

Analysis of Barriers to Achieving Construction 4.0 Using the Interpretive Structural Modeling Approach

Kasra Rahbaripour¹, Mohammadreza Pakdelfard^{2,*}, Hassan Sattari Sarbangholi³, Nima Valizadeh⁴

¹ Ph.D. Student, Department of Architecture, Ta.C, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

² Associate Professor, Department of Architecture, Ta.C, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

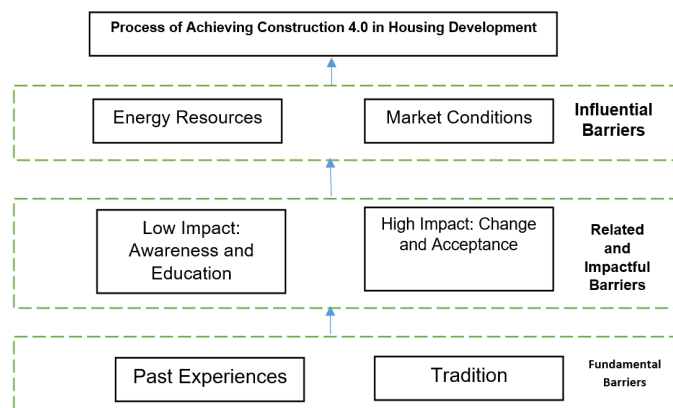
³ Associate Professor, Department of Architecture and Urban Planning, Ta.C, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Architecture, Ta.C, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

HIGHLIGHTS

- The barriers to achieving Construction 4.0 were categorized into 7 hierarchical levels.
- "Market conditions and energy resources" are the most significant influential barriers, and "tradition and past experiences" are the most essential foundational barriers.
- The barriers of "change and acceptance" and "awareness and education" are deemed critical due to their high dependency and extensive influence on the system.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 21 July 2025

Revised: 15 August 2025

Accepted: 23 August 2025

Available online: 23 August 2025

*Correspondence:

m.pakdelfard@srbiau.ac.ir

How to cite this article:

Rahbaripour, K., Pakdelfard, M., & Sarbangholi, H. S., Valizadeh, N. (2026). Analysis of barriers to achieving construction 4.0 using the interpretive structural modeling approach. *System Engineering and Productivity*, 6 (1), 1-37.

Keywords:

Industry 4.0

Construction 4.0

Fourth Industrial Revolution

Structural-Interpretive Modeling

Housing Construction

Housing Development

ABSTRACT

This study aims to identify and hierarchize barriers to adopting Construction 4.0 in Iran's housing development sector from an innovation perspective, employing an Interpretive Structural Modeling (ISM) approach. To evaluate the influence and dependency of these barriers, insights from 10 experts, selected via purposive snowball sampling, were collected. Data were gathered through a pairwise comparison questionnaire, with the highest level of expert consensus determining the decision-making criterion. The barriers to implementing Construction 4.0 in housing development were classified into seven hierarchical levels, where lower levels represent foundational barriers and higher levels denote influential barriers. Market conditions and energy resources emerged as highly influential barriers, while tradition and past experiences were identified as foundational barriers. Analysis of dependency strength and driving power revealed that "change and acceptance" and "awareness and education" exhibited significant influence and dependency, whereas "innovation and utilization" and "energy" demonstrated comparatively lower impact.

1. Introduction

The Fourth Industrial Revolution, through the integration of digital, cyber-physical, and intelligent technologies, has introduced a fundamental transformation in industry and production. It is built upon technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), advanced robotics, big data, and 3D printing, aiming to establish intelligent and interconnected production networks. Unlike previous revolutions that primarily relied on power and automation, Industry 4.0 emphasizes dynamic interaction among machines, data, and humans, thereby shifting industries toward flexible, predictive, and customized production. Its penetration into the construction sector highlights the necessity of redefining processes, project management, and organizational structures, leading to the emergence of "Construction 4.0."

Construction 4.0, as a reflection of this new paradigm, focuses on automation, digitalization, robotics, and sensor-based monitoring of processes. This approach responds to the long-standing challenges of the construction industry, such as resistance to change, lack of process integration, and relatively low productivity compared with manufacturing sectors. The adoption of tools such as Building Information Modeling (BIM), Lean Construction, and Integrated Project Delivery (IPD) can help overcome these barriers. At the same time, Construction 4.0 addresses the growing demand for customized and sustainable projects while contributing to carbon footprint reduction through technologies such as 3D printing, big data analytics, virtual reality, and IoT.

Beyond its advantages—including higher productivity, greater design accuracy, resource optimization, reduced project duration, and enhanced safety—this transformation also entails challenges, including high initial investment costs, workforce training requirements, data security risks, and the traditional resistance of industry stakeholders. Nevertheless, targeted investment and strategic management can generate long-term benefits for the construction sector. Given the central role of housing in national economies and the persistent challenges facing urban settlements, achieving Construction 4.0 in the housing sector of Iran emerges as an essential necessity. Accordingly, this study seeks to explore, through Interpretive Structural Modeling (ISM), the importance, hierarchical levels, and structural interrelations of barriers to the adoption of this transformation from the perspective of experts (Bahrami et al., 2025; Eghbal et al., 2025; Ershadi et al., 2024; Khalili et al., 2025; Rahbaripour et al., 2025).

2. Methodology

This study seeks to analyze and hierarchically structure the barriers to achieving Construction 4.0 in the development of housing in Iran, extending a

prior study that identified these barriers. To achieve the research objectives, the Interpretive Structural Modeling (ISM) methodology was employed, a systematic and interactive approach designed to dissect complex interrelationships among system elements. By breaking down multifaceted issues into manageable components, ISM facilitates a deeper understanding of inter-variable dynamics and enables the construction of a hierarchical framework to represent these relationships. The ISM process in this research encompassed the following stages:

First, to establish the contextual relationships among barriers previously identified through qualitative content analysis—published in a separate article—pairwise comparisons were conducted with the participation of 10 expert specialists selected via purposive snowball sampling. These experts, drawn from domains including construction, advanced technologies, housing policy, and project management, were identified through professional networks, academic institutions, and relevant organizations. Invitations were extended via email, telephone, or in-person meetings, with meticulous coordination to ensure effective engagement. Pairwise comparison questionnaires, accompanied by comprehensive written instructions, were provided to the experts to ensure accuracy and consistency in responses.

Next, the results of the pairwise comparisons were recorded in a Structural Self-Interaction Matrix (SSIM), which captured inter-barrier relationships using standard notations: V (barrier *i* influences *j*), A (barrier *i* is influenced by *j*), X (bidirectional influence), and O (no relationship). The SSIM was subsequently converted into an initial reachability matrix with binary values (0 and 1). By applying transitivity rules—where if barrier *X* influences *Y* and *Y* influences *Z*, then *X* influences *Z*—the final reachability matrix was developed, delineating the driving power (the number of barriers a given barrier influences) and dependence (the number of barriers influencing a given barrier) for each barrier. Hierarchical structuring was achieved through reachability and antecedent sets, organizing barriers into levels from the most dependent (Level 1) to the most driving (Level 7). This process distinguished foundational barriers, which exert indirect but profound impacts, from operational barriers, which have direct but dependent effects.

Finally, the ISM model was graphically rendered to visually depict the relationships and hierarchy of barriers. Additionally, a MICMAC (Cross-Impact Matrix Multiplication Applied to Classification) analysis was performed to categorize barriers into four groups: autonomous (low dependence and driving power), dependent (high dependence, low driving power), independent (high driving power, low dependence), and linkage (high dependence and driving power). Through graphical representation based on influence and dependence, this analysis provided a precise assessment of each barrier's role

within the system, identifying leverage points for strategic interventions. The absence of autonomous barriers underscored the high complexity and interconnectedness of the barrier system.

This multi-stage process, integrating qualitative methods (qualitative content analysis and pairwise comparisons) with quantitative techniques (binary matrices and MICMAC analysis), enabled a comprehensive and nuanced exploration of inter-barrier relationships. The methodology not only elucidated the hierarchical structure of barriers but also established a foundation for devising targeted strategies to address them. By systematically modeling the complex interactions among barriers, the study identified priority areas for intervention to achieve Construction 4.0 in Iran's housing development.

3. Results and Discussion

Employing the ISM methodology, barriers were organized into seven hierarchical levels, with lower levels representing more foundational barriers and higher levels indicating more operational ones. At Level 1, the most dependent level, two critical barriers- "market conditions" and "energy resources"-were identified. Due to their infrastructural nature, these barriers exert a pervasive influence across the system. Unstable market conditions, characterized by price volatility and demand unpredictability, render investments in advanced technologies, such as the Internet of Things (IoT) and artificial intelligence, highly risky, thereby stifling innovation incentives within construction firms. Similarly, limited access to reliable energy resources, compounded by inefficient distribution networks and reliance on unsustainable sources like fossil fuels, constrains the implementation of smart systems and automation, raising concerns about technological dependability. These foundational barriers reinforce resistance to change and technology adoption, directly impacting barriers at Level 2.

Level 2 includes barriers such as "change and adoption," "innovation and exploitation," "standards," and "technology." Market instability and energy limitations hinder the adoption of new technologies, confining innovation to short-term, low-risk solutions. The absence of unified standards (e.g., for energy efficiency or digital security) further complicates technology implementation, posing technical and regulatory challenges. For instance, without standardized protocols, integrating smart systems into housing projects becomes impractical or excessively costly. Level 3 comprises barriers such as "synergy," "development," "research investment," "supportive measures," "collaboration," "execution," and "data and information," which are directly influenced by lower-level barriers. For example, the lack of common standards and energy constraints disrupts synergy among systems (e.g., integration of design and project management software) and

diminishes research and development investment, while poor stakeholder collaboration (government, industry, and academia) renders execution processes inefficient.

Level 4 encompasses barriers such as "awareness and education," "executive management," "structural issues," "information dissemination," and "conflicts and interferences." Limited public awareness and effective training programs stem from constraints in research and information availability at lower levels, fostering workforce resistance to new technologies. Organizational conflicts (e.g., overlapping responsibilities between public and private entities) and managerial inefficiencies arise from inadequate coordination at lower levels, undermining system performance. Level 5 includes barriers such as "inequality," "risk and instability," "financing," "formulation and updating," and "support," reflecting the cumulative effects of lower-level barriers. Inequality in resource distribution (e.g., unequal access of small firms to technology) and heightened economic instability exacerbate challenges in financing technological projects and delay policy updates.

Level 6 includes "policy-making and planning," "resources," and "institutional support," influenced by financial constraints, inequalities, and instabilities. Ineffective policymaking, for instance, results from a shortage of specialized human resources and weak institutional support. Finally, Level 7, the most driving level, comprises "tradition" and "past experiences," which, as foundational barriers, reinforce entrenched resistance to change and perpetuate the cultural impact of unsuccessful past initiatives. The MICMAC analysis revealed that barriers such as "change and adoption" and "awareness and education" are pivotal due to their high dependence and driving power, acting as linkage barriers where minor interventions can yield significant systemic effects. Conversely, barriers like "innovation and exploitation" and "energy" are primarily dependent, with limited driving power, while "tradition" and "past experiences" are independent, exhibiting high driving power but low dependence. These barriers can both impede change and serve as potential sources of innovation (e.g., integrating traditional Iranian architecture with modern technology). The absence of autonomous barriers highlights the system's intricate interconnectedness.

The ISM analysis demonstrated that barriers to achieving Construction 4.0 in Iran's housing development form a complex, multilayered, and systemic structure, with causal relationships flowing from foundational to operational levels. Level 1 barriers (market and energy) exert broad influence as infrastructural foundations, necessitating immediate attention to establish a stable environment. For instance, stabilizing the market through transparent pricing mechanisms and demand forecasting can mitigate investment risks,

while ensuring reliable energy access (e.g., through renewable energy investments) enhances the feasibility of smart systems. These barriers are not only technical but also economic and environmental, and neglecting them perpetuates a cycle of resistance and inefficiency.

Level 2 and 3 barriers, such as innovation, synergy, and research investment, underscore the need to strengthen technical and collaborative capacities. The lack of unified standards and technological challenges stifles innovation and disrupts stakeholder synergy. Establishing national standards for construction technologies (e.g., BIM and IoT) and investing in collaborative research centers can address these barriers. Mid-level barriers (Levels 4 and 5), such as awareness, executive management, and inequality, reflect the cumulative impact of lower-level challenges, emphasizing human and organizational dimensions. Insufficient training fuels workforce resistance, while inequality (e.g., unequal access of small firms to resources) threatens digital equity. Proposed interventions include comprehensive training programs (e.g., online workshops for engineers) and support funds for small firms to mitigate these barriers.

