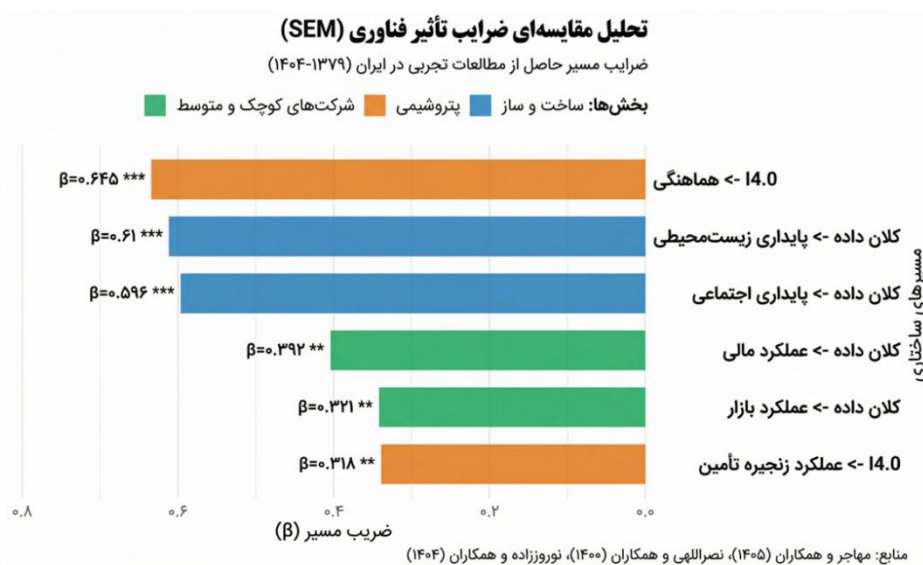
تحلیل‌های پدیدارشناختی از کارکرد اینترنت اشیا در بستر صنعتی ایران، حاکی از نوعی دوگانگی نقش‌آفرینی^۲ است که بر اساس ماهیت صنایع شکل گرفته است. در صنایع حساس به زمان نظیر صنایع غذایی، این فناوری به عنوان ابزاری جهت تضمین کیفیت و ایمنی عمل می‌کند، حال آنکه در صنایع فرآیندی و پیوسته همچون پتروشیمی، نقش محوری آن در هماهنگی و یکپارچگی تبلور می‌یابد. در همین راستا، یافته‌های پژوهش یوسفی و همکاران (۱۴۰۳) پیرامون صنعت مواد غذایی ایران تبیین می‌کند که استقرار اینترنت اشیا فراتر از یک ارتقای صرفاً تکنولوژیک، به مثابه یک مکانیزم تدافعی استراتژیک در برابر چالش‌های ذاتی فسادپذیری محصولات و ناکارآمدی‌های لجستیک سنتی عمل می‌نماید. نتایج حاصل از مدل‌سازی معادلات ساختاری در این مطالعه مؤید آن است که متغیر پیاده‌سازی کاربردی بیشترین ضریب

¹ Urban Digital Twins

² Role Dichotomy

تأثیر را بر موفقیت زنجیره تأمین داشته است. نکته حائز اهمیت در بافتار بومی ایران، ضرورت حیاتی توسعه و بومی‌سازی دروازه‌های ارتباطی^۱ هوشمند است؛ چراکه با توجه به ناپایداری‌های زیرساختی شبکه در کشور، وجود دروازه‌هایی با قابلیت پردازش لبه‌ای^۲ و مدیریت داده‌ها در شرایط قطع ارتباط، پیش‌شرط اجتناب‌ناپذیر کارآمدی سیستم محسوب می‌شود (Yousefi et al., 2024).

در سوی دیگر این طیف، مطالعات محقر و همکاران (۱۴۰۴) در صنعت استراتژیک پلی‌اتیلن نشان می‌دهد که دال مرکزی در کاربست اینترنت اشیا، نه فسادپذیری فیزیکی، بلکه غلبه بر عدم تقارن اطلاعات^۳ میان حلقه‌های بالادستی و پایین‌دستی زنجیره ارزش است. شواهد تجربی حاکی از آن است که این فناوری از طریق استقرار نظام پایش بلادرنگ، تأثیری مستقیم و معنادار بر هماهنگی زنجیره تأمین برجای می‌گذارد. این قابلیت در اتمسفر اقتصاد تحت تحریم ایران، که تأمین قطعات یدکی و مواد اولیه با نوسانات و عدم قطعیت‌های شدید مواجه است، نقشی حیاتی در ارتقای تاب‌آوری، پیش‌بینی‌پذیری و واکنش سریع به اختلالات ایفا می‌کند (Mohaghar, Ghasemi and Taghipour, 2026). تحلیل‌های تطبیقی داده‌ها (شکل ۳) نیز این تمایز کارکردی را تأیید می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که فناوری‌های دیجیتال بیشترین ضریب تأثیر مستقیم را بر هماهنگی در صنعت پتروشیمی و پایداری زیست‌محیطی در صنعت ساخت‌وساز داشته‌اند، در حالی که تأثیر آن‌ها بر شاخص عملکرد بازار در بنگاه‌های کوچک و متوسط نسبتاً محدودتر گزارش شده است.



شکل ۳. تحلیل مقایسه‌ای ضرایب مسیر در صنایع منتخب ایران.

داده‌ها نشان‌دهنده ناهمگونی تأثیر فناوری‌های دیجیتال بر متغیرهای وابسته در بخش‌های مختلف است؛ به‌طوری که بیشترین تأثیر بر هماهنگی زنجیره تأمین در پتروشیمی و کمترین تأثیر بر عملکرد بازار مشاهده می‌شود. با وجود این ظرفیت‌های اثبات‌شده، واکاوی‌های نهادی توسط صادقی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) نشان می‌دهد که گلوگاه اصلی در مسیر توسعه اکوسیستم اینترنت اشیا در ایران، ماهیت فناورانه نداشته، بلکه ریشه در چالش‌های حکمرانی^۴ دارد. تحلیل تاریخی تحولات دهه اخیر آشکار می‌سازد که خلاء یک رژیم حقوقی شفاف در خصوص «مالکیت داده‌ها» و همچنین تداخل صلاحیت‌های کارکردی در نهادهای تنظیم‌گر (رگولاتوری)، مانع از شکل‌گیری یک بازار منسجم و پویا شده است. استدلال بنیادین این پژوهش بر آن است که گذار موفق به پارادایم صنعت ۴.۰ در ایران، مستلزم تغییر پارادایم در نقش دولت از

¹ Gateways

² Edge Processing

³ Information Asymmetry

⁴ Governance

تصدی‌گری مستقیم به تسهیل‌گری و تنظیم‌گری هوشمند است تا بستر لازم برای شکوفایی نوآوری فراهم گردد (Sadeghizadeh, A. D. Markazi and Shavvalpour, 2022).

تحلیل کلان‌داده: تصمیم‌گیری داده‌محور در شرایط عدم قطعیت

در ادامه تحلیل ارکان تکنولوژیک گذار صنعتی در ایران، دومین ستون اصلی بر محور تحلیل کلان‌داده^۱ استوار است؛ فناوری که دامنه نفوذ آن از سطح خرد بنگاه‌ها فراتر رفته و به ابزاری برای حکمرانی در مقیاس ملی بدل شده است. در سطح بنگاه، به‌ویژه برای شرکت‌های کوچک و متوسط که در اتمسفر اقتصادی ایران با محدودیت‌های شدید منابع مالی و سرمایه‌ای دست‌به‌گریبان هستند، بهره‌گیری از تحلیل کلان‌داده از یک انتخاب فناورانه به یک استلزام استراتژیک برای بقا تغییر ماهیت داده است. در همین راستا، پژوهش نصراللهی و همکاران (۲۰۲۱) نشان می‌دهد که اگرچه همبستگی مثبت و معناداری میان به‌کارگیری تحلیل کلان‌داده و شاخص‌های عملکرد مالی و عملکرد بازار در این بنگاه‌ها وجود دارد، اما این تأثیرگذاری مستقیم نبوده و تابعی از میانجی‌گری مولفه‌های سازمانی و محیطی است (Nasrollahi, Ramezani and Sadraei, 2021).

پیچیدگی‌های پیاده‌سازی این فناوری در صنایع پروژه‌محور نظیر صنعت ساختمان، ابعاد دیگری از چالش‌های بومی را آشکار می‌سازد. یافته‌های نوروززاده و همکاران (۱۴۰۴) در این حوزه بیانگر آن است که استقرار زیرساخت‌های فنی تحلیل کلان‌داده به تنهایی ضامن موفقیت نیست و دستیابی به پایداری در زنجیره تأمین، مستلزم هم‌راستایی آن با یک فرهنگ سازمانی حمایت‌گر است. این یافته در بافتار مدیریتی ایران که فرآیندهای تصمیم‌گیری در آن غالباً بر پایه شهود فردی و تجربیات سنتی مدیران استوار است، اهمیتی دوچندان می‌یابد. از این‌رو، استقرار موفقیت‌آمیز تحلیل کلان‌داده در صنایع ایران، بیش از آنکه نیازمند سرمایه‌گذاری فنی باشد، نیازمند یک تغییر پارادایم فرهنگی^۲ از مدیریت شهودی به سمت «تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد» است (Norouzzadeh et al., 2025).