Higher-level barriers (Levels 6 and 7), such as policymaking and tradition, highlight the need for long-term cultural and policy reforms. Ineffective policymaking stems from instability, while past experiences can serve as both barriers (cultural resistance) and opportunities (integrating traditional Iranian architecture with modern technology). The MICMAC analysis emphasizes that linkage barriers, such as change and adoption, are critical system nodes, and interventions targeting them can generate cascading effects. A three-stage roadmap is proposed: in the short term, stabilizing foundational infrastructure (market and energy) through supportive government policies and green energy investments; in the medium term, strengthening mid-level capacities like education and executive management through research and development centers, digital information systems, and collaborative networks; and in the long term, integrating policies, establishing innovation support funds, and blending tradition with advanced technologies (e.g., smart hybrid architecture using AI). These strategies, supported by integrated monitoring systems (e.g., managerial dashboards) and smart construction pilot centers, enable the adoption of advanced technologies like IoT, AI, and 3D printing, reducing housing construction timelines.

This analysis not only elucidates the complexity of barriers but also provides a comprehensive and actionable roadmap for transforming Iran's housing construction industry. By focusing on systemic relationships, it facilitates the achievement of Construction 4.0 objectives. Ultimately, the success of this transformation depends on coordinated collaboration among government, industry, and

society to transform cultural and economic challenges into developmental opportunities.

4. Conclusions

The ISM-based analysis of barriers to achieving Construction 4.0 in Iran's housing construction reveals a complex, multilayered structure, encompassing foundational elements like market conditions and energy resources to cultural factors such as tradition and past experiences. Prioritizing key barriers like "change and adoption" and "awareness and education" is critical due to their high dependence and extensive systemic impact. However, success requires addressing infrastructural barriers, such as market instability and energy challenges, alongside managing cultural influences at higher levels. This complexity underscores the need for a holistic and coordinated approach that simultaneously enhances infrastructure, fosters collaboration, and elevates public awareness.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

Kasra Rahbaripour: Conceptual research model, literature review and theoretical background, data analysis, statistical analysis draft, Drafting the manuscript, preliminary review of the report, and research methodology development, and Text revision; **Mohammadreza Pakdelfard:** Supervision and Text Revision; **Hassan Sattari Sarbangholi:** Supervision and Text Revision; **Nima Valizadeh:** Supervision and Text Revision.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

- Bahrami, M. R., Hashemzadeh, G. R., Shahmansoury, A., & Fathi Hafshejani, K. (2025). Analyzing effective components in industry 4.0 maturity for Iranian banking. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 21-50. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2047848.1246>
- Eghbal, F., Ehsanifar, M., Mirhosseini, M., & Mazaheri, H. (2025). Identification and modeling of key factors significant to the financial performance of Iranian construction companies. *System Engineering and Productivity*, 4(4), 77-94.

<https://doi.org/10.22034/msb.2024.2034092.1>
218

Ershadi, M. J., Kianmehr, N., Nabatchian, M., Dinmohammadi, L. (2024). Designing a Productivity assessment model to identify and prioritize influential factors and examine obstacles facing Iranian research organizations. *System Engineering and Productivity*. 4(2), 31-46. <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2019692.11>
71

Khalili, S., Saeedi, F., Yousefi, S., & Zandpourasl, M. (2025). Investigating the impact of the "attitude and mindset" component on the success of project managers in the Iranian construction industry. *System Engineering and Productivity*. 5(1), 1-19. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2046688.12>
37

Rahbaripour, K., Pakdelfard, M., Sattari Sarbangholi, H., & Valizadeh, N. (2025). Construction 4.0 barriers in housing development in Iran. *System Engineering and Productivity*, 1-43. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2060254.13>
20

تحلیل موانع دستیابی به صنعت ساخت چهارم با رویکرد مدل‌سازی ساختاری-تفسیری

کسری رهبری پور^۱، محمدرضا پاکدل فرد^۲، حسن ستاری ساربانقلی^۳، نیما ولی‌زاده^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

^۲ دانشیار، گروه معماری، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

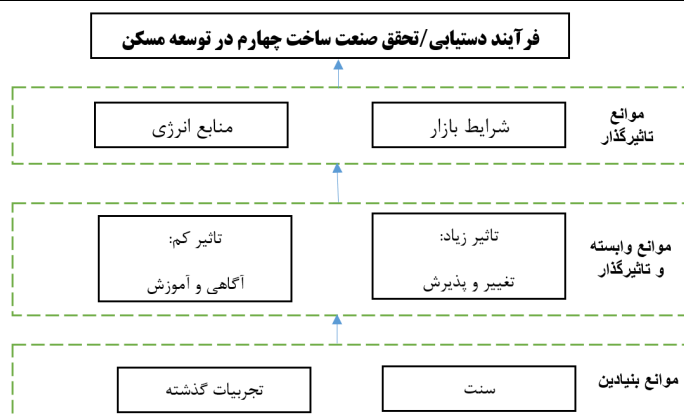
^۳ دانشیار، گروه معماری و شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

^۴ استادیار، گروه معماری، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

برجسته‌ها

- موانع دستیابی به صنعت ساخت چهارم در ۷ سطح طبقه‌بندی شد.
- «شرایط بازار و منابع انرژی» مهم‌ترین موانع تأثیرگذار و «سنت و تجربیات گذشته» اساسی‌ترین موانع مبنایی هستند.
- موانع «تغییر و پذیرش» و «آگاهی و آموزش»، به دلیل وابستگی بالا و تأثیر گسترده‌شان بر سیستم، حیاتی تلقی می‌شود.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

*نویسنده مسئول:

m.pakdelfard@srbiau.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

صنعت چهارم
صنعت ساخت چهارم
انقلاب صنعتی چهارم
مدل‌سازی ساختاری-تفسیری
ساخت مسکن
توسعه مسکن

چکیده

هدف این تحقیق تحلیل و سطح‌بندی موانع صنعت ساخت چهارم از موضع نوآورانه در توسعه مسکن ایران با رویکرد مدل‌سازی ساختاری-تفسیری است. در این روند برای تعیین میزان اثرگذاری و اثرپذیری موانع از نظرات ۱۰ کارشناس که به روش نمونه‌گیری هدفمند از نوع گلوله برفی انتخاب‌شده بودند، استفاده شد. گردآوری اطلاعات با کمک پرسشنامه مقایسه زوجی و بیشترین توافق خبرگان در مورد هرکدام از مقایسه‌ها به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری واقع شد. موانع دستیابی به صنعت چهارم در ساخت مسکن در ۷ سطح دسته‌بندی شدند که سطوح پایین‌تر، بیانگر موانع مبنایی و سطوح بالاتر، موانع تأثیرگذار را نشان می‌دهند. شرایط بازار و منابع انرژی به‌عنوان موانع تأثیرگذار و موانع سنت و تجربیات گذشته به‌عنوان موانع مبنایی شناسایی شدند. بر اساس تحلیل قدرت وابستگی و محرک، موانع «تغییر و پذیرش» و «آگاهی و آموزش» تأثیر و وابستگی زیادی دارند، درحالی‌که موانع «نوآوری و بهره‌برداری» و «انرژی» تأثیر کمتری از خود نشان می‌دهند.

۱- مقدمه

چالش‌ها است (Zhang et al., 2023؛ Baduge et al., 2022). این رویکرد همچنین به نیازهای فزاینده برای محصولات سفارشی و پایدار و کاهش ردپای کربن پاسخ می‌دهد. فناوری‌های کلیدی شامل پرینت سه‌بعدی، داده‌های بزرگ واقعیت مجازی و اینترنت اشیا هستند؛ بنابراین، پذیرش این رویکرد به‌عنوان یک استراتژی ملی و صنعتی، برای رقابت‌پذیری، پایداری و پاسخگویی به نیازهای شهرهای آینده حیاتی است.

صنعت ساخت چهارم مزایای متعددی مانند افزایش بهره‌وری، بهبود دقت طراحی و ساخت، بهینه‌سازی مصرف منابع، کوتاه شدن زمان اجرای پروژه‌ها و ارتقای ایمنی به همراه دارد. همچنین، موجب افزایش شفافیت، کاهش خطاهای انسانی و امکان ردیابی بلادرنگ فرآیندهای اجرایی می‌شود. در مقابل، معایبی نیز وجود دارند؛ از جمله هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری برای فناوری‌های نوین، نیاز به آموزش نیروی انسانی، چالش‌های فنی در یکپارچه‌سازی سامانه‌ها و مخاطرات مربوط به امنیت داده‌ها و حریم خصوصی. همچنین، مقاومت سنتی فعالان صنعت نسبت به تغییر و کمبود زیرساخت‌های مناسب، می‌تواند مانعی برای پذیرش گسترده این تکنولوژی‌ها باشد (Wang & Wang, 2025؛ Singh et al., 2023؛ Zhang et al., 2023؛ Shafei et al., 2025). با این وجود، مدیریت هوشمندانه این چالش‌ها و سرمایه‌گذاری هدفمند، منافع بلندمدتی را برای صنعت ساخت به همراه خواهد داشت. همان‌طور که بخش صنعت ساخت مسکن نقشی اساسی در اقتصاد هر کشور دارد؛ چالش‌های مختلف در سکونتگاه‌های شهری، دستیابی به صنعت چهارم در حوزه توسعه مسکن در ایران یک ضرورت است. در این راستا سؤال این تحقیق عبارت است از اینکه بنا بر مدل‌سازی تفسیری-ساختاری اهمیت، سطوح موانع و روابط ساختاری آن‌ها، از نظر خبرگان و مطلعان کلیدی چگونه است؟

۲- پیشینه تحقیق

تورنرو همکاران (Turner et al., 2021) در پژوهش خود به بررسی ابعاد مختلف به‌کارگیری صنعت چهارم در پروژه‌های ساختمانی پرداخته و با تمرکز بر چالش‌ها و

انقلاب صنعتی چهارم (Industry 4.0) به‌عنوان تحولی بنیادین در حوزه تولید و صنعت، با ادغام فناوری‌های دیجیتال، سایبرفیزیکال و هوشمند شکل گرفت (Aigbavboa & Kissi, 2025). این انقلاب بر پایه فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی (AI)، رباتیک پیشرفته، کلان داده (Big Data)، چاپ سه‌بعدی و دستگاه‌های خودگردان استوار است و به دنبال ایجاد شبکه‌های تولیدی هوشمند و یکپارچه است (Taqi et al., 2025؛ Bahrami et al., 2025؛ Khan؛ Harikannan et al., 2025؛ Shahzad et al., 2024؛ et al., 2024). برخلاف انقلاب‌های قبلی که بر نیرو و اتوماسیون تکیه داشتند، صنعت چهارم بر ارتباط پویا بین ماشین‌ها، داده‌ها و انسان‌ها تأکید دارد. این تحول، قابلیت تغییر ساختار صنایع سنتی را دارد و به سمت تولید انعطاف‌پذیر، پیش‌بیننده و شخصی‌سازی‌شده حرکت می‌کند. ورود این موج تحولی به بخش‌های مختلف اقتصادی، از جمله ساخت‌وساز، ضرورت بازتعریف فرآیندها، مدیریت پروژه‌ها و ساختار سازمانی را بیش‌ازپیش آشکار کرده است (Zhang et al., 2023؛ Di Nardo et al., 2025؛ Júnior et al., 2025). در حوزه ساخت‌وساز، این انقلاب به صنعت ساخت چهارم (Construction 4.0) منجر شده که فناوری‌های هوشمند را برای بهبود بهره‌وری و پایداری پروژه‌ها به کار می‌گیرد (Siriwardhana & Moehler, 2024؛ Abdul-Samad et al., 2024).

صنعت ساخت چهارم، پاسخی به پارادایم صنعت چهارم است و بر همگرایی گرایش‌ها و فناوری‌هایی تأکید دارد که شیوه طراحی، ساخت و بهره‌برداری از دارایی‌های محیط ساخته‌شده را متحول می‌کنند (Talbi & Souad, 2022؛ Zhang et al., 2023؛ Shafei et al., 2025). فلسفه آن بر اتوماسیون، پایش، حسگرگذاری، رباتیک سازی و دیجیتالی سازی فرآیندهای تولید و توزیع متمرکز است. این تغییر پارادایم به دلیل ویژگی‌های سنتی صنعت ساخت‌وساز، از جمله مقاومت بالا در برابر تغییر، عدم یکپارچگی فرآیندها و نرخ پایین بهره‌وری در مقایسه با صنایع تولیدی، ضروری است. صنعت ساخت چهارم با بهره‌گیری از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، اصول ناب (Lean Construction) و تحویل پروژه یکپارچه

بوتنو همکاران (Boton et al., 2021) با مروری نظام‌مند بر ادبیات مرتبط، پژوهش‌های ده سال گذشته در زمینه تحول دیجیتال در صنعت ساخت را بررسی کرده‌اند. این تحقیق با تحلیل ۲۴۴۴ مقاله علمی که از طریق انتخاب واژگان کلیدی نویسندگان گردآوری شده‌اند، نشان داده است که فناوری‌هایی مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و سایر فناوری‌های توانمندساز، سهم قابل‌توجهی در شکل‌گیری مسیر تحول دیجیتال در صنعت ساخت‌وساز دارند.

ساونیو همکاران (Sawhney et al., 2020) نیز در کتابی جامع تحت عنوان «صنعت ساخت چهارم: بستری نوآورانه برای محیط انسان‌ساخت» به تبیین چارچوبی توصیفی برای شناخت و توسعه این صنعت پرداخته‌اند. ساختار کتاب در سه بخش تنظیم شده است: بخش نخست به مرور کلی مفاهیم و اجزای صنعت ساخت چهارم و اکوسیستم دیجیتال اختصاص دارد؛ بخش دوم به مؤلفه‌های اصلی فناوری‌ها می‌پردازد و در بخش سوم، جنبه‌های اجرایی صنعت ساخت چهارم با تأکید بر مطالعات موردی، شرکت‌های نوپا و مسیرهای آینده بررسی شده است.

فورکیل و همکاران (Forcael et al., 2020) با هدف شناسایی روندهای کلیدی در ادبیات صنعت ساخت چهارم، به تحلیل مفاهیمی چون اینترنت اشیاء، طراحی رایانه‌ای، چاپ سه‌بعدی، داده‌های حجیم، هوش مصنوعی و رباتیک، واقعیت افزوده و مجازی و مواد نوین صنعتی پرداخته‌اند. به‌زعم این پژوهش، ریشه مفهومی صنعت ساخت چهارم به سال ۲۰۱۶ بازمی‌گردد و ظهور آن به‌عنوان شاخه‌ای مستقل در ادبیات صنعت، از سال ۲۰۱۴ آغاز شده است.

مسک یوریتو همکاران (Maskuriy et al., 2019) در مقاله‌ای با عنوان «آمادگی صنعت ساخت برای پذیرش صنعت چهارم» به ترسیم نقشه راه این صنعت در ساخت‌وساز پرداخته‌اند. آنان با تبیین سه خوشه فناوری، ایمنی و مدیریت، نقش مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) را به‌عنوان هسته دستگاه‌های فیزیکی-سایبری برجسته کرده‌اند. این سیستم‌ها می‌توانند فرآیند طراحی و ساخت را به‌صورت خودکار پیش ببرند و با یکپارچه‌سازی داده‌های ناهمگون، موجب ارتقای کارایی کل چرخه عمر پروژه شوند.

فرصت‌های موجود، برنامه‌ای پژوهشی برای پذیرش این فناوری در ساخت‌وساز تدوین کرده‌اند. آن‌ها چارچوبی تحقیقاتی ارائه داده‌اند که بر سه محور اصلی استوار است: بهره‌برداری نسل جدید از داده‌های حسگرهای سایت، توسعه مدل پلتفرم‌های مشترک و تحلیل داده‌ها به همراه پردازش ویدئو و صدا در قالب همزادهای دیجیتال.

در مقاله‌ای با عنوان «چارچوبی روش‌شناسانه-فناورانه برای صنعت ساخت چهارم»، ضمن شناسایی مزایای صنعت ساخت چهارم، به واکاوی ویژگی‌های موردنیاز جهت انطباق صنعت ساخت با مقتضیات صنعت چهارم پرداخته‌اند (Muñoz-La Rivera et al., 2021). این پژوهش پس از تدوین چارچوب مذکور، چالش‌ها و پیچیدگی‌های مرتبط با اجرای صنعت چهارم را تحلیل کرده است. بر اساس نتایج حاصل، چارچوب پیشنهادی آنان اصول صنعت چهارم را در حوزه‌های مرتبط با صنعت AECO پیاده‌سازی می‌کند. این چارچوب، فرآیندها، فناوری‌ها و محصولات را در بسترهایی چون مدیریت ناب، تحویل یکپارچه پروژه (IPD) و مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) به هم پیوند می‌زند و با در نظر گرفتن قابلیت‌های شبکه‌سازی عمودی، یکپارچگی افقی، مهندسی همگرا و فناوری‌های نامایی، چرخه عمر پروژه‌های ساخت را پوشش می‌دهد. اجزای مختلف پروژه نیز در چهار حوزه فیزیکی/اتوماسیون، شبیه‌سازی و مدل‌سازی، دیجیتال‌سازی و مجازی‌سازی طبقه‌بندی شده‌اند.

یو و فنگ (You & Feng, 2020) نیز در مقاله‌ای به تحلیل نحوه ادغام صنعت چهارم با فناوری‌های رایج در صنعت ساختمان پرداخته و چارچوبی مفهومی بر پایه دستگاه‌های فیزیکی-سایبری ارائه داده‌اند. این مقاله با مقایسه‌ای افقی میان صنایع مختلف، تلاش دارد چشم‌اندازهای نوآورانه‌ای برای تحقیقات آینده در حوزه ساخت‌وساز هوشمند ترسیم کند. یکی از محورهای مهم مقاله، ادغام عمیق فناوری‌های صنعت چهارم در فرآیندهای تولید و مدیریت در صنعت ساختمان است. چارچوب پیشنهادی در این مقاله، همزاد دیجیتال ساختمان در حال ساخت را با نظارت لحظه‌ای و شبیه‌سازی زمان واقعی همراه کرده و ساختار تصمیم‌گیری داده‌محور را در دل معماری سیستم قرار داده است.

ساخت چهارم بحث می‌کند. بر اساس یافته‌های این تحقیق، صنعت ساخت‌وساز برای پاسخگویی به جهانی که سریعاً در حال تغییر است، باید نوآوری فناوری را در پیش بگیرد. انقلاب دیجیتال و کمبود نیروی کار ماهر در ساخت‌وساز دو موضوع مهم تسریع‌کننده این تحول هستند. گسترش سریع فناوری‌های پیشرفته، مانند IOT (Internet of Things)، BIM و سایر سیستم‌ها و صنایع دیجیتالی و در نهایت صنعت ساخت چهارم، قدرت می‌بخشد که نویدبخش افزایش بهره‌وری ساخت، کیفیت، هزینه و کارایی منابع می‌باشد.

رهبری پور و همکاران (Rahbaripour et al., 2025) در مقاله‌ای با عنوان «موانع صنعت ساخت چهارم در توسعه مسکن ایران» به شناسایی موانع با رویکرد تحلیل محتوای کیفی عرفی پرداخته است. بنا بر نتایج این تحقیق، موانع شامل «اجتماعی-فرهنگی»، «اقتصادی»، «نهادی-اداری»، «قانونی-مقرراتی» و «زیرساختی (نرم‌افزاری و سخت‌افزاری)» هستند. با وجود غنای نسبی مطالعات انجام‌شده در حوزه صنعت ساخت چهارم، بررسی انتقادی آن‌ها نشان می‌دهد که چند محدودیت اساسی وجود دارد. نخست آن‌ها که بیشتر پژوهش‌ها ماهیتی توصیفی یا مفهومی داشته و اغلب به ارائه چارچوب‌های کلی، مرور نظام‌مند یا تحلیل روندها بسنده کرده‌اند (مانند تحقیقات Boton et al., 2021؛ Forcael et al., 2020). در نتیجه، کمتر شاهد مطالعاتی هستیم که به‌طور تجربی و بومی موانع و چالش‌های اجرایی صنعت ساخت چهارم را در محیط‌های خاص، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، واکاوی کرده باشند. دوم آن‌ها که بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌ها بیشتر بر ظرفیت‌های فناورانه (نظیر BIM، اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و همزادهای دیجیتال) تمرکز داشته و به ابعاد نهادی، اجتماعی-فرهنگی و قانونی که نقش تعیین‌کننده‌ای در پیاده‌سازی واقعی این فناوری‌ها دارند، توجه کمتری نشان داده‌اند (Alaloul et al., 2018؛ Begić & Galić, 2021). سوم آن‌ها که اکثر مطالعات، رابطه میان موانع مختلف را به‌صورت منفرد و خطی تحلیل کرده‌اند، در حالی که موانع صنعت ساخت چهارم ماهیتی پیچیده، سلسله‌مراتبی و متقابل دارند و نیازمند رویکردهای تحلیلی چندلایه مانند مدل‌سازی ساختاری-تفسیری هستند. چهارم، ادبیات پیشین غالباً در سطح بین‌المللی توسعه‌یافته و کمتر به شرایط خاص ایران و

الول و همکاران (Alaloul et al., 2018) در مقاله‌ای با عنوان «انقلاب صنعتی چهارم در صنعت ساختمان: چالش‌ها و فرصت‌های ذینفعان» با هدف شناسایی چالش‌های به‌کارگیری تکنولوژی‌های نوین در صنعت ساخت‌وساز، فرصت‌های پیش روی در بلندمدت و عوامل مؤثر بر اجرای موفقیت‌آمیز صنعت ساخت چهارم است. فاکتورهای سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، فناورانه، محیط‌زیستی، قوانین و مقرراتی و امنیتی، به‌عنوان چالش‌ها و فرصت‌ها برای ذینفعان در این تحقیق شناسایی شده است.

جززارو همکاران (El Jazzar et al., 2021) در پژوهشی با تمرکز بر تحول دیجیتال در ساخت‌وساز، اجرای موفق صنعت ساخت چهارم را منوط به ادغام نه فناوری اصلی از جمله BIM، واقعیت مجازی و افزوده، رباتیک، چاپ سه‌بعدی، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، کلان‌داده‌ها و دیگر فناوری‌های نوین دانسته‌اند. تحلیل موردی آنان از دستگاه‌های HVAC نشان می‌دهد که پیوند BIM و واقعیت افزوده دقت بازرسی‌ها را تا ۴۰ درصد افزایش و خطاهای اجرایی را به‌طور میانگین ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد برای بهره‌برداری کامل از پتانسیل صنعت چهارم، تحولاتی در سه سطح بازمهندسی فرآیندهای سنتی، آموزش نیروی انسانی و توسعه استانداردهای امنیت داده ضروری است.

بیگیچ و گالیچ (Begić & Galić, 2021) نیز در تحقیقی با تمرکز بر فرضیه BIM 4.0، به بررسی جامع نتایج حاصل از پیاده‌سازی فناوری‌های دیجیتال در صنعت ساخت‌وساز پرداخته‌اند. طبق نتایج حاصل از تحلیل داده‌های ۴۵ پروژه در ۱۵ کشور، فناوری‌هایی نظیر BIM، اینترنت اشیا، رباتیک و هوش مصنوعی می‌توانند تا ۵۰ درصد بهره‌وری را افزایش دهند، اما موانعی چون هزینه‌های اولیه بالا، نیاز به آموزش گسترده و مقاومت ساختاری سازمان‌ها، سرعت پذیرش این فناوری‌ها را کاهش می‌دهد. کراویرو و همکاران (Craveiro et al., 2019) در مقاله‌ای با عنوان «تولید افزودنی به‌عنوان یک فناوری امکان‌پذیر برای ساخت دیجیتال: چشم‌انداز صنعت ساخت چهارم» به بررسی تحولات فناورانه در صنعت ساخت پرداخته است. این مقاله در مورد تحول دیجیتال بخش ساخت‌وساز، به‌ویژه پتانسیل تولید افزودنی برای ساخت‌وساز ساختمان به‌عنوان یک فناوری اصلی صنعت

بسازد که روابط میان عناصر درگیر در یک مسئله خاص را نمایان کند (Asif et al., 2023; Dos Santos et al., 2025). این نمایش سلسله مراتبی به درک روابط مستقیم و غیرمستقیم کمک کرده و به فهم پیامدهای گسترده‌تر این تعاملات یاری می‌رساند. فرآیند این رویکرد معمولاً شامل چندین مرحله است، از جمله شناسایی عناصر، تعیین روابط زمینه‌ای، توسعه یک ماتریس ساختاری و درنهایت، ایجاد یک گراف یا مدل جهت‌دار که روابط را به تصویر می‌کشد (Kazançoğlu et al., 2024).