فراتر از مقیاس بنگاه، پیشروترین جلوه‌های کاربست کلان‌داده در ایران را می‌توان در عرصه سیاست‌گذاری سلامت عمومی مشاهده کرد. مطالعه طولی و جامع حیاتی و ذهابی (۱۴۰۴) که بر پایه تحلیل ۸۴ میلیون نسخه الکترونیک در بازه زمانی یک دهه (۱۴۰۲-۲۰۱۳) سامان یافته است، نمونه‌ای برجسته از ظرفیت حکمرانی داده‌محور محسوب می‌شود. این پژوهش با واکاوی الگوهای مصرف دارو، نابرابری‌های عمیق منطقه‌ای در دسترسی به داروهای حیاتی دیابت را آشکار ساخت. دلالت مهم این مطالعه برای سیاست‌گذاران آن است که برخلاف تصورات رایج، زیرساخت‌های جمع‌آوری داده در کشور فراهم است؛ لیکن چالش بنیادین در حلقه مفقوده تبدیل داده‌های خام به بینش سیاستی نهفته است (Hayati and Zahabi, 2025).

شبیه‌سازی و دوقلوهای دیجیتال: راهکاری برای غلبه بر محدودیت‌های سخت‌افزاری

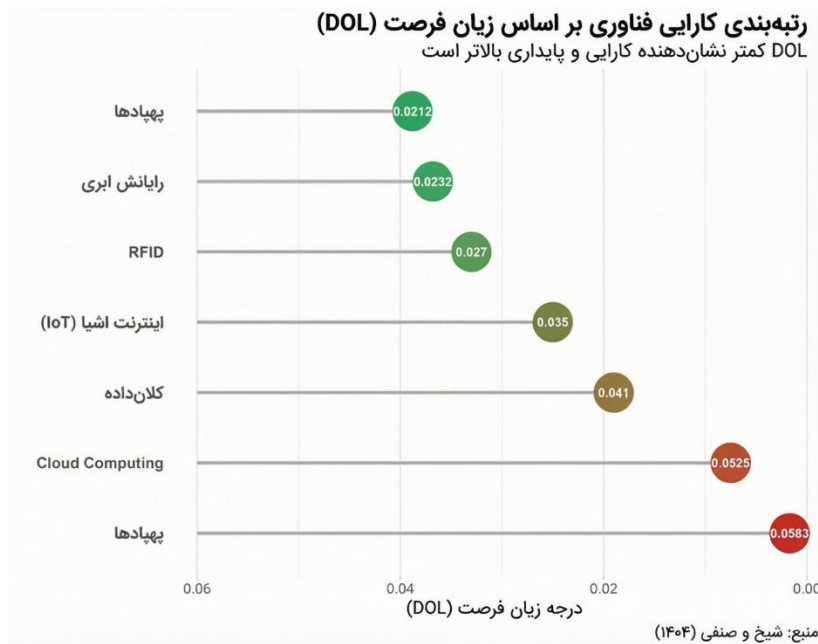
در شرایطی که زیست‌بوم صنعتی ایران تحت تأثیر مضیقه‌های بین‌المللی و تحریم‌های اقتصادی، با چالش‌های ساختاری در واردات ماشین‌آلات پیشرفته و ریسک‌های سیستماتیک در سرمایه‌گذاری فیزیکی مواجه است، فناوری‌های «شبیه‌سازی»^۳ از یک ابزار جانبی به یک «الزام استراتژیک» و راهکاری کم‌ریسک جهت حفظ پویایی تولید تغییر ماهیت داده‌اند. این تغییر رویکرد، به‌ویژه در صنایع با پیچیدگی بالا نظیر خودروسازی، نمود عینی‌تری یافته است. پژوهش اخیر شیخ و صنفی (۱۴۰۴) که به اولویت‌بندی پایداری فناوری‌های صنعت ۴.۰ در صنعت خودرو اختصاص دارد، شواهد تجربی را در خصوص ترجیحات تکنولوژیک در ایران ارائه می‌دهد. بر اساس یافته‌های این مطالعه که

¹ Big Data Analytics

² Paradigm Shift

³ Simulation

مبتنی بر رویکرد فازی است، فناوری شبیه‌سازی با کسب کمترین نمره زیان فرصت^۱ معادل ۰.۰۲۱۲، در صدر اولویت‌های سرمایه‌گذاری قرار گرفته است (شکل ۴). این جایگاه ممتاز در تقابل آشکار با فناوری‌های سخت‌افزارمحور و سرمایه‌بر نظیر پهپادها و رباتیک پیشرفته است که به دلیل هزینه‌های بالای تأمین و نگهداری، در رتبه‌های انتهایی این سلسله‌مراتب جای گرفته‌اند (Sheikh and Senfi, 2025).



شکل ۴. سلسله‌مراتب اولویت‌بندی فناوری‌های صنعت ۴.۰ در خودروسازی ایران بر اساس شاخص «درجه زیان فرصت».

تحلیل داده‌ها مبتنی بر متدولوژی فازی OPLO-POCOD بیانگر آن است که «شبیه‌سازی» و «بلاک‌چین» با نمایش کمترین مقادیر DOL، به عنوان پایدارترین و ریسک‌گریزترین گزینه‌های سرمایه‌گذاری در اتمسفر اقتصادی تحت تحریم شناسایی شده‌اند. در مقابل، فناوری‌های متکی بر سخت‌افزار نظیر پهپادها، بالاترین میزان زیان فرصت را به خود اختصاص داده‌اند. این رتبه‌بندی نشان می‌دهد که برای خودروسازان ایرانی، شبیه‌سازی یک ابزار حیاتی برای "کاهش ضایعات" و "آزمون و خطا" در فضای مجازی قبل از تولید فیزیکی است. در واقع، شبیه‌سازی به این صنایع اجازه می‌دهد بدون نیاز به سرمایه‌گذاری ارزی سنگین برای خرید ماشین‌آلات جدید، فرآیندهای فعلی را بهینه‌سازی کنند.

با عبور از سطح بنگاه و ورود به مقیاس مدیریت شهری، کاربرد فناوری‌های شبیه‌سازی در قالب «دوقلوهای دیجیتال شهری» جلوه‌گر می‌شود. زالی و همکاران (۱۴۰۳) در واکاوی ظرفیت‌های این فناوری در ایران، اگرچه بر پتانسیل‌های تحول‌آفرین آن در حوزه‌هایی نظیر مدیریت هوشمند ترافیک، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت پسماند تأکید دارند، اما همزمان پرده از چالش‌های ژئوپلیتیک برمی‌دارند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که پیاده‌سازی موثر دوقلوهای دیجیتال شهری در ایران با سد مستحکمی به نام «تحریم‌های فناورانه» برخورد کرده است؛ مانعی که دسترسی به زنجیره ابزارهای ضروری شامل نرم‌افزارهای تخصصی، لایسنس‌های معتبر و زیرساخت‌های سروری قدرتمند را مسدود ساخته است. تحلیل انتقادی این مطالعه حاکی از آن است که مدل‌های وارداتی توسعه تکنولوژی در این حوزه ناکارآمد بوده و موفقیت دوقلوهای دیجیتال در ایران، مستلزم تدوین یک «نقشه راه بومی»^۲ است؛ نقشه‌ای که به جای وابستگی صرف به واردات تکنولوژی، بر بسیج ظرفیت‌های داخلی و شکل‌دهی به همکاری‌های فرابخشی استوار باشد (Zali et al., 2024).

¹ Opportunity Loss

² Endogenous Roadmap

بلاک‌چین: معماری اعتماد در زنجیره تأمین

در امتداد تحلیل فناوری‌های پیشران، «زنجیره بلوکی»^۱ در زیست‌بوم صنعتی ایران فراتر از کارکردهای متعارف خود در بستر رمزارزها، به مثابه راهکاری استراتژیک جهت غلبه بر معضلات دیرپای «عدم شفافیت ساختاری» و «ناکارآمدی‌های مالی» در زنجیره تأمین ظهور یافته است. این تغییر پارادایم به‌ویژه در صنایع مادر نظیر فولاد که با حجم بالای گردش مالی و تعدد ذینفعان دولتی و خصوصی مواجه‌اند، نمود بارزتری دارد. در همین راستا، مطلبی و همکاران (۱۴۰۴) در تحلیل استراتژیک (SWOT) خود از صنعت فولاد، مولفه «امنیت زنجیره تأمین» را به عنوان یکی از نقاط قوت کلیدی در گذار به صنعت ۴.۰ شناسایی نموده‌اند. در این بافتار، فناوری دفاتر کل توزیع‌شده به عنوان سازوکاری تضمین‌گر برای یکپارچگی داده‌ها و سدی در برابر تقلب‌های تراکنشی عمل می‌کند که با کاهش «عدم تقارن اطلاعات»^۲، ریسک‌های مالی سیستماتیک را تعدیل می‌نماید (Motallebi et al., 2025).

همسو با صنایع مادر، در صنعت خودروسازی نیز شواهد پژوهشی حاکی از جایگاه ممتاز این فناوری در سلسله‌مراتب اولویت‌های توسعه است. یافته‌های شیخ و صنفی (۱۴۰۴) نشان می‌دهد که بلاک‌چین با کسب نمره هزینه فرصت ۰.۰۲۳۲، پس از فناوری شبیه‌سازی، دومین اولویت تکنولوژیک برای دستیابی به پایداری صنعتی محسوب می‌شود (Sheikh and Senfi, 2025). اهمیت این یافته زمانی آشکار می‌شود که در اتمسفر اقتصاد کلان ایران تفسیر شود. در چنین شرایطی، بلاک‌چین پتانسیل ایجاد بستری شفاف و مستقل برای مدیریت «قراردادهای هوشمند»^۳ و ردیابی اصالت قطعات را فراهم می‌آورد؛ قابلیت‌هایی که می‌تواند «هزینه‌های مبادله» را که به دلیل ناکارآمدی‌های بوروکراتیک در زنجیره‌های تأمین داخلی به‌طور فزاینده‌ای بالاست، به طرز معناداری کاهش دهد.