الف) شناسایی عناصر

اولین گام شامل شناسایی عناصر یا موانع مربوطه است که در تحقیق حاضر این گام از طریق روش تحلیل محتوای کیفی انجام شده که توضیحات مربوط به آن در بخش اول، ارائه شد.

ب) تعیین روابط زمینه‌ای

در این گام متخصصان با استفاده از یک پرسشنامه و به‌صورت مقایسه زوجی مؤلفه‌های شناسایی شده را با یکدیگر مقایسه و تأثیرگذاری یا تأثیرپذیری آن‌ها را ارزیابی کردند (Sushil, 2017). ابتدا بر اساس اهداف پژوهش و با استفاده از شبکه‌های حرفه‌ای، دانشگاه‌ها و سازمان‌های مرتبط، ۱۰ کارشناس با توانمندی‌های مرتبط و با نمونه‌گیری هدفمند گلوله برفی شناسایی شدند (Sarvari et al., 2024) (جدول ۱).

روش‌های هدفمند دیگر (مانند نمونه‌گیری قضاوتی) ممکن است به سوءگیری‌های پژوهشگر وابسته باشند، اما گلوله برفی از شبکه‌های اجتماعی خود مشارکت‌کنندگان بهره می‌برد و وابستگی به قضاوت پژوهشگر را کاهش می‌دهد (Noy, 2008). همچنین در این روش مشارکت‌کنندگان اولیه سایر مطلعان کلیدی را معرفی می‌کنند که این امر معمولاً به دلیل وجود رابطه اعتماد بین آن‌ها، مشارکت را تسهیل می‌کند (Biernacki, P., & Waldorf, 1981).

کارشناسان از طریق ایمیل، تماس تلفنی، یا ملاقات حضوری دعوت به مشارکت در مصاحبه شدند. بیشترین توافق خبرگان در مورد هر کدام از مقایسه‌ها به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری در نظر گرفته شد. در دعوت‌نامه، توضیحی مختصر درباره اهداف و نقش هر فرد در تحقیق ارائه شد.

موانع بومی (مانند محدودیت‌های نهادی، مقرراتی یا زیرساختی) پرداخته است؛ تنها پژوهش رهبری‌پور و همکاران (Rahbaripour et al., 2025) است که با رویکرد کیفی بخشی از این خلأ را پوشش داده، اما همچنان فاقد تحلیل روابط میان موانع است؛ بنابراین، می‌توان گفت که جای خالی پژوهش حاضر در ترکیب سه بعد بومی‌سازی، تمرکز بر اهمیت موانع فراتر از فناوری و تحلیل ساختاری روابط میان موانع به‌خوبی در ادبیات احساس می‌شود.

۳- روش تحقیق

این تحقیق در ادامه تحقیق شناسایی موانع دستیابی به صنعت ساخت چهارم در توسعه مسکن انجام شده (Rahbaripour et al., 2025) و برای تحلیل اهمیت و سطح‌بندی موانع از رویکرد مدل‌سازی تفسیری-ساختاری بهره برده است.

۳-۱- بخش اول: شناسایی و صورت‌بندی موانع

برای شناسایی و صورت‌بندی موانع از رویکرد تحلیل محتوای کیفی عرفی یا قراردادی بهره گرفته شده که نتایج این بخش در مقاله‌ای مجزا که در همین نشریه به چاپ رسیده است (Rahbaripour et al., 2025).

۳-۲- بخش دوم: مدل‌سازی موانع

مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM) یک رویکرد سیستماتیک و تعاملی است که برای تحلیل و مدل‌سازی روابط پیچیده میان عناصر مختلف یک سیستم استفاده می‌شود. این رویکرد که توسط وارفیلد در سال ۱۹۷۴ توسعه یافته، هدفش تجزیه مسائل پیچیده به بخش‌های قابل مدیریت است و به محققان و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا درک کنند چگونه متغیرهای مختلف با یکدیگر تعامل دارند (Liu & Feng, 2025; Li et al., 2025; Warfield, 2007; Farinha et al., 2025). مزیت اصلی این رویکرد در توانایی آن برای نمایش روابط به‌صورت ساختاریافته است که ارتباط و همکاری بهتر میان ذینفعان را تسهیل می‌کند. این رویکرد با شناسایی عناصر مرتبط آغاز و سپس به تحلیل وابستگی‌های آن‌ها می‌پردازد. این روش‌شناسی شامل بینش‌های کیفی و اندازه‌گیری‌های کمی است تا یک ساختار سلسله مراتبی

اگر متغیر X به متغیر Y متصل باشد و متغیر Y به متغیر Z نیز متصل باشد، در این صورت متغیر X باید به متغیر Z نیز متصل شود. در جدول ۷ همچنین میزان قدرت وابستگی^۴ و قدرت محرک^۵ هر مؤلفه نیز نشان داده شده است؛ و «ه» و «و» بیانگر «همگرایی» و «وابستگی» هستند.

ث) سطح‌بندی^۶ مؤلفه‌ها

مرحله بعدی تقسیم عناصر به سطوح مختلف بر اساس دسترسی آن‌ها است. این کار به شناسایی ساختار سلسله مراتبی عناصر کمک می‌کند و آن‌ها را به گروه‌های محرک و وابسته دسته‌بندی می‌کند (Ansari et al., 2024). بعد از ایجاد ماتریس دسترسی، می‌توان تحلیل‌هایی انجام داد تا سطوح مختلف عناصر شناسایی شوند. این کار معمولاً از طریق تعیین دسترسی و سطح عناصر انجام می‌شود. هر عنصر با توجه به دسترسی‌اش به دیگر عناصر، شناسایی می‌شود. برای مثال، اگر یک عنصر بتواند به چند عنصر دیگر دسترسی داشته باشد، در سطح بالاتری قرار می‌گیرد. سطح هر عنصری معمولاً بر اساس تعداد روابطی که با سایر عناصر دارد، مشخص می‌شود. عناصر با تعداد بیشتری از وابستگی‌ها معمولاً در سطوح پایین‌تری قرار دارند، چراکه بیشتر تحت تأثیر سایر عناصر هستند.

در این مرحله، مجموعه‌ای از معیارهای پیش‌نیاز^۷ و دستیابی^۸ برای هر معیار محاسبه می‌شود و سپس عوامل مشترک شناسایی می‌شوند. در این گام، معیاری با بالاترین سطح ISM انتخاب می‌شود که مجموعه دستیابی آن با مجموعه مشترک^۹ برابر باشد. پس از شناسایی این متغیر یا متغیرها، سطر و ستون مربوط به آن‌ها از جدول حذف می‌شود و این فرآیند برای سایر معیارها تکرار می‌گردد (جدول ۳).

ج) تدوین مدل ISM

با استفاده از اطلاعات ماتریس خود تعاملی نهایی و سطح‌بندی مؤلفه‌ها، یک مدل ساختاری ساخته می‌شود. این مدل معمولاً گرافی است که روابط و سلسله‌مراتب

برای بالا بردن احتمال مشارکت کارشناسان، هماهنگی‌های لازم در مورد تاریخ، زمان و مکان تحویل پرسشنامه انجام گرفت (Ranjan Debata et al., 2013) و یک روز قبل از تحویل، یادآوری‌های لازم برای اطمینان از حضور کارشناسان در مکان مشخص انجام شد. با توجه به پیچیدگی نسبی پاسخگویی به سؤال‌ها در ابتدا توضیحات لازم در مورد نحوه پاسخگویی و همچنین این توضیحات که از قبل به صورت مکتوب آماده شده بود، تحویل کارشناسان گردید.

پ) تشکیل ماتریس خود تعاملی ساختاری^۱ (SSIM)

در این گام، نتایج حاصل از مقایسه زوجی مؤلفه‌ها توسط خبرگان در ماتریس خود تعاملی ساختاری تنظیم می‌شوند به این صورت که هر مقایسه با حروف V، A، X و O بر اساس تعاریف زیر نشان داده می‌شوند (Ansari et al., 2024):

V: عامل سطر باعث محقق شدن عامل ستون می‌شود.

A: عامل ستون باعث محقق شدن عامل سطر می‌شود.

X: هر دو عامل سطر و ستون باعث محقق شدن یکدیگر می‌شوند (عامل i و j رابطه دوطرفه دارند).

O: بین عامل سطر و ستون هیچ ارتباطی وجود ندارد (شکل ۱).

ت) تشکیل ماتریس دستیابی اولیه و نهایی^۲

در این گام با تبدیل نمادهای ماتریس SSIM به اعداد صفر و یک ماتریس دستیابی اولیه به دست می‌آید به این ترتیب که:

اگر نماد خانه ij حرف V باشد در آن خانه عدد ۱ و در خانه قرینه عدد صفر گذاشته می‌شود.

اگر نماد خانه ij حرف A باشد در آن خانه عدد صفر و در خانه قرینه عدد ۱ گذاشته می‌شود.

اگر نماد خانه ij حرف X باشد در آن خانه عدد ۱ و در خانه قرینه نیز عدد ۱ گذاشته می‌شود.

اگر نماد خانه ij حرف O باشد در آن خانه عدد صفر و در خانه قرینه نیز عدد صفر گذاشته می‌شود (جدول ۴).

ماتریس دستیابی نهایی (جدول ۷) از طریق تعیین اثرات انتقالی^۳ متغیرها حاصل می‌شود. اثرات انتقالی یعنی اینکه

⁴ Dependency power

⁵ Driving power

⁶ Level partition

⁷ Antecedent set

⁸ Reachability set

⁹ Intersection

¹ Structural self-interaction matrix SSIM

² Initial and final reachability matrix

³ Transitivity

پس از مفهوم‌سازی داده‌های تحقیق، تم‌های: «اجتماعی- فرهنگی»، «اقتصادی»، «نهادی-اداری»، «قانونی- مقرراتی» و «زیرساختی (نرم‌افزاری و سخت‌افزاری)» تبیین شد که در جدول ۴ مفهوم‌سازی شده است. نتایج این بخش، برای پرهیز از تکرار و مشابهت، در مقاله‌ای که در همین نشریه به چاپ رسیده است، به‌طور تفصیلی تشریح شده است (مراجعه شود به رهبری‌پور و همکاران، ۲۰۲۵) که این تحقیق نیز، ادامه و بسط آن کار است (Rahbaripour et al., 2025).

۴-۲- بخش دوم: مدل‌سازی تفسیری- ساختاری موانع

سؤال دوم: موانع دستیابی به صنعت چهارم در ساخت مسکن ایرانی در چه سطوحی دسته‌بندی می‌شوند؟ در جدول ۵ نتایج سطح‌بندی مؤلفه‌ها نشان داده شده است که در آن متغیرهای سطوح پایین‌تر متغیرهایی بنیادین و ریشه‌ای هستند که اگرچه ممکن است در تحقق صنعت چهارم نقش مستقیم کمتری داشته باشند اما از طریق ایجاد بسترها و زمینه‌های مناسب برای رشد متغیرهای سطوح بالاتر می‌توانند در تحقق این امر نقش بی‌بدیلی ایفا کنند.

در سطح بالایی (سطح ۱)، دو مؤلفه کلیدی C-8 (بازار) که نمایانگر شرایط بازار است و C-25 (انرژی) که منابع انرژی را نشان می‌دهد به‌عنوان نقاط نهایی اساسی برای صنعت عمل می‌کنند. این عناصر برای ایجاد یک محیط پایدار تحت تأثیر سایر عناصر قرار دارند و برای رسیدن به صنعت چهارم در بخش ساخت حیاتی هستند. با حرکت به سطح ۲، مؤلفه‌هایی مانند C-1 (تغییر و پذیرش) را می‌یابیم که بر اهمیت تغییر و پذیرش در معرفی تکنولوژی‌های جدید تأکید می‌کند و C-5 (نوآوری و بهره‌برداری) که ضرورت نوآوری و کاربرد عملی آن را مورد تأکید قرار می‌دهد. علاوه بر این، C-24 (استانداردها) و C-28 (تکنولوژیکی) نقش‌های کلیدی در تضمین کیفیت و ادغام پیشرفت‌های تکنولوژیک ایفا می‌کنند.

با حرکت به سطح ۳، پیچیدگی روابط افزایش می‌یابد، با مؤلفه‌هایی مانند C-6 (هم‌افزایی) و C-7 (توسعه) که نشان‌دهنده تأثیر عناصر بنیادی بر هم‌افزایی و ابتکارات توسعه هستند. در اینجا، C-9 (سرمایه‌گذاری در تحقیق) و

میان مؤلفه‌ها را به‌صورت بصری نمایش می‌دهد (Kumar & Goel, 2022). عناصر محرک (عناصر سطح بالا) در بالای نمودار و عناصر وابسته (عناصر سطح پایین) در پایین آن قرار می‌گیرند. این نمودار کمک می‌کند تا مشخص شود که کدام عناصر در تصمیم‌گیری‌ها و مشکلات موردنظر بسیار بیشتر از دیگران تأثیر دارند (شکل ۲).