تحلیل موانع و چالش‌ها: زیست‌بوم پر تلاطم گذار دیجیتال

با این وجود، گذار صنایع ایران به سمت پارادایم انقلاب صنعتی چهارم در بستری رقم می‌خورد که تمایزات بنیادینی با روندهای جهانی دارد. واکاوی انتقادی ادبیات پژوهشی بیانگر آن است که بنگاه‌های ایرانی با یک «فشار مضاعف» مواجه هستند. آن‌ها از یک سو باید بر چالش‌های ذاتی و فنی استقرار فناوری‌های نوظهور فائق آیند و از سوی دیگر، ناچار به مدیریت موانع منحصربه‌فردی هستند که ریشه در «انزوای اقتصادی» و «ساختار دولت‌محور» اقتصاد دارد. نخستین جلوه از این فشار مضاعف در بُعد زیرساختی نمایان می‌شود. برخلاف کشورهای توسعه‌یافته که در آن‌ها دغدغه اصلی «یکپارچه‌سازی» سیستم‌های مدرن است، چالش کنونی در ایران «فقدان زیرساخت‌های پایه» است. مطالعه میدانی کیانی و همکاران (۱۴۰۲) در صنعت شیشه به‌روشنی نشان می‌دهد که «میراث سیستم‌های فرسوده» استقرار حسگرهای اینترنت اشیا یا اتصال به شبکه‌های ابری را سلب نموده است. این پژوهش، فقر زیرساخت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری را به عنوان «علت‌العلل» ناتوانی در جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ معرفی می‌کند (Kiani and Andalib Ardakani, 2023). در مقیاسی کلان‌تر، زالی و همکاران (۱۴۰۳) نیز در امکان‌سنجی دوقلوهای دیجیتال شهری، بر ناهمگنی و ساختار جزیره‌ای^۴ داده‌ها در شهرهای ایران تأکید دارند که فاقد استانداردهای ضروری برای مدل‌سازی یکپارچه است (Zali et al., 2024).

دومین چالش بنیادین در این مسیر، «پارادوکس امنیت سایبری» است. با افزایش سطح اتصال‌پذیری سیستم‌ها، ضریب آسیب‌پذیری صنایع در برابر حملات سایبری به شدت افزایش یافته است؛ موضوعی که مطلبی و همکاران (۱۴۰۴) در تحلیل صنعت فولاد، آن را در زمره تهدیدهای اصلی طبقه‌بندی کرده‌اند. با این حال، در بافتار ژئوپلیتیک ایران، این تهدید ماهیتی فراتر از مسائل فنی یافته و به مقوله‌ای در تراز

¹ Blockchain

² Information Asymmetry

³ Smart Contracts

⁴ Siloed

«امنیت ملی» تبدیل شده است. این تغییر ماهیت سبب شده تا مدیران صنعتی نسبت به اتصال سیستم‌های کنترل صنعتی به شبکه جهانی اینترنت رویکردی به شدت محافظه‌کارانه و مقاوم اتخاذ کنند (Motallebi et al., 2025). علاوه بر این، ابعاد حقوقی و مالکیتی امنیت نیز مانع‌تراشی می‌کند؛ چنانکه یوسفی و همکاران (۱۴۰۳) در زنجیره تأمین مواد غذایی نشان دادند که دغدغه‌های مربوط به «حریم خصوصی داده‌ها» و ابهام در حقوق «مالکیت فکری»، به عنوان سرعت‌گیرهای اصلی در اشتراک‌گذاری شفاف اطلاعات میان حلقه‌های تأمین و تولید عمل می‌نمایند (Yousefi et al., 2024).

اقتصاد سیاسی گذار دیجیتال: تحریم‌ها به مثابه «سد نوآوری»

متمایزترین وجهه زیست‌بوم صنعتی ایران در قیاس با روندهای جهانی، تأثیرات عمیق و چندبعدی تحریم‌های بین‌المللی بر بلوغ دیجیتال است؛ عاملی که به عنوان یک «متغیر مداخله‌گر» کلیدی، تمامی معادلات توسعه را تحت‌الشعاع قرار داده است. زالی و همکاران (۱۴۰۳) در تبیین پدیده «انزوای فناورانه»^۱، تصریح می‌کنند که محدودیت‌های ژئوپلیتیک، دسترسی صنایع ایران را به زنجیره ارزش جهانی فناوری‌های پیشرفته^۲، لایسنس‌های معتبر نرم‌افزاری و پلتفرم‌های ابری تراز اول مسدود ساخته است. این انزوا، بنگاه‌ها را به سمت توسعه راهکارهای بومی با هزینه نهایی بالاتر و کارایی عملیاتی پایین‌تر سوق داده و ریسک سرمایه‌گذاری خارجی در پروژه‌های کلان‌مقیاس نظیر شهر هوشمند را به سطح بازدارنده‌ای رسانده است (Zali et al., 2024). پیامدهای این انزوا در سطح اقتصاد خرد، در قالب «نااطمینانی محیطی» و «بحران سرمایه‌گذاری» نمود می‌یابد. نصراللهی و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه خود نشان دادند که نوسانات شدید نرخ ارز و تورم مزمن، افق برنامه‌ریزی استراتژیک مدیران را به شدت کوتاه کرده است. در چنین اتمسفری، پروژه‌های تحول‌آفرین نظیر تحلیل کلان‌داده که بازده سرمایه‌آنها ماهیتی بلندمدت و نامشهود دارد، در اولویت‌بندی منابع مغلوب نیازهای آنی نظیر «تأمین مواد اولیه» می‌شوند (Nasrollahi, Ramezani and Sadraei, 2021). این گزاره با یافته‌های کیانی و همکاران (۱۴۰۲) که چالش‌های مالی را به عنوان «تأثیرگذارترین علت» در شبکه علیت موانع شناسایی کرده‌اند، همسویی کامل دارد؛ بدین معنا که بسیاری از نارسایی‌های دیگر، از جمله ضعف در آموزش، معلول مستقیم تنگناهای مالی ساختاری هستند (Kiani and Andalib Ardakani, 2023).

موانع فرهنگی و مدیریتی: عامل انسانی به مثابه گلوگاه استراتژیک

در حالی که موانع سخت‌افزاری و مالی غالباً ملموس و قابل‌سنجش هستند، تحلیل فراتحلیلی متون بیانگر آن است که موانع «نرم» فرهنگی و مدیریتی، نقشی پنهان اما به مراتب تعیین‌کننده‌تر در کندی گذار صنعتی ایران ایفا می‌کنند. نخستین و شاید نگران‌کننده‌ترین بُعد این چالش، «بحران سرمایه انسانی» و پدیده فرسایش نخبگان است. مطلبی و همکاران (۱۴۰۴) در تدوین ماتریس استراتژیک صنعت فولاد، «کمبود استعداد» را در زمره ده تهدید اصلی طبقه‌بندی کرده و استدلال می‌کنند که چالش فراتر از فقدان نظام آموزشی کارآمد است؛ بلکه «مهاجرت نخبگان» ناشی از فشارهای اقتصادی، صنایع را از سرمایه فکری ضروری برای راهبری فناوری‌های پیچیده‌ای چون اینترنت اشیا و امنیت سایبری تهی ساخته است (Motallebi et al., 2025). در همین راستا، سعادت‌مند و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه موردی صنعت مخابرات، بر ناکارآمدی مدل‌های سنتی مدیریت منابع انسانی تأکید ورزیده و هشدار می‌دهند که بدون استقرار پارادایم «مدیریت استعداد دیجیتال» — که چرخه‌ی جذب، نگهداشت و بازآفرینی مهارت‌ها را پوشش دهد — سازمان‌ها در تله تکنولوژی‌های پیشرفته اما بلااستفاده گرفتار خواهند شد (Saadatmand, Safaie and Dastjerdi, 2022).

¹ Technological Isolation

² High-tech

³ ROI

دومین محور در تحلیل موانع نرم، تضاد ذاتی میان «الزامات شفافیت» در فناوری‌های نوین و «فرهنگ سازمانی» سنتی در ایران است. نوروززاده و همکاران (۱۴۰۴) با بهره‌گیری از مدل‌سازی معادلات ساختاری در صنعت ساختمان، اثبات نمودند که فرهنگ سازمانی نقش یک «میانجی کامل» را ایفا می‌کند؛ بدین مفهوم که حتی در صورت دسترسی به کلان‌داده‌ها، فقدان فرهنگی که حامی تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد و جریان آزاد اطلاعات باشد، عقیم‌ماندن پروژه‌های پایداری زنجیره تأمین را در پی خواهد داشت. وجود «سیلوهای سازمانی»^۱ و مقاومت در برابر اشتراک دانش، از موانع اصلی در این حوزه محسوب می‌شوند (Norouzzadeh et al., 2025). فزون بر این، کیانی و همکاران (۱۴۰۲) در صنعت شیشه، ریشه‌های روان‌شناختی این مقاومت را در «ترس از بیکاری» و پنداشت فناوری به عنوان تهدیدی برای امنیت شغلی در میان لایه‌های کارگری و مدیریت میانی جستجو کرده‌اند (Kiani and Andalib Ardakani, 2023).

در نهایت، موفقیت گذار به صنعت ۴۰ در گرو عبور از «شکاف دیجیتال در سطح رهبری» است. شواهد تجربی حاکی از آن است که ادراک مدیران ارشد ایرانی از انقلاب صنعتی چهارم، غالباً سطحی و تک‌بعدی است. یوسفی و همکاران (۱۴۰۳) در صنعت غذا نشان دادند که اگرچه حمایت مدیریت ارشد یک عامل حیاتی موفقیت قلمداد می‌شود، اما بسیاری از مدیران به دلیل فقدان دانش فنی، قادر به درک ارزش‌افزوده استراتژیک و بلندمدت فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا نبوده و صرفاً بر بازدهی‌های کوتاه‌مدت تمرکز دارند (Yousefi et al., 2024). این یافته با نتایج مطالعه تطبیقی قبخلو و همکاران (۱۳۹۸) نیز همخوانی دارد؛ پژوهشی که نشان داد سطح پایین‌تر دانش مدیران ایرانی در قیاس با هم‌تایان مالزیایی، منجر به تردید و محافظه‌کاری در تخصیص بودجه به زیرساخت‌های حیاتی همچون رایانش ابری شده است (Ghobakhloo and Ching, 2019).

پیامدهای سنجش‌پذیر گذار دیجیتال: از کارایی عملیاتی تا بهینه‌سازی هزینه فرصت

علیرغم چالش‌های ساختاری و نهادی پیش‌گفته، واکاوی دقیق و کمی‌سازی‌شده‌ی متون پژوهشی بیانگر آن است که پیاده‌سازی مولفه‌های صنعت ۴۰ در زیست‌بوم صنعتی ایران، تأثیرات ملموس و قابل‌سنجشی بر شاخص‌های کلیدی عملکرد بر جای گذاشته است. این تأثیرات که فراتر از مباحث نظری بوده و در داده‌های تجربی^۲ نمود یافته‌اند، در دو بُعد کلان «ارتقای کارایی عملیاتی و هماهنگی» و «پایداری و کاهش هزینه فرصت» قابل تبیین هستند.

در بُعد کارایی عملیاتی، شواهد آماری مستخرج از صنایع فرآیندی، همبستگی مستقیم و معناداری را میان پذیرش فناوری‌های دیجیتال و بهبود عملکرد زنجیره تأمین نشان می‌دهند. مطالعه جامع محقر و همکاران (۱۴۰۴) که بر پایه نظرات ۳۴۴ خبره در صنعت استراتژیک پلی‌اتیلن سامان یافته است، بینشی عمیق از مکانیزم اثرگذاری این فناوری‌ها ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که فناوری‌های نسل چهارم توانسته‌اند ۶۲.۳ درصد از واریانس «عملکرد زنجیره تأمین» را تبیین نمایند؛ رقمی که نشان‌دهنده ضریب نفوذ بالای این فناوری‌هاست. با این حال، تحلیل دقیق‌تر ضرایب مسیر آشکار می‌سازد که این تأثیرگذاری بیش از آنکه مستقیم باشد، از طریق متغیرهای میانجی «هماهنگی» و «یکپارچگی» محقق شده است (شکل ۲). تفسیر این داده‌ها در بافتار صنعتی ایران اثبات می‌کند که ارزش‌افزوده اصلی دیجیتالی‌سازی، در رفع گلوگاه‌های اطلاعاتی، ایجاد شفافیت و کاهش «هزینه‌های مبادله» نهفته است و فناوری نه صرفاً به عنوان ابزار تولید، بلکه به عنوان «تسهیل‌گر هماهنگی» عمل کرده است (Mohaghar, Ghasemi and Taghipour, 2026).

این الگوی اثرگذاری نیز با ماهیتی متفاوت تکرار شده است. نصراللهی و همکاران (۲۰۲۱) در پیمایش ۲۲۴ مدیر صنعتی، کمی‌سازی دقیقی از تأثیر تحلیل کلان‌داده ارائه دادند. یافته‌های تحلیل مسیر در این مطالعه نشان می‌دهد که تحلیل کلان‌داده تأثیر مثبت و معناداری

¹ Organizational Silos

² Empirical

بر «عملکرد مالی» (ضریب مسیر ۰.۳۹۲) و «عملکرد بازار» (ضریب مسیر ۰.۳۲۱) داشته است. این ارقام مؤید آن هستند که در شرایط رکود تورمی حاکم بر اقتصاد ایران، داده‌کاوی فراتر از یک ابزار فنی، به راهبردی برای بقا تبدیل شده است که از طریق هدف‌گذاری دقیق مشتریان و بهینه‌سازی تخصیص منابع، سهم بازار و سودآوری را تضمین می‌کند (Nasrollahi, Ramezani and Sadraei, 2021).

همزمان در صنعت مواد غذایی، یوسفی و همکاران (۱۴۰۳) با بهره‌گیری از تکنیک «دیمتل خاکستری»^۱ نشان دادند که پیاده‌سازی IoT تأثیرات نامتوازنی داشته و بیشترین نمود آن در شاخص‌های فنی و اقتصادی بوده است. به طور مشخص، استقرار حسگرهای پایش محیطی در شرکت‌های پیشرو، از طریق ارتقای «قابلیت اطمینان»^۲ و کاهش ضایعات، مستقیماً هزینه‌های عملیاتی را تقلیل داده است (Yousefi et al., 2024).

در بُعد دوم، یعنی پایداری و مدیریت هزینه فرصت، رویکرد پژوهشگران ایرانی بر استفاده از مدل‌های ریاضی جهت کمی‌سازی هزینه‌های پنهان و ریسک متمرکز بوده است. در صنعت خودرو، شیخ و صنفی (۱۴۰۴) با ابداع متدولوژی فازی OPLD-POCOD، سلسله‌مراتبی از فناوری‌ها را بر اساس شاخص DOL ارائه کردند. یافته‌های این پژوهش که از اهمیت راهبردی بالایی برخوردار است، نشان می‌دهد که فناوری «شبیه‌سازی» با کمترین میزان زیان فرصت، کارآمدترین ابزار برای ارتقای پایداری محسوب می‌شود و پس از آن فناوری‌های «بلاک‌چین» و RFID قرار می‌گیرند. دلالت ضمنی این آمار آن است که در اتمسفر تحریمی و محدودیت منابع، سرمایه‌گذاری بر روی بهینه‌سازی مجازی (شبیه‌سازی) و شفافیت اطلاعاتی، بازدهی پایداری به مراتب بالاتری نسبت به فناوری‌های سخت‌افزارمحور و گران‌قیمت نظیر رباتیک و پهپادها ایجاد می‌کند (Sheikh and Senfi, 2025).

این رویکرد داده‌محور به پایداری، در صنعت ساختمان نیز توسط نوروززاده و همکاران (۱۴۰۴) مورد واکاوی قرار گرفته است. تحلیل ضرایب تأثیر در این حوزه نشان می‌دهد که تحلیل کلان‌داده بیشترین اثرگذاری را بر «پایداری زیست‌محیطی» و «پایداری اجتماعی» داشته است، در حالی که تأثیر آن بر پایداری اقتصادی کمتر بوده است (شکل ۲). این تفاوت معنادار در ضرایب، بیانگر آن است که کاربرد داده‌کاوی در پروژه‌های عمرانی ایران، عمدتاً در خدمت مدیریت پسماند و ارتقای ایمنی نیروی کار قرار گرفته است (Norouzzadeh et al., 2025).

در تکمیل این بحث، مدل ترکیبی سیستم استنتاج فازی (FIS) توسعه‌یافته توسط فلاح‌پور و همکاران (۲۰۲۱) در صنعت نساجی نیز نشان داد که ادغام معیارهای دیجیتال در فرآیند انتخاب تأمین‌کننده، با کاهش عدم قطعیت‌ها، ریسک‌های زیست‌محیطی در حلقه‌های پایین‌دستی زنجیره تأمین را به طرز چشمگیری کاهش می‌دهد (Fallahpour et al., 2021).

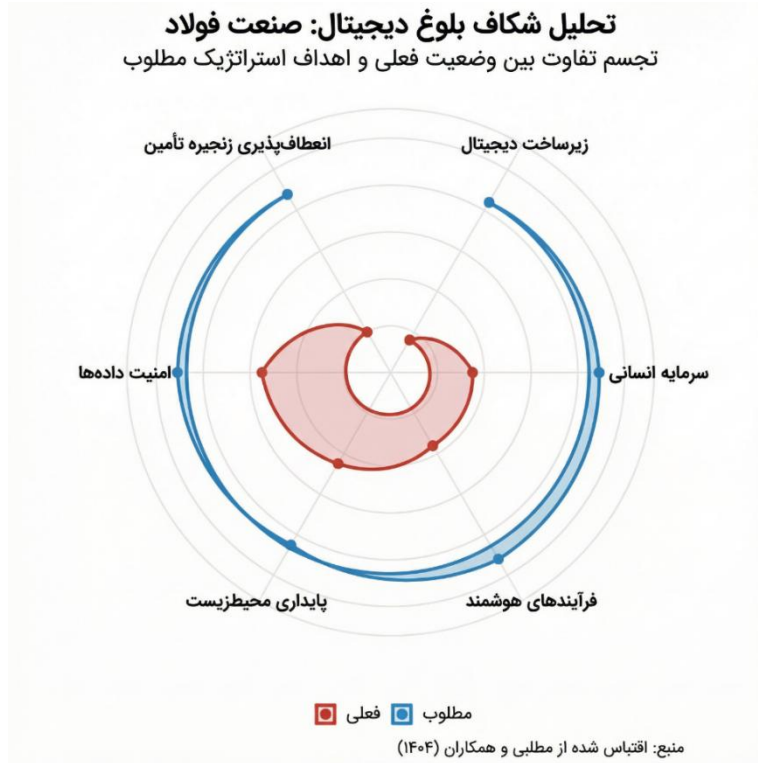
تحلیل شکاف عملکردی در صنایع مادر: پارادوکس سرمایه‌گذاری و بهره‌وری