چ) تحلیل MICMAC

تحلیل میک‌مک (MICMAC) روشی برای نمایش گرافیکی متغیرها بر اساس قدرت نفوذ و وابستگی آن‌ها در مدل‌سازی ساختاری-تفسیری است. این تحلیل مؤلفه را به چهار گروه خودمختار^۱ (با وابستگی و قدرت نفوذ کم که تأثیر جدی بر سیستم ندارند)، وابسته^۲ (با وابستگی قوی و هدایت ضعیف که تأثیرپذیری بالا و تأثیرگذاری کمی دارند)، مستقل^۳ (با وابستگی کم و هدایت بالا که تأثیرگذاری بالایی دارند) و پیوندی^۴ (با وابستگی و قدرت هدایت بالا که تغییرات کوچک در آن‌ها می‌تواند تأثیرات اساسی بر سیستم داشته باشد). در این تحلیل، قدرت نفوذ به تعداد عناصری که یک عنصر بر آن‌ها تأثیر می‌گذارد و میزان وابستگی به تعداد عناصری که بر یک عنصر تأثیر می‌گذارند، اشاره دارد و امکان بررسی دقیق‌تر محدوده هر یک از متغیرها را فراهم می‌سازد.

۴- یافته‌ها

این بخش نیز متشکل از دو بخش که بخش اول مربوط به شناسایی و صورت‌بندی موانع دستیابی به صنعت چهارم در ساخت مسکن ایرانی و بخش دوم مربوط به مدل‌سازی تفسیری-ساختاری موانع از حیث اهمیت و سطح‌بندی است.

۴-۱- بخش اول: شناسایی و صورت‌بندی موانع

سؤال اول: موانع دستیابی به صنعت چهارم در ساخت مسکن ایرانی کدام‌اند؟

¹ Autonomous

² Dependent

³ Independent

⁴ Linkage

سؤال سوم: این موانع چگونه در یک ساختار تفسیری با یکدیگر ارتباط پیدا می‌کنند؟

شکل ۱ نمودار به هم پیوستگی روابط متغیرهای مختلف را در هفت سطح در زمینه پیشرفت‌های ساخت مسکن در ایران نشان می‌دهد. در سطح ۱، اجزای بالایی C-8 (بازار) و C-25 (انرژی) از تمامی اجزای سطح ۲ تأثیر می‌پذیرند که شامل C-1 (تغییر و پذیرش)، C-5 (نوآوری و بهره‌برداری)، C-24 (استانداردها) و C-28 (تکنولوژیکی) است. اجزای سطح ۲ به نوبه خود از چند متغیر در سطح ۳ تأثیر می‌پذیرند، مانند C-6 (هم‌افزایی) و C-9 (سرمایه‌گذاری در تحقیق) که نقش حیاتی آن‌ها در ترویج نوآوری و همکاری را نشان می‌دهد. با پیشرفت نمودار به سطح ۴، متغیرهایی مانند C-2 (آگاهی و آموزش) و C-14 (مدیریت اجرایی) بر متغیرها سطح ۳ اثر می‌گذارند که اهمیت آگاهی و مدیریت مؤثر را برجسته می‌کند. ارتباطات به سطح ۵ ادامه می‌یابد، جایی که اجزایی مانند C-4 (نابرابری) و C-12 (حمایتی) تأثیرپذیری نابرابری‌ها و حمایت مالی از اثربخشی استراتژیک را آشکار می‌سازند. سطح ۶ بر نقش سیاست‌گذاری (C-13) و در دسترس بودن منابع (C-17) تأکید می‌کند، در حالی که در نهایت، سطح ۷ تأثیر شیوه‌های سنتی (C-3) و تجربیات گذشته (C-19) را بر استراتژی‌های کنونی منعکس می‌کند. به‌طور کلی، این نمودار شبکه پیچیده‌ای از روابط را که پیشرفت‌های بخش ساخت مسکن را هدایت می‌کند، در برمی‌گیرد و نشان می‌دهد که هر سطح و جزء چگونه به هدف کلی دستیابی به انقلاب صنعتی چهارم کمک می‌کند.

سؤال چهارم: اهمیت هر کدام از این موانع از نظر میزان وابستگی و همگرایی چگونه است؟

جدول ۶ مربوط به تحلیل MICMAC، بینش‌های عمیقی در مورد وابستگی و همگرایی اجزای مختلف مرتبط با موانع تحقق صنعت چهارم در ساخت مسکن در ایران ارائه می‌دهد. در این تحلیل، هر جزء بر اساس سطح وابستگی‌اش (چقدر به سایر اجزا وابسته است) و همگرایی‌اش (چقدر بر سایر اجزا تأثیر می‌گذارد) ارزیابی می‌شود. این ارزیابی به شناسایی اجزای کلیدی که برای پیشبرد پیشرفت‌ها ضروری هستند، کمک می‌کند و

C-10 (حمایتی) اهمیت سرمایه‌گذاری در تحقیق و مکانیسم‌های حمایتی در پرورش نوآوری را مورد تأکید قرار می‌دهند. نقش همکاری (C-16) و فرآیندهای اجرایی مؤثر (C-20) نیز مشهود است و نیاز به تلاش‌های هماهنگ میان ذینفعان را برجسته می‌کند. علاوه بر این، C-27 (داده‌ها و اطلاعات) برای تصمیم‌گیری آگاهانه حیاتی است و اهمیت داده‌ها در هدایت استراتژی‌ها را منعکس می‌کند.

سطح ۴ مؤلفه‌هایی مانند C-2 (آگاهی و آموزش) را معرفی می‌کند که ضرورت آگاهی و آموزش در ترویج تغییر را برجسته می‌سازد و همچنین C-14 (مدیریت اجرایی) که مسئول نظارت بر اجرای استراتژی‌ها است. عوامل ساختاری (C-15) و ارتباط مؤثر (C-18) نیز در این سطح حیاتی هستند، زیرا تعاملات را شکل می‌دهند و همکاری میان ذینفعان مختلف را تسهیل می‌کنند. وجود C-21 (تعارض و تداخل) نشان‌دهنده چالش‌های بالقوه‌ای است که ناشی از تعارضات و تداخل در مسئولیت‌ها می‌باشد.

در سطح ۵، مؤلفه‌هایی مانند C-4 (نابرابری) و C-11 (ریسک و بی‌ثباتی) تأثیر نابرابری‌ها و ریسک‌ها بر کارایی استراتژی‌ها را نشان می‌دهند. حمایت مالی (C-12) و به‌روزرسانی‌های منظم در سیاست‌ها (C-22) برای حفظ ابتکارات و اطمینان از مرتبط بودن آن‌ها حیاتی هستند. با پیشرفت به سطح ۶، C-13 (سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی) بر نقش فراگیر سیاست‌گذاری در هدایت صنعت تأکید می‌کند، در حالی که در دسترس بودن منابع (C-17) و اقدامات حمایتی (C-23) برای اجرای موفقیت‌آمیز ضروری هستند.

در نهایت، در سطح ۷ که سطحی بنیادین محسوب می‌شود، شیوه‌های سنتی (C-3) و تجربیات گذشته (C-19) تأثیر قابل توجهی بر استراتژی‌ها و نوآوری‌های کنونی دارند. این سطح‌بندی جامع از متغیرها روابط پیچیده میان مؤلفه‌های ضروری برای پیشرفت صنعت ساخت مسکن در ایران را نشان می‌دهد. با درک این ارتباطات، ذینفعان می‌توانند اقداماتی را اولویت‌بندی کنند که با اهداف استراتژیک دستیابی به انقلاب صنعتی چهارم در این بخش هم‌راستا باشد و اطمینان حاصل کنند که تلاش‌ها به‌خوبی آگاهانه و به‌طور مؤثر هماهنگ شده‌اند.

متغیرهای تحقیق به‌غیر از متغیرهای ذکر شده در سه معیار قبلی را شامل می‌شود که عبارت‌اند از: تغییر و پذیرش، آگاهی و آموزش، هم‌افزایی، توسعه، سرمایه‌گذاری در تحقیق، حمایتی، ریسک و بی‌ثباتی، تأمین مالی، سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی، مدیریت اجرایی، ساختاری، همکاری، منابع، اطلاع‌رسانی، اجرایی، تعارضات و تداخل، تدوین و به‌روزرسانی، حمایتی، پشتیبانی، داده‌ها و اطلاعات و تکنولوژیکی.

برای مدیریت متغیرهای پیوندی مانند «تغییر و پذیرش» و «آگاهی و آموزش»، راه‌اندازی مرکز فرماندهی تحول دیجیتال با نمایندگان تمامی ذینفعان و توسعه سیستم نظارت یکپارچه با داشبورد مدیریتی ضروری است. به‌عنوان مثال، می‌توان «مراکز نمونه ساخت هوشمند» را برای آموزش نیروی کار، تست فناوری‌های جدید و ایجاد آگاهی عمومی راه‌اندازی کرد.

برای متغیرهای مستقل «سنت» و «تجربیات گذشته»، برنامه تحول فرهنگی شامل ایجاد موزه تحول صنعت ساخت و برگزاری کارگاه‌های «پیوند سنت و مدرنیته» با استراتژی ادغام فناوری‌های نوین و حفظ هویت معماری ایرانی از طریق طراحی «مجموعه‌های هوشمند با معماری تلفیقی» پیشنهاد می‌شود. همچنین، برای متغیرهای وابسته مانند «نابرابری» و «نوآوری و بهره‌برداری»، برنامه عدالت دیجیتال شامل ایجاد صندوق حمایت از شرکت‌های کوچک و شبکه مراکز نوآوری منطقه‌ای و «کتابخانه فناوری ساخت» برای دسترسی آسان شرکت‌های خرد مقیاس به نرم‌افزارها و ابزارهای طراحی و تحلیل با هزینه پایین تعریف می‌گردد. این راهکارها با تخصیص منابع به متغیرهای پیوندی، وابسته و مستقل و ایجاد دستگاه‌های نظارت، مسیر عملیاتی روشنی برای تحقق اهداف فراهم می‌کنند.

۵- بحث

بررسی موانع دستیابی به صنعت ساخت چهارم در توسعه مسکن بر اساس رویکرد ISM نشان می‌دهد این موانع بر اساس میزان قدرت محرک و قدرت وابستگی آن‌ها در ۷ سطح مختلف قابل دسته‌بندی است که سطوح پایین‌تر بیانگر مؤلفه‌های مبنایی است که ممکن است تأثیر مستقیمی در دستیابی به صنعت ساخت چهارم در توسعه

همچنین نقاط ضعف و فرصت‌های بهبود را در سیستم نمایان می‌سازد.

اجزای با وابستگی و همگرایی بالا، نظیر C-1 (تغییر و پذیرش) و C-2 (آگاهی و آموزش)، نقش حیاتی در پیشرفت سیستم دارند زیرا هم به‌شدت به سایر اجزا وابسته‌اند و هم تأثیر قابل توجهی بر آن‌ها دارند. در مقابل، اجزایی مانند C-5 (نوآوری و بهره‌برداری) و C-25 (انرژی) با وجود وابستگی بالا، تأثیر کمتری بر سایر اجزا دارند و نشان‌دهنده نقش نسبتاً منفعل‌تری در شبکه هستند. این وضعیت می‌تواند به عدم توانایی آن‌ها در ایجاد تغییرات مثبت در سیستم منجر شود و نیاز به تقویت این اجزا برای افزایش تأثیرگذاری آن‌ها را نمایان می‌سازد.

درنهایت، اجزایی مانند C-3 (سنت) و C-19 (تجربیات گذشته) که وابستگی کمتری دارند اما تأثیر بالایی بر سیستم می‌گذارند، می‌توانند به‌عنوان کاتالیزورهایی برای نوآوری و تغییر عمل کنند. این تحلیل همچنین به شناسایی اجزای با وابستگی و همگرایی متوسط، مانند C-6 (هم‌افزایی) و C-7 (تکنولوژیکی)، کمک می‌کند که به‌طور متوازن بر سایر اجزا تأثیر می‌گذارند. در مجموع، درک این دینامیک‌ها برای تدوین مداخلات مؤثر در راستای پیشرفت‌های صنعتی و دستیابی به اهداف انقلاب صنعتی چهارم بسیار حیاتی است.