در تقابل با یافته‌های پیشین که حاکی از ارتقای کارایی و چابکی در صنایع پایین‌دستی بود، واکاوی وضعیت در صنایع بالادستی و مادر، تصویری متفاوت و تأمل‌برانگیز را ترسیم می‌کند. در این بخش، شاخص‌های عملکردی بیش از آنکه نمایانگر «بهبود مستمر وضعیت موجود» باشند، بر «فاصله ژرف تا افق مطلوب» دلالت دارند. به‌طور مشخص در صنعت استراتژیک فولاد، «تحلیل شکاف» صورت‌گرفته توسط مطلبی و همکاران (۱۴۰۴)، عمق این نارسایی را با دقت ریاضی آشکار می‌سازد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، نمره عملکرد فعلی صنعت فولاد در پیاده‌سازی استراتژی‌های هوشمند، بر روی طیف فازی تنها عدد ۰.۱۶ را نشان می‌دهد، در حالی که نمره هدف‌گذاری شده در اسناد راهبردی برابر با ۰.۸۴ است. وجود این شکاف ۰.۶۸ واحدی، فراتر از یک عقب‌ماندگی آماری، نشان‌دهنده «ناکامی ساختاری» در بالفعل‌سازی ظرفیت‌های بالقوه است. تحلیل دقیق‌تر مؤلفه‌ها نشان می‌دهد که کانون‌های بحرانی این شکاف در دو حوزه «توسعه زیرساخت» و «توازن

¹ Grey DEMATEL

² Reliability

زنجیره تأمین^۱ متمرکز شده‌اند (شکل ۵). این شواهد تجربی اثبات می‌کنند که صنعت فولاد ایران، علی‌رغم تزریق سرمایه‌های کلان و انباشت دارایی‌های فیزیکی، در «ترجمه» این سرمایه‌گذاری‌ها به «مزیت رقابتی عملیاتی» و هوشمندسازی فرآیندها ناتوان مانده است (Motallebi et al., 2025).



شکل ۵. تحلیل نموداری شکاف بلوغ دیجیتال در صنعت فولاد ایران.

نمودار رادار، گسست معنادار میان وضعیت عملیاتی موجود (خط قرمز) و اهداف استراتژیک مطلوب (خط آبی) را به تصویر می‌کشد. بیشینه شدن این شکاف در ابعاد «زیرساخت دیجیتال» و «انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین»، فرضیه «قفل‌شدگی تکنولوژیک»^۲ و ناتوانی در گذار از سخت‌افزار به نرم‌افزار را در صنایع مادر تأیید می‌کند. منبع: اقتباس از مطلبی و همکاران (۱۴۰۴).

بحث

این مطالعه مروری با هدف واکاوی وضعیت، چالش‌ها و پیامدهای پیاده‌سازی پارادایم‌های انقلاب صنعتی چهارم در بستر صنعتی ایران انجام شد. سنتز نظام‌مند شواهد تجربی برگرفته از ۱۲ مطالعه منتخب، نشان‌دهنده یک الگوی پیچیده و چندوجهی است که می‌توان آن را تحت عنوان «توسعه دیجیتال ناهمگون و واگرا» مفهوم‌سازی کرد. برخلاف مسیرهای خطی مشاهده شده در اقتصادهای توسعه‌یافته، گذار دیجیتال در ایران تحت تأثیر تعامل پویای فشارهای ژئوپلیتیک، محدودیت‌های ساختاری اقتصاد و ویژگی‌های فرهنگی، مسیر منحصر به فردی را طی می‌کند.

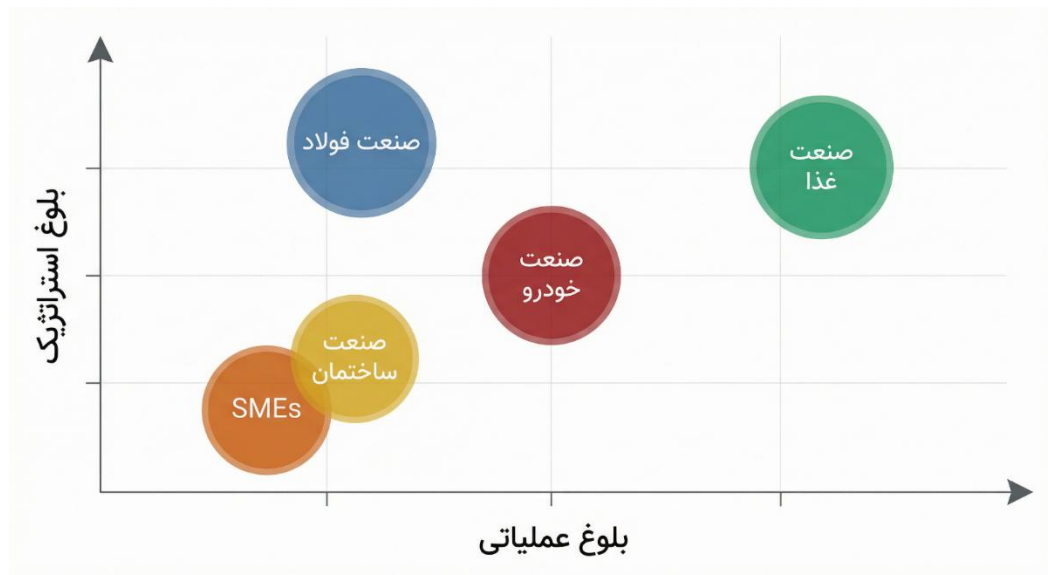
پارادوکس بلوغ: شکاف میان «جاه‌طلبی مفهومی» و «واقعیت عملیاتی»

یکی از برجسته‌ترین یافته‌های این پژوهش، وجود یک شکاف معنادار میان سطح بلوغ استراتژیک (آنچه مدیران آرزو دارند) و سطح بلوغ عملیاتی (آنچه در کف کارخانه رخ می‌دهد) است (شکل ۶). تحلیل‌های مطلبی و همکاران (۱۴۰۴) در صنعت فولاد و بیات‌زاده و طلائی

¹ Supply Chain Balancing

² Technology Lock-in

(۱۴۰۳) نشان می‌دهد که گفتمان مدیریتی در صنایع مادر ایران، به سرعت از مفاهیم اولیه اتوماسیون عبور کرده و به سمت پارادایم‌های پیشرفته‌تری نظیر «صنعت ۵.۰» و «تاب‌آوری انسان‌محور» حرکت کرده است (Bayatzadeh and Talaie, 2024; Motallebi et al., 2025). با این حال، این جهش با واقعیت‌های زیرساختی همخوانی ندارد.



شکل ۶. موزاییک دیجیتال ایران: ماتریس بلوغ استراتژیک در مقابل عملیاتی.

داده‌های کمی حاصل از تحلیل شکاف در صنعت فولاد حاکی از آن است که زیرساخت‌های فیزیکی و دیجیتال هنوز در مراحل ابتدایی انقلاب سوم صنعتی (اتوماسیون پایه) باقی مانده‌اند (Motallebi et al., 2025). این تضاد، پدیده‌ای را ایجاد کرده است که می‌توان آن را «توهم بلوغ دیجیتال» نامید؛ وضعیتی که در آن تدوین اسناد بالادستی و استراتژی‌های کلان بر اساس لبه تکنولوژی انجام می‌شود، اما فرآیندهای اجرایی به دلیل محدودیت در سنسورها، عملگرها و یکپارچگی داده‌ها، ناتوان از پشتیبانی این استراتژی‌ها هستند. این یافته با نتایج کیانی و همکاران (۱۴۰۲) در صنعت شیشه همسویی دارد که نشان دادند در غیاب زیرساخت‌های پایه، تلاش برای پیاده‌سازی مفاهیم پیشرفته منجر به بروز چالش‌های مدیریتی و هدررفت منابع می‌شود (Kiani and Andalib Ardakani, 2023).

دوگانگی در محرک‌های پذیرش: «کارایی» در برابر «بقا»

ادبیات جهانی عمدتاً محرک‌های پذیرش صنعت ۴.۰ را در «افزایش بهره‌وری» و «سفارشی‌سازی انبوه» جستجو می‌کند. با این حال، تفسیر یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در اکوسیستم ایران، محرک اصلی ماهیت «تدافعی» دارد. مطالعات محقر و همکاران (۱۴۰۴) در صنعت پلی‌اتیلن و نصرالهی و همکاران (۲۰۲۱) اثبات می‌کنند که توسل به فناوری‌های دیجیتال، بیش از آنکه با هدف نوآوری رادیکال باشد، واکنشی به «عدم قطعیت محیطی» است (Nasrollahi, Ramezani and Sadraei, 2021; Mohaghar, Ghasemi and Taghipour, 2026).

در شرایطی که زنجیره‌های تأمین در ایران با نوسانات شدید نرخ ارز، اختلال در تأمین مواد اولیه و تحریم‌های بین‌المللی مواجه‌اند، فناوری نقش یک «مکانیزم ثبات‌ساز» را ایفا می‌کند (Dura et al., 2025). برای مثال، استفاده از سیستم‌های مانیتورینگ بلادرنگ در صنعت غذا و پتروشیمی، نه برای اتوماسیون کامل، بلکه برای ایجاد شفافیت حداقلی و پیش‌بینی اختلالات احتمالی به کار گرفته می‌شود تا تاب‌آوری سازمان در برابر شوک‌های خارجی افزایش یابد. این رویکرد توضیح می‌دهد که چرا در مدل‌سازی‌های انجام شده، ضریب تأثیر فناوری بر «هماهنگی» و «یکپارچگی» بسیار بالاتر از تأثیر مستقیم آن بر «نوآوری محصول» است.

ناهمگونی بخشی و منطق تطبیق تکنولوژیک: واگرایی اجباری

تحلیل تطبیقی الگوهای پذیرش فناوری در میان خوشه‌های مختلف صنعتی ایران، پرده از یک «منطق انتخاب تکنولوژی» منحصربه‌فرد برمی‌دارد که می‌توان آن را در چارچوب نظری «سازگاری استراتژیک با محدودیت» مفهوم‌سازی نمود (Yang et al., 2018). این منطق، منجر به شکل‌گیری نوعی «ناهمگونی بخشی»^۱ شده است که در آن مسیر توسعه دیجیتال بر اساس شدت وابستگی صنایع به واردات سخت‌افزاری تعیین می‌گردد. در صنایع «سخت‌افزار-بر» نظیر خودروسازی که به شدت تحت تأثیر تحریم‌های تکنولوژیک و موانع واردات ماشین‌آلات پیشرفته (نظیر رباتیک و اتوماسیون سنگین) قرار دارند، نقطه ثقل نوآوری به سمت فناوری‌های «نرم‌افزار-محور» تغییر جهت داده است. همان‌گونه که یافته‌های شیخ و صنفی (۱۴۰۴) نشان می‌دهد، در این بستر، فناوری «شبیه‌سازی» با تحمیل کمترین هزینه فرصت، از یک ابزار جانبی به یک «جایگزین استراتژیک» برای فرآیندهای تحقیق و توسعه (R&D) و آزمون محصول تبدیل شده است (Sheikh and Senfi, 2025). این تغییر رویکرد به صنایع اجازه می‌دهد تا در غیاب سرمایه‌گذاری‌های ارزی کلان برای نوسازی فیزیکی خطوط تولید، پویایی نوآوری را در فضای سایبری حفظ نمایند.

در نقطه مقابل این طیف، صنایع فرآیندی و خدماتی قرار دارند که به دلیل ماهیت کمتر وابسته به ماشین‌آلات سنگین خارجی، مسیر متفاوتی را پیموده‌اند. در این بخش‌ها، ارزش‌افزوده اصلی نه از طریق تغییرات سخت‌افزاری، بلکه از طریق «استخراج دانش» از داده‌های انباشته‌شده حاصل می‌شود. مطالعات یوسفی و همکاران (۱۴۰۳) و حیاتی و ذهابی (۱۴۰۴) مؤید این واقعیت است که این صنایع موفق شده‌اند سطح بالاتری از بلوغ دیجیتال را در لایه‌های تحلیلی و اینترنت اشیا تجربه کنند (Yousefi et al., 2024; Hayati and Zahabi, 2025; Sheikh and Senfi, 2025). برآیند این دو روند متفاوت، ظهور پدیده‌ای است که در این پژوهش تحت عنوان «واگرایی اجباری»^۲ نامگذاری می‌شود. برخلاف پارادایم رایج در کشورهای توسعه‌یافته که بر «همگرایی سیستم‌های سایبری-فیزیکی» (GPS) استوار است، در اکوسیستم ایران شاهد پیشی گرفتن معنادار توسعه نرم‌افزاری و تحلیلی از توسعه رباتیک و سخت‌افزاری هستیم؛ وضعیتی که مستقیماً ریشه در محدودیت‌های دسترسی به زنجیره جهانی تأمین تکنولوژی دارد.

خلاء نهادی و چالش‌های حکمرانی: فراتر از پارادایم تحریم

اگرچه تحریم‌های بین‌المللی غالباً به عنوان مقصر اصلی عقب‌ماندگی تکنولوژیک در ایران معرفی می‌شوند، سنتز انتقادی متون نشان می‌دهد که «ضعف حکمرانی داخلی» نقشی به مراتب تعیین‌کننده‌تر در کندی توسعه اکوسیستم دیجیتال ایفا کرده است (Dadgar, 2025). تحلیل تاریخی و نهادی صادقی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) در خصوص نظام نوآوری اینترنت اشیا در ایران، وجود یک «تأخر نهادی»^۳ عمیق را به اثبات می‌رساند. این پژوهش نشان می‌دهد که در حالی که بخش عرضه فناوری از رشد و پویایی قابل توجهی برخوردار بوده است، نهادهای تنظیم‌گر^۴ در همگامی با این تحولات و تدوین چارچوب‌های حقوقی ضروری دچار ناکارآمدی و ایستایی بوده‌اند (Sadeghizadeh, A. D. Markazi and Shavvalpour, 2022).

ریشه این ناکارآمدی را می‌توان در فلسفه حکمرانی دولت جستجو کرد. استدلال محوری پژوهش حاضر آن است که دولت در ایران به جای گذار به نقش‌های مدرن «تسهیل‌گری» و «تنظیم‌گری هوشمند»، همچنان بر حفظ نقش سنتی و مداخله‌گرانه خود به عنوان «تأمین‌کننده انحصاری» پافشاری می‌کند؛ رویکردی که منجر به سرکوب نوآوری در بخش خصوصی و ایجاد انحصارهای ناکارآمد شده است.

¹ Sectoral Heterogeneity

² Forced Divergence

³ Institutional Lag

⁴ Regulators

همسو با این تحلیل، زالی و همکاران (۱۴۰۳) در آسیب‌شناسی پیاده‌سازی دوقلوهای دیجیتال شهری، شناسایی کردند که فقدان پروتکل‌های استاندارد برای اشتراک‌گذاری داده میان نهادهای دولتی و شهرداری‌ها، مانع اصلی در یکپارچگی اطلاعاتی است (Zali et al., 2024). این پدیده که می‌توان آن را «سیلوهای داده‌ای حاکمیتی» نامید، سبب شده است که حتی در صورت وجود داده‌های باکیفیت و حجیم (در حوزه‌هایی نظیر ترافیک یا انرژی)، امکان تلفیق و فرآوری آن‌ها جهت تصمیم‌گیری هوشمند سلب گردد. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که چالش بنیادین در مسیر هوشمندسازی ایران، نه «فقر داده»، بلکه «انسداد جریان داده» است.

اصطکاک فرهنگی و مقاومت سازمانی: دیالکتیک سنت و مدرنیته دیجیتال

واکوی‌های پدیدارشناختی و عمیق‌تر از موانع پیاده‌سازی، این واقعیت را آشکار می‌سازد که سهمگین‌ترین سد در برابر استقرار پارادایم صنعت ۴.۰ در بنگاه‌های ایرانی، ماهیت «تکنولوژیک» و سخت‌افزاری نداشته، بلکه ریشه در پیچیدگی‌های «فرهنگ سازمانی» و بحران «سرمایه انسانی» دارد. شواهد پژوهشی در این حوزه، مؤید وجود نوعی «اصطکاک فرهنگی»^۱ میان الزامات ذاتی عصر دیجیتال و ساختارهای سلسله‌مراتبی و دیوان‌سالارانه سنتی در شرکت‌های ایرانی است (Abdul Basit et al., 2024).

در تبیین دقیق‌تر این پدیده، مطالعه نوروززاده و همکاران (۱۴۰۴) اثبات نمودند که فرهنگ سازمانی نقش یک «متغیر میانجی کامل» را در رابطه علی میان تحلیل کلان‌داده‌ها و «پایداری» ایفا می‌کند. دلالت ضمنی و بسیار مهم این یافته آماری آن است که تزریق صرف تکنولوژی به سازمانی با فرهنگ بسته، غیرمشارکتی و جزیره‌ای، فاقد هرگونه اثرگذاری معنادار بر عملکرد نهایی خواهد بود (Norouzzadeh et al., 2025). ریشه این ناکارآمدی در «اقتصاد سیاسی» درون‌سازمانی نهفته است؛ جایی که در بسیاری از شرکت‌های ایرانی، اطلاعات نه به عنوان یک دارایی عمومی برای تصمیم‌گیری، بلکه به مثابه «اهرم قدرت» تلقی می‌شود. در چنین اتمسفری، مدیران میانی در برابر اشتراک‌گذاری داده‌ها—که پیش‌شرط حیاتی برای کارکرد سیستم‌های یکپارچه و اینترنت اشیا است—مقاومتی سرسختانه نشان می‌دهند، زیرا شفافیت را تهدیدی برای جایگاه و اقتدار سنتی خود می‌پندارند.

چالش بنیادین دیگر در لایه سرمایه انسانی، ناتوانی پارادایم‌های سنتی «مدیریت منابع انسانی» در مواجهه با الزامات عصر دیجیتال، به‌ویژه در جذب و نگهداشت «تخبگان فناوری» است. پژوهش سعادت‌مند و همکاران (۱۴۰۱) در صنعت مخابرات استدلال می‌کند که بقای سازمان‌ها در زیست‌بوم رقابتی کنونی، مستلزم گذار پارادایمی به سمت «مدیریت استعداد دیجیتال» است. با این حال، ساختارهای صلب اداری و نظام‌های پاداش‌دهی سنتی در ایران، توانایی رقابت برای جذب استعداد‌های کمیاب را از دست داده‌اند (Saadatmand, Safaie and Dastjerdi, 2022). این پدیده که در ادبیات موضوع تحت عنوان «فرار مغزها» شناخته می‌شود و در مطالعه مطلبی و همکاران (۱۴۰۴) نیز به عنوان یک تهدید استراتژیک طبقه‌بندی شده است (Motallebi et al., 2025)، منجر به ظهور وضعیت نگران‌کننده‌ای شده است که می‌توان آن را «تهی‌شدگی تکنولوژیک» نامید. در این وضعیت، اگرچه بنگاه‌ها ممکن است موفق به انباشت دارایی‌های فیزیکی و خرید سخت‌افزارهای روزآمد شوند، اما سازمان از «دانش ضمنی» و مهارت‌های شناختی لازم برای بهره‌برداری، نگهداری و توسعه این فناوری‌ها تهی شده است.