شکل ۳ مربوط به تحلیل MICMAC را در چهار معیار اصلی: خودمختار، وابسته، مستقل و پیوندی را نشان می‌دهد. این چهار معیار به ما کمک می‌کنند تا روابط و تعاملات بین اجزای مختلف در سیستم ساخت مسکن را بهتر درک کنیم. در این شکل متغیرهای خودمختار در بخش پایین و سمت چپ نمودار قرار می‌گیرند که همان‌گونه که از این شکل متوجه می‌شویم هیچ متغیری در این بخش قرار ندارد و این به معنای آن است که هیچ متغیر خودمختاری وجود ندارد که این مسئله نشانه پیچیدگی سیستم می‌باشد. متغیرهای وابسته در بخش پایین و چپ نمودار قرار دارند که همان‌طور که مشاهده می‌شود شامل متغیرهای C4 (نابرابری)، C5 (نوآوری و بهره‌برداری)، C24 (استانداردها) و C25 (انرژی) می‌شود. متغیرهای مستقل در بخش بالا و چپ نمودار نشان داده شده است که شامل دو متغیر C3 (سنت) و C19 (تجربیات گذشته) می‌شود. متغیرهای پیوندی در بخش بالا و راست نمودار نشان داده شده است که همه

فرآیند، کاهش در خلاقیت فناورانه و تمرکز بر راه‌حل‌های کوتاه‌مدت به‌جای توسعه پایدار است. «استانداردها» به‌عنوان سومین مؤلفه این سطح، تحت تأثیر عدم ثبات بازار دچار چالش‌های جدی می‌شود. در شرایطی که بازار پیش‌بینی‌ناپذیر نیست، توسعه و اجرای استانداردهای یکپارچه دشوار شده و مقررات متناقض یا ناقص شکل می‌گیرد. همچنین مشکلات انرژی باعث می‌شود استانداردهای مربوط به کارایی انرژی و پایداری با واقعیات عملیاتی همخوانی نداشته باشد. «تکنولوژی» نیز در این سطح تحت تأثیر مستقیم محدودیت‌های انرژی و ناپایداری بازار قرار می‌گیرد. انتخاب، توسعه و پیاده‌سازی فناوری‌ها بر اساس محدودیت‌های موجود شکل می‌گیرد و نه بر اساس بهترین راه‌حل‌های ممکن که این امر کیفیت کلی سیستم فناورانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مؤلفه‌های «هم‌افزایی»، «توسعه»، «سرمایه‌گذاری در تحقیق»، «حمایتی»، «همکاری»، «اجرایی» و «داده‌ها و اطلاعات» در سطح سوم قرار دارند که از مؤلفه‌های سطح قبلی تأثیر می‌پذیرند. «هم‌افزایی» در این سطح تحت تأثیر مستقیم مشکلات تکنولوژی و استانداردسازی قرار می‌گیرد. زمانی که فناوری‌های مختلف بر اساس محدودیت‌های بازار و انرژی به‌جای بر اساس بهترین عملکرد انتخاب می‌شوند، ایجاد هم‌افزایی میان دستگاه‌های مختلف دشوار می‌شود. عدم وجود استانداردهای یکپارچه نیز مانع اصلی برای ایجاد تعامل مؤثر میان اجزای مختلف سیستم است. «سرمایه‌گذاری در تحقیق» به‌طور مستقیم تحت تأثیر محدودیت‌های نوآوری و پذیرش قرار می‌گیرد. در شرایطی که مقاومت در برابر تغییر بالا و فضای نوآوری محدود است، توجیه اقتصادی سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه کاهش یافته و اولویت‌ها به سمت راه‌حل‌های کوتاه‌مدت سوق می‌یابد. «همکاری» در این سطح نشان‌دهنده چالش‌هایی است که از عدم هماهنگی در سطوح پایین‌تر نشأت می‌گیرد. عدم وجود استانداردهای مشترک، مشکلات فناورانه و مقاومت در برابر تغییر، همگی مانع ایجاد همکاری‌های مؤثر میان بازیگران مختلف صنعت می‌شوند. «مسائل اجرایی» در هر سازمان یا برنامه‌ریزی، نقش بسیار مهمی در دستیابی به اهداف تعیین‌شده ایفا می‌کنند. این مسائل به ظرفیت‌ها و ساختارهای مناسب برای اجرای مؤثر برنامه‌ها اشاره دارند. ظرفیت‌هایی نظیر منابع انسانی متخصص، تجهیزات و

مسکن داشته باشند، اما قدرت تأثیرگذاری بالایی در ساختار روابط میان مؤلفه‌ها دارند.

در سطح اول دو مؤلفه «شرایط بازار» و «منابع انرژی» قرار دارند که برای ایجاد محیط پایدار و موفق در صنعت ساخت مسکن ضروری تشخیص داده شده‌اند. این مؤلفه‌ها به دلیل برخورداری از ماهیت زیرساختی و بنیادین تغییرات و اثرات گسترده‌ای را در سیستم ایجاد می‌کنند. «شرایط بازار» فراتر از نوسانات معمول اقتصادی و شامل ناپایداری بازار مسکن، عدم شفافیت در قیمت‌گذاری و نبود مکانیسم‌های پیش‌بینی پذیر تقاضا، زمینه‌ای است که سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته را با ریسک بالای عدم بازگشت سرمایه مواجه ساخته و انگیزه‌های نوآوری را نیز تضعیف می‌کند. «منابع انرژی»، نشان‌دهنده چالش‌های زیرساختی است که عمق تأثیرگذاری آن فراتر از مسائل فنی ساده است. عدم دسترسی پایدار به انرژی، ناکارآمدی شبکه‌های توزیع و وابستگی به منابع انرژی غیرپایدار، محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند که مستقیماً بر امکان‌پذیری اجرای دستگاه‌های هوشمند و اتوماسیون پیشرفته تأثیر می‌گذارد. این مؤلفه همچنین با ایجاد نگرانی‌هایی درباره قابلیت اطمینان دستگاه‌های فناورانه، مقاومت‌هایی را در برابر تغییر ایجاد می‌کند.

موانع سطح اول تأثیر مستقیم و قابل‌توجهی بر موانع سطح دوم اعمال می‌کنند که شامل «تغییر و پذیرش»، «نوآوری و بهره‌برداری»، «استانداردها» و «تکنولوژی» هستند. این رابطه علی‌نشان‌دهنده چگونگی انتشار اثرات از سطوح بنیادی به سطوح عملیاتی است. «تغییر و پذیرش» در این سطح تحت تأثیر مستقیم عدم ثبات بازار و مشکلات انرژی قرار می‌گیرد. زمانی که بازار پیش‌بینی‌ناپذیر نیست و منابع انرژی قابل‌اعتماد در دسترس نیست، مقاومت در برابر تغییر به‌طور طبیعی افزایش می‌یابد زیرا ریسک شکست در محیطی ناپایدار بالاتر درک می‌شود. این مقاومت نه‌تنها در سطح سازمانی بلکه در سطح فردی نیز نمود پیدا می‌کند و فرآیند پذیرش فناوری‌های جدید را کند و دشوار می‌سازد. «نوآوری و بهره‌برداری» نیز به‌طور مستقیم تحت تأثیر شرایط بازار و انرژی قرار می‌گیرد. ناپایداری بازار انگیزه‌های سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه را کاهش می‌دهد، درحالی‌که مشکلات انرژی محدودیت‌هایی بر نوع و کیفیت نوآوری‌های قابل‌اجرا اعمال می‌کند. نتیجه این

در سطح پنجم مؤلفه‌های «نابرابری»، «ریسک و بی‌ثباتی»، «تأمین مالی»، «تدوین و به‌روزرسانی» و «پشتیبانی» قرار دارد. «نابرابری» در این سطح نشان‌دهنده توزیع نامتوازن فرصت‌ها و منابع است که از مشکلات مدیریتی و ساختاری نشأت می‌گیرد. توزیع نامتوازن فرصت‌ها، دسترسی محدود به منابع کلیدی و عدم وجود سیاست‌های حمایتی مناسب از جمله عواملی هستند که این وضعیت را تشدید می‌کنند. برای کاهش این مشکلات، نیاز به اصلاحات ساختاری، شفافیت در مدیریت و ایجاد سازوکارهای عادلانه برای تخصیص منابع وجود دارد. «ریسک و بی‌ثباتی» در این سطح نتیجه تجمع عدم قطعیت‌هایی است که از سطوح پایین‌تر سرچشمه می‌گیرد. مشکلات آگاهی، تعارضات سازمانی و نبود مدیریت اجرایی مؤثر، همگی به افزایش ریسک و کاهش پیش‌بینی‌پذیری سیستم کمک می‌کنند. «تأمین مالی» تحت تأثیر مستقیم افزایش ریسک و عدم اطمینان قرار می‌گیرد. سرمایه‌گذاران و مؤسسات مالی در شرایطی که ریسک بالا و نتایج غیرقابل پیش‌بینی است، تمایل کمتری به تأمین مالی پروژه‌های فناورانه نشان می‌دهند. عدم وجود دستگاه‌های پشتیبانی مؤثر و مشکلات اطلاع‌رسانی باعث می‌شود برخی بازیگران بیش‌ازحد از مزایا بهره‌مند شوند درحالی‌که دیگران از فرصت‌ها محروم می‌مانند.

در سطح ششم مؤلفه‌های «سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی»، «منابع» و «حمایت نهادی» قرار دارد. «سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی» تحت تأثیر مشکلات تأمین مالی، نابرابری و بی‌ثباتی قرار می‌گیرد. سیاست‌گذاران با محدودیت منابع، عدم اطمینان از نتایج و فشارهای ناشی از نابرابری‌های موجود مواجه هستند که توسعه سیاست‌های منسجم و بلندمدت را دشوار می‌سازد. «منابع» نشان‌دهنده محدودیت‌هایی است که از تجمع چالش‌های سطوح پایین‌تر ایجاد شده است. کمبود منابع نه تنها شامل محدودیت‌های مالی بلکه کمبود منابع انسانی متخصص، زیرساخت‌های فناورانه و ظرفیت‌های سازمانی نیز می‌شود. «حمایت نهادی» چالش‌هایی را نشان می‌دهد که از عدم هماهنگی در سطوح پایین‌تر نشأت می‌گیرد. نهادهای حمایتی برای عملکرد مؤثر نیاز به سیاست‌های واضح، منابع کافی و دستگاه‌های پشتیبانی مناسب دارند که همگی تحت تأثیر مشکلات سطوح پایین‌تر قرار گرفته‌اند.

امکانات مادی کافی و همچنین فرآیندهای مدیریتی کارآمد از جمله عوامل کلیدی در موفقیت اجرایی هستند. نبود این ظرفیت‌ها یا ضعف در ساختارهای اجرایی ممکن است منجر به تأخیر، ناکارآمدی یا حتی شکست برنامه‌ها شود. «داده‌ها و اطلاعات» به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های این سطح، تحت تأثیر مشکلات تکنولوژی و عدم وجود استانداردهای مناسب قرار می‌گیرد. فقدان زیرساخت‌های قابل اعتماد برای جمع‌آوری، پردازش و تبادل داده‌ها، مستقیماً از محدودیت‌های انرژی و عدم هماهنگی فناورانه نشأت می‌گیرد.