پیامدهای پایداری: دیالکتیک نمایش نمادین و استلزام اقتصادی

در فرجام بحث پیرامون پیامدهای زیست‌محیطی، تحلیل‌ها پرده از دوگانگی معناداری برمی‌دارند که تمایز میان «اقدامات نمادین» و «کارایی عملیاتی» را برجسته می‌سازد. اگرچه ممکن است برخی صنایع از برچسب دیجیتالی‌سازی صرفاً به عنوان ابزاری برای «سبزشویی»^۲

¹ Cultural Friction

² Greenwashing

و نمایش مسئولیت اجتماعی بهره‌برداری کنند، اما شواهد کمی متقن مستخرج از مطالعات فلاح‌پور و همکاران (۲۰۲۱) و شیخ و صنفی (۱۴۰۴) نشان می‌دهد که در صناعی که تحت فشار شدید هزینه‌ای قرار دارند (نظیر نساجی و خودرو)، دیجیتالی‌سازی منجر به تحقق «پایداری واقعی» شده است (Fallahpour et al., 2021; Sheikh and Senfi, 2025).

بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوشمند جهت گزینش تأمین‌کنندگان سبز و کاربست تکنیک‌های شبیه‌سازی برای تقلیل ضایعات تولید، نشان‌دهنده تغییر ماهیت مفهوم پایداری در بستر اقتصاد ایران است. برخلاف کشورهای توسعه‌یافته که در آن‌ها پایداری ممکن است به مثابه یک ارزش‌افزوده اخلاقی یا کالایی لوکس تلقی شود، در اقتصاد تحت‌فشار و تحریم‌زده‌ی ایران، کاهش مصرف انرژی و مواد اولیه از مجرای هوشمندسازی، همگرا با استراتژی‌های «کاهش هزینه» و شرط لازم برای بقای بنگاه است. از این‌رو، می‌توان استنتاج نمود که محرک اصلی پایداری دیجیتال در ایران، بیش از آنکه یک «الزام اخلاقی» باشد، یک «ضرورت اقتصادی» برای تاب‌آوری است (Sohrabi et al., 2021).

چارچوب مفهومی سنتز شده: مدل «دیجیتالی‌سازی تاب‌آور و تطبیقی»

بر مبنای فراتحلیل انتقادی پژوهش‌های بررسی‌شده و با در نظر گرفتن بافتار منحصر‌به‌فرد ایران، می‌توان الگوی گذار صنعتی کشور به سوی پارادایم صنعت ۴.۰ را در قالب مدل نظری «دیجیتالی‌سازی تاب‌آور و تطبیقی»^۱ مفهوم‌سازی نمود. این مدل پیشنهاد می‌کند که در اقتصادهای در حال توسعه و مواجه با محدودیت‌های بین‌المللی، مسیر بلوغ دیجیتال نه یک خط مستقیم، بلکه فرآیندی سه لایه و درهم‌تنیده است (شکل ۷):

نخست، «لایه زیرساخت تدافعی» قرار دارد. در این سطح، استراتژی اصلی بر غلبه بر محدودیت‌های سخت‌افزاری و تحریم‌ها متمرکز است. صنایع ایران به جای اصرار بر واردات ماشین‌آلات که با موانع جدی روبروست، رویکرد جایگزینی فناوری‌های «نرم‌افزار-محور» به جای راهکارهای «سخت‌افزار-محور» را اتخاذ کرده‌اند. دوم، «لایه هماهنگی زنجیره» است. در این لایه، فناوری‌ها، کارکردی فراتر از اتوماسیون صرف می‌یابند. هدف غایی در اینجا، ایجاد «اعتماد سیستمی» و «شفافیت عملیاتی» در زنجیره‌های تأمین است که ذاتاً غیر شفاف و پرنوسان هستند. سوم و نهایی‌ترین لایه، «لایه توانمندسازی انسانی» است که به عنوان حلقه مفقوده اصلی در اکوسیستم ایران شناسایی می‌شود. این لایه بر گذار پارادایمی از مدیریت سنتی منابع انسانی به «مدیریت استعداد دیجیتال» و نهادینه‌سازی فرهنگ داده‌محور تأکید دارد.



شکل ۷. شماتیک چارچوب «دیجیتالی‌سازی تاب‌آور-انطباقی» طراحی شده برای زیست‌بوم صنعتی ایران، نشان‌دهنده تعامل

پویای سه لایه زیرساخت، هماهنگی و توانمندسازی.

¹ Resilient-Adaptive Digitalization

پیشنهادهای کاربردی

بر اساس سنتز شواهد تجربی و نظری مستخرج از مقالات، مجموعه‌ای از توصیه‌های راهبردی تفکیک‌شده برای سطوح حکمرانی و نگاه‌داری ارائه می‌گردد. نخستین گام ضروری، «تغییر پارادایم از تصدی‌گری به تنظیم‌گری» است. دولت باید به جای ورود مستقیم به سرمایه‌گذاری در پروژه‌های دیجیتال، بر تدوین یک «رژیم حقوقی جامع داده‌ها» تمرکز نماید. شفاف‌سازی پروتکل‌های مالکیت داده و امنیت سایبری پیش‌شرط حیاتی برای جلب اعتماد و سرمایه بخش خصوصی در حوزه اینترنت اشیا است. گام دوم، «توسعه پلتفرم‌های ملی تبادل داده» است. ایجاد استانداردهای «تعامل‌پذیری» میان سازمان‌های دولتی و شهرداری‌ها، برای تحقق پروژه‌هایی نظیر دوقلوهای دیجیتال شهری الزامی است. نهایتاً، بازنگری در نظام مشوق‌ها و جایگزینی وام‌های عمومی کور با «یارانه‌های هوشمند مبتنی بر عملکرد» توصیه می‌شود؛ به گونه‌ای که حمایت‌ها صرفاً به بنگاه‌هایی تعلق گیرد که شاخص‌های عینی پایداری و بهره‌وری انرژی را از طریق راهکارهای دیجیتال ارتقاء داده‌اند.

برای شرکت‌های کوچک و متوسط که با محدودیت منابع مواجه هستند، استراتژی شروع کوچک، مقیاس‌دهی هوشمند تجویز می‌شود. پیشنهاد می‌گردد به جای تمرکز بر پروژه‌های عظیم و پرریسک نظیر اتوماسیون کامل خطوط، از پروژه‌های زودبازده همچون تحلیل داده‌های موجود و نصب حسگرهای پایش انرژی آغاز نمایند. اولویت دوم، «سرمایه‌گذاری بر فرهنگ مقدم بر تکنولوژی» است. پیش از تخصیص بودجه به نرم‌افزارهای گران‌قیمت، سرمایه‌گذاری بر آموزش سرمایه انسانی و تغییر فرهنگ سازمانی به سمت تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد ضروری است. در این راستا، جذب یا تربیت مترجمان دیجیتال حیاتی است. در نهایت، با توجه به شرایط تحریم و هزینه بالای تجهیزات، استفاده از «شبیه‌سازی و دوقلوهای دیجیتال» جهت بهینه‌سازی مجازی خطوط تولید فعلی، به عنوان کم‌هزینه‌ترین و پربازده‌ترین استراتژی عملیاتی پیشنهاد می‌گردد.

محدودیت‌ها و پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی

این مطالعه با محدودیت‌هایی در دسترسی به داده‌های کمی عملکردی برخی صنایع روبرو بود. پژوهش‌های آتی می‌توانند با تمرکز بر مطالعات طولی، تأثیر بلندمدت دیجیتالی‌سازی بر شاخص‌های مالی شرکت‌های ایرانی را پس از گذر از شوک‌های اولیه تحریم، مورد سنجش قرار دهند. همچنین، بررسی نقش «استارت‌آپ‌های B2B» به عنوان تسهیل‌گران گذار صنعتی در ایران، حوزه‌ای بکر برای پژوهش است.

نتیجه‌گیری

این واکاوی سیستماتیک و سنتز روایی متون پژوهشی، با عبور از تحلیل‌های سطحی، چشم‌اندازی چندبعدی و عمیق از وضعیت گذار به پارادایم صنعت ۴.۰ در ایران ترسیم می‌نماید. برآیند تحلیل‌ها حاکی از شکل‌گیری ساختاری است که در این پژوهش تحت عنوان موزائیک دیجیتال مفهوم‌سازی می‌شود؛ زیست‌بومی نامتجانس که در آن جزایر پیشرو با بلوغ استراتژیک در مجاورت بدنه‌ای سنتی و مقاوم در برابر تغییر همزیستی دارند. واکاوی دقیق این موزائیک، سه واقعیت بنیادین را آشکار می‌سازد که ماهیت گذار صنعتی در ایران را از الگوهای رایج جهانی متمایز می‌کند.