در سطح چهارم مؤلفه‌های «آگاهی و آموزش»، «مدیریت اجرایی»، «ساختاری»، «اطلاع‌رسانی» و «تعارضات و تداخل» قرار دارد. «آگاهی و آموزش» در این سطح تحت تأثیر کمبود سرمایه‌گذاری در تحقیق و مشکلات اطلاعاتی قرار می‌گیرد. عدم وجود تحقیقات کافی و دسترسی محدود به اطلاعات دقیق، توسعه برنامه‌های آموزشی مؤثر را دشوار می‌سازد و سطح آگاهی عمومی را پایین نگه می‌دارد. «مدیریت اجرایی» چالش‌هایی را نشان می‌دهد که از عدم هماهنگی و تعامل مؤثر در سطوح پایین‌تر نشأت می‌گیرد. مدیران اجرایی با محدودیت‌هایی مواجه می‌شوند که ریشه در مشکلات هم‌افزایی، همکاری و دسترسی به اطلاعات دقیق دارد. «مؤلفه ساختاری» به ساختار سازمان و نحوه تقسیم وظایف و مسئولیت‌ها اشاره دارد. عدم وجود یک ساختار منسجم و شفاف می‌تواند منجر به سردرگمی در نقش‌ها و وظایف گردد و در نتیجه کارایی سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، ساختار ناکارآمد می‌تواند مانع از تصمیم‌گیری سریع و مؤثر شود و به ایجاد ناهماهنگی در عملکرد سازمانی منجر گردد. «اطلاع‌رسانی» نیز به جریان اطلاعات درون سازمان و بین سازمان‌ها اشاره دارد. نبود یک سیستم اطلاع‌رسانی کارآمد می‌تواند به عدم دسترسی به اطلاعات حیاتی و به تأخیر افتادن تصمیم‌گیری‌ها منجر شود. این موضوع نه تنها بر کارایی عملیات تأثیر می‌گذارد، بلکه می‌تواند به بروز سوءتفاهم‌ها و تعارضات نیز دامن بزند. «تعارضات و تداخل» به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های این سطح، نتیجه مستقیم عدم وجود استانداردهای واضح و مشکلات همکاری در سطوح پایین‌تر است. این تعارضات نه تنها بین سازمان‌های مختلف بلکه در درون سازمان‌ها نیز رخ می‌دهد و کارایی کلی سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

است که این مؤلفه‌ها بیشتر در نقش تسهیل‌کننده یا محدودکننده عمل می‌کنند تا محرک اصلی تغییر. مؤلفه‌های «سنت» و «تجربیات گذشته» نیز الگوی مهمی را نشان می‌دهند. اگرچه در بالاترین سطح هرم قرار دارند، اما می‌توانند در نوآوری تأثیر قابل توجهی داشته باشند. این تأثیر می‌تواند در دو جهت باشد: به‌عنوان مانع (در قالب مقاومت در برابر تغییر) یا به‌عنوان منبع (در قالب دانش و تجربه قابل استفاده). این تحلیل نشان می‌دهد که موانع دستیابی به صنعت چهارم در ساخت مسکن ایران دارای ساختاری پیچیده و چندلایه است که مستلزم رویکردی جامع و هماهنگ برای حل آن است. تمرکز بر مؤلفه‌های کلیدی مانند «تغییر و پذیرش» و «آگاهی و آموزش» ضروری است، اما این تمرکز باید همراه با توجه به مؤلفه‌های بنیادی در سطوح پایین‌تر و مدیریت اثرات فرهنگی در سطوح بالا باشد.

به نظر می‌رسد برای ترسیم نقشه راه منسجمی برای توسعه صنعت ساخت چهارم در بخش مسکن در وهله اول تثبیت زیرساخت‌های بنیادی در کوتاه‌مدت با تمرکز بر حل موانع سطوح ۱ و ۲ شامل ایجاد ثبات در بازار مسکن، تضمین دسترسی پایدار به منابع انرژی، تدوین استانداردهای یکپارچه و ارتقای فناوری‌های موجود اساسی است. در وهله دوم تقویت ظرفیت‌های میانی در میان‌مدت با هدف رفع موانع سطوح ۳ و ۴، شامل توسعه برنامه‌های آگاهی‌رسانی و آموزش، ایجاد مراکز تحقیق و توسعه، تقویت مدیریت اجرایی و بهبود دستگاه‌های اطلاع‌رسانی ضرورت دارد. در بلندمدت اما یکپارچه‌سازی و هماهنگی برای رفع موانع سطوح ۵ و ۶ باید متمرکز بود و این شامل ایجاد صندوق حمایت از نوآوری، تدوین سیاست‌های حمایتی، ایجاد شبکه‌های همکاری و توسعه دستگاه‌های مدیریت ریسک می‌باشد. همچنین ایجاد تحولات دیجیتالی با مدیریت موانع سطح ۷ و پیاده‌سازی کامل، شامل ادغام تجربیات سنتی با فناوری‌های نوین، ایجاد اکوسیستم نوآوری پایدار و پیاده‌سازی گسترده IoT و هوش مصنوعی است که هدف نهایی آن دستیابی به پیاده‌سازی تکنولوژی‌های صنعت ساخت چهارم در بیشتر پروژه‌های جدید و کاهش در زمان ساخت می‌باشد، اهمیت دارد.

در سطح هفتم مؤلفه‌های «سنت» و «تجربیات» قرار دارد. «سنت» نشان‌دهنده مقاومت‌های ریشه‌ای در برابر تغییر است که از تجمع شکست‌ها و عدم موفقیت‌های سطوح پایین‌تر تقویت می‌شود. زمانی که سیاست‌گذاری‌ها ناموفق، منابع محدود و نهادهای حمایتی ضعیف هستند، اعتماد عمومی به نوآوری کاهش یافته و گرایش به روش‌های سنتی افزایش می‌یابد. «تجربیات گذشته» نیز بر اساس تجمع شکست‌ها و چالش‌های سطوح پایین‌تر، نگرش منفی نسبت به تغییر و نوآوری را تقویت می‌کند. تجربیات ناموفق در زمینه اجرای پروژه‌های فناورانه، عدم موفقیت در تحقق اهداف برنامه‌ریزی‌شده و مشاهده هدر رفت منابع، همگی به تشکیل حافظه جمعی منفی کمک می‌کنند که مانع پذیرش فناوری‌های جدید می‌شود. تحلیل قدرت وابستگی و قدرت محرک مؤلفه‌های موانع تحقق صنعت چهارم در ساخت مسکن ایران نشان داد «تغییر و پذیرش» و «آگاهی و آموزش» به‌شدت به سایر مؤلفه‌ها وابسته‌اند و تأثیر زیادی دارند، درحالی‌که مؤلفه‌هایی مانند «نوآوری و بهره‌برداری» و «انرژی» تأثیر کمتری دارند. همچنین، مؤلفه‌های «سنت» و «تجربیات گذشته» می‌توانند در نوآوری تأثیر داشته باشند. تحلیل قدرت وابستگی و قدرت محرک مؤلفه‌های موانع تحقق صنعت چهارم در ساخت مسکن ایران الگوهای پیچیده‌ای را آشکار می‌سازد که نشان‌دهنده ماهیت سیستمی این چالش‌ها است. «تغییر و پذیرش» و «آگاهی و آموزش» به‌عنوان مؤلفه‌هایی شناسایی شده‌اند که به‌شدت به سایر مؤلفه‌ها وابسته‌اند درحالی‌که خود تأثیر زیادی بر سیستم دارند. این ویژگی نشان‌دهنده نقش کلیدی این مؤلفه‌ها در فرآیند تحول است. آن‌ها به‌عنوان گره‌های اصلی شبکه عمل می‌کنند که تغییر در آن‌ها می‌تواند اثرات گسترده‌ای در سراسر سیستم ایجاد کند. وابستگی بالای این مؤلفه‌ها نشان می‌دهد که بهبود آن‌ها مستلزم بهبود هم‌زمان مؤلفه‌های متعددی است. به‌عنوان مثال، بهبود تغییر و پذیرش نیازمند بهبود شرایط بازار، حل مشکلات انرژی، توسعه فناوری‌های مناسب، ایجاد استانداردهای مطلوب و تقویت همکاری‌ها است. این پیچیدگی نشان می‌دهد که رویکردهای تک‌بعدی در حل این مسائل کارآمد نخواهد بود. در مقابل، مؤلفه‌هایی مانند «نوآوری و بهره‌برداری» و «انرژی» تأثیر نسبتاً کمتری بر سیستم دارند، اما این به معنای کم‌اهمیت بودن آن‌ها نیست. بلکه نشان‌دهنده این

۶- نتیجه‌گیری

مراجع

- Abdul-Samad, Z., Xin, L. L., Alaloul, W. S., & Salleh, H. (2024). Towards Industrial Revolution (IR) 4.0 in the construction industry: Readiness of contractors. *Results in Engineering*, 22, 102321. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102321>
- Aigbavboa, C., & Kissi, E. (2025). Digital construction project cost management—an Industry 4.0 framework. *Digital transformation in construction: Principles and applications*, 147-158.
- Alaboud, N., & Alshahrani, A. (2023). Adoption of building information modelling in the Saudi construction industry: An interpretive structural modelling. *Sustainability*, 15(7), 6130. <https://doi.org/10.3390/su15076130>
- Alaloul, W. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., & Mohammed, B. S. (2018). Industry revolution IR 4.0: future opportunities and challenges in construction industry. In *MATEC web of conferences* (Vol. 203, p. 02010). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820302010>
- Ali, S., Huang, J., Khan, S. U., & Li, H. (2020). A framework for modelling structural association amongst barriers to software outsourcing partnership formation: An interpretive structural modelling approach. *Journal of Software: Evolution and Process*, 32(6), e2243. <https://doi.org/10.1002/smr.2243>
- Ansari, F. A., Haque, S. N., Khan, S., & Khan, W. (2024). Modeling the enablers of implementing green HRM practices: An ISM-MICMAC approach. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 31(6), 6260–6274. <https://doi.org/10.1002/csr.2913>
- Asif, M., Sarim, M., Khan, W., & Khan, S. (2023). ISM- and MICMAC-based modelling of dairy supply chain: A study of enablers in Indian economy perspective. *British Food Journal*, 126(2), 578–594. <https://doi.org/10.1108/BFJ-04-2023-0307>
- Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., Shringi, A., & Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*, 141, 104440. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440>
- Bahrami, M. R., Hashemzadeh, G. R., Shahmansoury, A., & Fathi Hafshejani, K. (2025). Analyzing effective components in industry 4.0 maturity for Iranian banking. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 21-50. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2047848.1246>

تحلیل موانع دستیابی به صنعت چهارم در ساخت مسکن ایران با رویکرد ISM نشان می‌دهد که این موانع در ساختاری پیچیده و چندلایه، از مؤلفه‌های بنیادی مانند شرایط بازار و منابع انرژی تا عوامل فرهنگی نظیر سنت و تجربیات گذشته، سازمان‌یافته‌اند. تمرکز بر مؤلفه‌های کلیدی مانند «تغییر و پذیرش» و «آگاهی و آموزش»، به دلیل وابستگی بالا و تأثیر گسترده‌شان بر سیستم، حیاتی است، اما موفقیت در این امر مستلزم رفع موانع زیرساختی نظیر ناپایداری بازار و مشکلات انرژی و همچنین مدیریت اثرات فرهنگی در سطوح بالاتر است. این پیچیدگی، نیاز به رویکردی جامع و هماهنگ را برجسته می‌کند که هم‌زمان به بهبود زیرساخت‌ها، تقویت همکاری‌ها و ارتقای آگاهی عمومی بپردازد.

مشارکت‌های نویسندگان

این مقاله مستخرج از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان «تبیین مدل راهبری صنعت ساخت‌وساز ایران به صنعت ساخت چهارم» که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز در حال انجام است.

کسری رهبری‌پور: تهیه پیش نویس خطی، بازنگری اولیه گزارش و روش‌شناسی پژوهش، مدل مفهومی پژوهش، بررسی ادبیات نظری و پیشینه مرتبط، تجزیه و تحلیل داده‌ها، پیش نویس تحلیل آماری و بازبینی متن؛ **محمدرضا پاکدل‌فرد:** راهنمایی، بازبینی متن؛ **حسن ستاری ساربانقلی:** راهنمایی، بازبینی متن؛ **نیما ولی‌زاده:** راهنمایی، بازبینی متن.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری قدردانی می‌نمایند.