نخست، وجود «ناهمگونی بخشی» عمیق در سرعت و جهت‌گیری پذیرش فناوری است. صنایع «فرآیندی» و حساس به ایمنی به دلیل الزامات ردیابی و کنترل کیفیت، پیشگامان پذیرش اینترنت اشیا محسوب می‌شوند، حال آنکه صنایع «مونتاژی» و سخت‌افزار-بر (نظیر خودروسازی) تحت تأثیر محدودیت‌های وارداتی، نقطه ثقل نوآوری خود را بر «شبیه‌سازی» و بهینه‌سازی‌های نرم‌افزاری استوار کرده‌اند. دومین واقعیت، تفاوت در «هستی‌شناسی» کاربرد فناوری است. برخلاف اقتصادهای توسعه‌یافته که در آن‌ها دیجیتالی‌سازی اهرمی برای «رهبری

بازار» و تسلط رقابتی است، در اتمسفر اقتصادی ایران، فناوری به مثابه «ابزار بقا» و مکانیسمی برای مدیریت عدم قطعیت‌های ناشی از تحریم و نوسانات کلان عمل می‌کند.

سوم و شاید مهم‌ترین یافته، شناسایی ریشه اصلی نارسایی‌ها است. اگرچه موانع فنی نظیر ضعف زیرساخت‌های ارتباطی چالش‌برانگیز هستند، اما تحلیل‌ها نشان می‌دهد که گلوگاه استراتژیک توسعه، ماهیت «سخت» نداشته، بلکه در «شکاف نهادی» و «اصطکاک فرهنگی» ریشه دارد. از این‌رو، می‌توان استدلال نمود که گذار به صنعت ۴.۰ در ایران، بیش از آنکه یک چالش تکنولوژیک باشد، یک «چالش تحول سازمانی در بستر محدودیت» است. موفقیت در این مسیر دشوار، مستلزم تغییر رویکرد بنیادین از استراتژی «خرید و واردات تکنولوژی» به سمت «خلق قابلیت‌های دیجیتال بومی» و سرمایه‌گذاری بر بلوغ سازمانی است.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازن اخلاقی

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

شفافیت داده‌ها

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

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

- Abdul Basit, S. et al. (2024) 'Review of enablers and barriers of sustainable business practices in SMEs', *Journal of Economy and Technology*, 2, pp. 79–94. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.JECT.2024.03.005>.
- Baethge, C., Goldbeck-Wood, S. and Mertens, S. (2019) 'SANRA—a scale for the quality assessment of narrative review articles', *Research Integrity and Peer Review* 2019 4:1, 4(1), pp. 5-. Available at: <https://doi.org/10.1186/S41073-019-0064-8>.
- Bayatzadeh, S. and Talaie, H. (2024) 'Identifying and evaluating of sustainable and resilient supplier selection criteria according to industry 5.0 concepts (case study: steel industry)', *Journal of Decisions and Operations Research*, 9(4), pp. 1045–1063. Available at: <https://doi.org/10.22105/DMOR.2025.498734.1904>.
- Dadgar, Y. (2025) 'Strategic Outlook for the 2026 Economy: Prospects and Risks', *International Journal of New Political Economy*, 6(2), pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.48308/JEP.2025.106415>.
- Dura, B.S. et al. (2025) 'The role of technology in developing resilient supply chains: a systematic literature review during the COVID-19 pandemic and the disruptions of economic sanctions', *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management [Preprint]*. Available at: <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-03-2024-0036/1253047>.

- Elnadi, M. and Abdallah, Y.O. (2023) 'Industry 4.0: critical investigations and synthesis of key findings', *Management Review Quarterly*, 74(2), p. 1. Available at: <https://doi.org/10.1007/S11301-022-00314-4>.
- Fallahpour, A. et al. (2021) 'An integrated approach for a sustainable supplier selection based on Industry 4.0 concept', *Environmental Science and Pollution Research* 2021, pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/10.1007/S11356-021-17445-Y>.
- Ghobakhloo, M. and Ching, N.T. (2019) 'Adoption of digital technologies of smart manufacturing in SMEs', *Journal of Industrial Information Integration*, 16, p. 100107. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.JII.2019.100107>.
- Ghobakhloo, M., Fathi, M. and Maroufkhani, P. (2021) 'Industry 4.0 and SME Development : The Case of a Middle Eastern Country', *Industry 4.0 in SMEs Across the Globe*, pp. 177–189. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781003165880-14>.
- Grabowska, S. and Saniuk, S. (2022) 'Business Models in the Industry 4.0 Environment—Results of Web of Science Bibliometric Analysis', *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(1), p. 19. Available at: <https://doi.org/10.3390/JOITMC8010019>.
- Hayati, H. and Zahabi, R.A. (2025) 'Leveraging nationwide epidemiological big data for diabetes modeling and disease surveillance: an innovative approach for advancing public health policy in developing countries', *BMC research notes*, 18(1). Available at: <https://doi.org/10.1186/S13104-025-07497-5>.
- Kiani, M. and Andalib Ardakani, D. (2023) 'Finding causal relationship and ranking of industry 4.0 implementation challenges: a fuzzy DEMATEL-ANP approach', *Soft Computing* 2023 27:21, 27(21), pp. 15479–15496. Available at: <https://doi.org/10.1007/S00500-023-09053-4>.
- Koohestani, H. and Majidi, M. (2025) 'A review on green steel; introduction, benefits and challenges of the steelmaking industry', *Ironmaking and Steelmaking* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1177/03019233251345982;WGROU:STRING:PUBLICATION>.
- Majumdar, A., Garg, H. and Jain, R. (2021) 'Managing the barriers of Industry 4.0 adoption and implementation in textile and clothing industry: Interpretive structural model and triple helix framework', *Computers in Industry*, 125. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.COMPIND.2020.103372>.
- Mohaghar, A., Ghasemi, R. and Taghipour, M. (2026) 'An empirical study on technology adoption and supply chain optimization using structural modeling', *Supply Chain Analytics*, 13. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.SCA.2025.100181>.
- Motallebi, S. et al. (2025) 'Assessing the industry 4.0 strategies for a steel supply chain: SWOT, game theory, and gap analysis', *Heliyon*, 11(1), p. e41374. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E41374>.
- Nasrollahi, M., Ramezani, J. and Sadraei, M. (2021) 'The Impact of Big Data Adoption on SMEs' Performance', *Big Data and Cognitive Computing* 2021, Vol. 5, Page 68, 5(4), p. 68. Available at: <https://doi.org/10.3390/BDCC5040068>.
- Noorollahi, Y. et al. (2021) 'Energy transition in petroleum rich nations: Case study of Iran', *Smart Energy*, 3, p. 100026. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.SEGY.2021.100026>.
- Norouzzadeh, A.M. et al. (2025) 'Enhancing construction supply chain Sustainability: The synergistic role of big data analytics and organizational culture using SEM', *Cleaner Engineering and Technology*, 27, p. 101025. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2025.101025>.
- Roshani, A. and Sheikholeslami Kandelousi, N. (2025) 'Prerequisites for Embracing Technology Artificial Intelligence in Iranian Government Agencies: A Roadmap for Transformative Governance'. Available at: <https://doi.org/10.2139/SSRN.5098035>.
- Saadatmand, M.R., Safaie, N. and Dastjerdi, M. (2022) 'Presenting a structural model of digitalised talent management in a new age: A case study on the mobile telecommunication industry in Iran', *SA Journal of Human Resource Management*, 20. Available at: <https://doi.org/10.4102/SAJHRM.V20I0.1894>.
- Sadeghizadeh, H., Markazi, A.D. and Shavvalpour, S. (2022) 'Clarifying the Role of Governance in the Development of IoT Technological Innovation System in Iran', *Iranian Journal of Information Processing and Management*, 38(1), pp. 139–168. Available at: <https://doi.org/10.35050/JIPM010.2022.016>.
- Sadeghizadeh, H., Markazi, A.H.D. and Shavvalpour, S. (2022) 'Investigating the Relationship between Governance and Key Processes of the Iran IoT Innovation System', *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(2), p. 652. Available at: <https://doi.org/10.3390/S22020652>.
- Sharifpour Arabi, H. et al. (2025) 'Enhancing food supply chain sustainability: exploring the role of IoT enablers and sustainable development goals', *Sustainable Futures*, 10, p. 100979. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.SFTR.2025.100979>.
- Sheikh, R. and Senfi, S. (2025) 'Evaluation of Sustainable Performance of Industry 4.0 Technologies Using a Novel Fuzzy OPLO-POCOD Method', *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2025(1), p. 5821453. Available at: <https://doi.org/10.1155/ACIS/5821453>.
- Sohrabi, R. et al. (2021) 'Applying Sustainable Development to Economic Challenges of Small and Medium Enterprises after Implementation of Targeted Subsidies in Iran', *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/2270983>.

- Taleghani, M. and Sola, M.J. (2025) 'A study of the impact of international sanctions on Iran's oil industry: From a supply chain perspective', *International Journal of Materials Science*, 6(2), pp. 105–107. Available at: <https://doi.org/10.22271/27078221.2025.V6.I2B.87>.
- Yang, D. et al. (2018) 'Constraint-adaptation challenges and resilience transitions of the industry–environmental system in a resource-dependent city', *Resources, Conservation and Recycling*, 134, pp. 196–205. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.03.016>.
- Yousefi, D. et al. (2024) 'Key Success Factors to Implement IoT in the Food Supply Chain', *Journal of Information Technology Management*, 16(3), pp. 61–91. Available at: <https://doi.org/10.22059/JITM.2024.372404.3618>.
- Zali, N. et al. (2024) 'Digital Twins for Smarter Iranian Cities: A Future Studies Perspective', *Computational Urban Science* 2024 4:1, 4(1), pp. 43-. Available at: <https://doi.org/10.1007/S43762-024-00155-9>.