- El Jazzar, M., Schranz, C., Urban, H., & Nassereddine, H. (2021). Integrating construction 4.0 technologies: A four-layer implementation plan. *Frontiers in Built Environment*, 7, 671408. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.671408>
- Elo, S., & Kyngäs, H. (2008). The qualitative content analysis process. *Journal of Advanced Nursing*, 62(1), 107–115. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2007.04569.x>
- Ershadi, M. J., Kianmehr, N., Nabatchian, M., Dinmohammadi, L. (2024). Designing a Productivity assessment model to identify and prioritize influential factors and examine obstacles facing Iranian research organizations. *System Engineering and Productivity*. 4(2), 31-46. <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2019692.1171>
- Farinha, I. M., Ferreira, F. A., Ferreira, N. C., Garces, E., & Daim, T. (2025). Digital strategies and non-conventional sources of innovation: Analysis of causal relationships using interpretive structural modeling. *Technology in Society*, 82, 102940. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2025.102940>
- Forcael, E., Ferrari, I., Opazo-Vega, A., & Pulido-Arcas, J. A. (2020). Construction 4.0: A literature review. *Sustainability*, 12(22), 9755. <https://doi.org/10.3390/su12229755>
- Graneheim, U. H., & Lundman, B. (2004). Qualitative content analysis in nursing research: Concepts, procedures and measures to achieve trustworthiness. *Nurse Education Today*, 24(2), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2003.10.001>
- Guba, E. G. (1981). Criteria for assessing the trustworthiness of naturalistic inquiries. *Ectj*, 29(2), 75-91. <https://doi.org/10.1007/BF02766777>
- Harikannan, N., Vinodh, S., & Antony, J. (2025). Analysis of the relationship among Industry 4.0 technologies, sustainable manufacturing practices and organizational sustainable performance using structural equation modelling. *The TQM Journal*, 37(1), 42-72. <https://doi.org/10.1108/TQM-02-2023-0044>
- Javaid, M. Z., Shoukat, M. Z., & Niazi, A. A. K. (2022). Total Interpretive Structural Modeling to Identify Enablers for Successful Implementation of Total Productive Management. *Leadership*, 1(2), 130-156.
- Júnior, E. D. S., Silva, D. J. C. D., Carvalho, R. B. D., & Lopes, L. F. D. (2025). Barriers to implementing Industry 4.0: perceptions of professionals in the Brazilian cement industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 137(9), 4989-5000. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15443-9>
- Kazançoğlu, Y., Gozacan, N., Luthra, S., & Kumar, A. (2024). Are we really addressing the roadblocks
- Beck, C. (1993). Qualitative research: The evaluation of its credibility, fittingness, and auditability. *Western Journal of Nursing Research*, 15(2), 263–266. <https://doi.org/10.1177/019394599301500212>
- Begić, H., & Galić, M. (2021). A Systematic Review of Construction 4.0 in the Context of the BIM 4.0 Premise. *Buildings*, 11(8), 337. <https://doi.org/10.3390/buildings11080337>
- Biernacki, P., & Waldorf, D. (1981). Snowball sampling: Problems and techniques of chain referral sampling. *Sociological Methods & Research*, 10(2), 141–163. <https://doi.org/10.1177/004912418101000205>
- Boton, C., Rivest, L., Ghnaya, O., & Chouchen, M. (2021). What is at the root of Construction 4.0: A systematic review of the recent research effort. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 2331–2350. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09457-7>
- Charmaz, K. (2014). Constructing grounded theory.
- Corbin, J. M., & Strauss, A. L. (2008). Basics of qualitative research. *Basics of qualitative research*.
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. (2019). Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. *Automation in Construction*, 103, 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>
- De Marco, C., Colabianchi, S., & Costantino, F. (2025). ISM2: Interpretive structural modelling methodology in the context of in-space manufacturing for a strategic space project guideline. *Acta Astronautica*. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.07.029>
- Di Nardo, M., Gallab, M., Murino, T., Wu, J., & Pandey, S. (2025). Integrating sustainability and industry 4.0: A framework for sustainable logistics 4.0. *Circular Economy and Sustainability*, 1-39. <https://doi.org/10.1007/s43615-024-00492-1>
- Dworkin, S. L. (2012). Sample size policy for qualitative studies using in-depth interviews. *Archives of Sexual Behavior*, 41(6), 1319–1320. <https://doi.org/10.1007/s10508-012-0016-6>
- Dos Santos Silva, J., Matos de Oliveira, A., Veríssimo de Oliveira, J., & Bouzon, M. (2025). Barriers to digital transformation in fruit and vegetable supply chains: a multicriteria analysis using ISM and MICMAC. *OPSEARCH*, 62(1), 460-482. <https://doi.org/10.1007/s12597-024-00809-6>
- Eghbal, F., Ehsanifar, M., Mirhosseini, M., & Mazaheri, H. (2025). Identification and modeling of key factors significant to the financial performance of Iranian construction companies. *System Engineering and Productivity*, 4(4), 77-94. <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2034092.1218>

- framework for Construction 4.0. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(2), 689–711. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09455-9>
- Noy, C. (2008). Sampling knowledge: The hermeneutics of snowball sampling in qualitative research. *International Journal of Social Research Methodology*, 11(4), 327–344. <https://doi.org/10.1080/13645570701401305>
- Palinkas, L. A., Horwitz, S. M., Green, C. A., Wisdom, J. P., Duan, N., & Hoagwood, K. (2015). Purposeful sampling for qualitative data collection and analysis in mixed method implementation research. *Administration and Policy in Mental Health and Mental Health Services Research*, 42(5), 533–544. <https://doi.org/10.1007/s10488-013-0528-y>
- Rahbaripour, K., Pakdelfard, M., Sattari Sarbangholi, H., & Valizadeh, N. (2025). Construction 4.0 barriers in housing development in Iran. *System Engineering and Productivity*, 1-43. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2060254.1320>
- Ranjan Debata, B., Sree, K., Patnaik, B., & Sankar Mahapatra, S. (2013). Evaluating medical tourism enablers with interpretive structural modeling. *Benchmarking: An International Journal*, 20(6), 716-743. <https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2011-0079>
- Ribeiro, A. M., Arantes, A., & Cruz, C. O. (2022). Barriers to the adoption of modular construction in Portugal: An interpretive structural modeling approach. *Buildings*, 12(10), 1509. <https://doi.org/10.3390/buildings12101509>
- Royse, D. (2008). Program Evaluation: Its Role and Contribution to Evidence-Based Practice. *SOCIAL WORK PRACTICE*, 120.
- Stake, R. E., Denzin, N. K., & Lincoln, Y. S. (1994). Handbook of qualitative research. *NK Denzin & YS Lincoln (Eds.)*, 244.
- Sarvari, R., Jabarzadeh, Y., Karami, A., & Jabarnejad, M. (2024). An interpretive structural modeling—analytic network process approach for analysing green entrepreneurship barriers. *International Entrepreneurship and Management Journal*, 20(1), 367–391. <https://doi.org/10.1007/s11365-023-00881-2>
- Saunders, B., Sim, J., Kingstone, T., Baker, S., Waterfield, J., Bartlam, B., Burroughs, H., & Jinks, C. (2018). Saturation in qualitative research: Exploring its conceptualization and operationalization. *Quality & Quantity*, 52(4), 1893–1907. <https://doi.org/10.1007/s11135-017-0574-8>
- Sawhney, A., Riley, M., & Irizarry, J. (2020). Construction 4.0: Introduction and overview. In *Construction 4.0* (pp. 3-22). Routledge.
- to adoption of renewable and sustainable energy technologies? Total interpretive structural modeling approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(11), 16846–16864. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32096-5>
- Khalili, S., Saeedi, F., Yousefi, S., & Zandpourasl, M. (2025). Investigating the impact of the "attitude and mindset" component on the success of project managers in the Iranian construction industry. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 1-19. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2046688.1237>
- Khan, M. I., Yasmeen, T., Khan, M., Hadi, N. U., Asif, M., Farooq, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2025). Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: Pathways and prospects. *Sustainable Production and Consumption*, 54, 149-189. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012>
- Kloker, S., Straub, T., Morana, S., & Weinhardt, C. (2018). The effect of social reputation on retention: Designing a social real-time Delphi platform.
- Kumar, R., & Goel, P. (2022). Exploring the domain of interpretive structural modelling (ISM) for sustainable future panorama: A bibliometric and content analysis. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(5), 2781–2810. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09675-7>
- Li, Y., Badulescu, A., & Badulescu, D. (2025). Modeling and Analyzing Critical Policies for Improving Energy Efficiency in Manufacturing Sector: An Interpretive Structural Modeling (ISM) Approach. *Energies*, 18(4), 893. <https://doi.org/10.3390/en18040893>
- Lincoln, Y. S. (1995). Emerging criteria for quality in qualitative and interpretive research. *Qualitative Inquiry*, 1(3), 275–289. <https://doi.org/10.1177/107780049500100301>
- Liu, W., & Feng, J. (2025). Identifying key factors and interrelationships affecting large-scale agricultural biomass production: Insights from interpretive structural modeling. *Biomass and Bioenergy*, 200, 108013. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108013>
- Maskuriy, R., Selamat, A., Ali, K. N., Maresova, P., & Krejcar, O. (2019). Industry 4.0 for the construction industry—how ready is the industry?. *Applied Sciences*, 9(14), 2819. <https://doi.org/10.3390/app9142819>
- Mason, M. (2010, September). Sample size and saturation in PhD studies using qualitative interviews. In *Forum: Qualitative social research* (Vol. 11, No. 3). Freie Universität Berlin. <https://doi.org/10.17169/fqs-11.3.1428>
- Muñoz-La Rivera, F., Mora-Serrano, J., Valero, I., & Oñate, E. (2021). Methodological-technological

- Technologies and Sustainability*, 100166. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100166>
- Turner, C., Oyekan, J., Stergioulas, L., & Griffin, D. (2021). Utilizing Industry 4.0 on the construction site: Challenges and opportunities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(2), 746–756. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3002197>
- Wang, Y., & Wang, X. (2025). Values, Application Scenarios and Challenges of Blockchain Technology: A Perspective from Construction 4.0. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 100281. <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2025.100281>
- Warfield, J. N. (2007). Toward interpretation of complex structural models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (5), 405-417. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1974.4309336>
- W John, C. (2013). Qualitative Inquiry And Research Design Choosing Among Five Approaches. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.
- You, Z., & Feng, L. (2020). Integration of industry 4.0 related technologies in construction industry: a framework of cyber-physical system. *Ieee Access*, 8, 122908-122922. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007206>
- Zhang, C., Zhou, G., Li, J., Chang, F., Ding, K., & Ma, D. (2023). A multi-access edge computing enabled framework for the construction of a knowledge-sharing intelligent machine tool swarm in Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Systems*, 66, 56-70. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.11.015>
- Zhang, J., Zhu, X., Khan, A. M., Houda, M., Rehman, S. K. U., Jameel, M., ... & Alrowais, R. (2023). BIM-based architectural analysis and optimization for construction 4.0 concept (a comparison). *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6), 102110. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102110>
- Shafei, H., Rahman, R. A., & Lee, Y. S. (2025). Evaluating construction 4.0 technologies in enhancing safety and health: case study of a national strategic plan. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 23(4), 1211-1242. <https://doi.org/10.1108/JEDT-08-2023-0330>
- Shahzad, M. F., Liu, H., & Zahid, H. (2024). Industry 4.0 technologies and sustainable performance: Do green supply chain collaboration, circular economy practices, technological readiness and environmental dynamism matter? *Journal of Manufacturing Technology Management*, 36(1), 1–22. <https://doi.org/10.1108/JMTM-05-2024-0236>
- Singh, A., Kumar, V., Verma, P., & Kandasamy, J. (2023). Identification and severity assessment of challenges in the adoption of Industry 4.0 in Indian construction industry. *Asia Pacific Management Review*, 28(3), 299–315. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2022.10.007>
- Siriwardhana, S., & Moehler, R. C. (2023). Enabling productivity goals through Construction 4.0 skills: Theories, debates, definitions. *Journal of Cleaner Production*, 425, 139011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139011>
- Sushil. (2017). Modified ISM/TISM process with simultaneous transitivity checks for reducing direct pair comparisons. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 18(4), 331–351. <https://doi.org/10.1007/s40171-017-0167-3>
- Talbi, A., & Souad, S. B. (2022). Industry 4.0 in construction organization of mega projects: A bibliometric analysis. *Procedia Computer Science*, 204, 524–531. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.064>
- Taqi, H. M. M., Nayeem, I., Bari, A. M., Anam, M. Z., & Ali, S. M. (2025). Addressing challenges to cloud manufacturing in industry 4.0 environment using an integrated approach: Implications for sustainability. *Green*

جدول ۱. دموگرافی مشارکت کنندگان

Table 1. Demographics of participants

ردیف	جنسیت	تحصیلات	تخصص	سابقه	محل اشتغال
۱	مرد	دکتری	معماری	۲۰	هیئت علمی دانشگاه
۲	مرد	دکتری	عمران	۱۲	نظام مهندسی
۳	مرد	دکتری	مدیریت پروژه	۱۷	شهرداری
۴	زن	فوق لیسانس	عمران	۱۲	اداره شهرسازی
۵	زن	فوق لیسانس	عمران	۱۰	شهرداری
۶	مرد	فوق لیسانس	صنایع	۲۲	وزارت راه و شهرسازی
۷	مرد	دکتری	مدیریت پروژه	۱۶	هیئت علمی دانشگاه
۸	زن	دکتری	محیط زیست	۱۴	هیئت علمی دانشگاه
۹	مرد	فوق لیسانس	معماری	۱۷	شهرداری
۱۰	مرد	فوق لیسانس	مدیریت صنعتی	۱۶	شهرداری

جدول ۲. ماتریس دستیابی اولیه

Table 2. Initial acquisition matrix

C-28	C-27	C-26	C-25	C-24	C-23	C-22	C-21	C-20	C-19	C-18	C-17	C-16	C-15	C-14	C-13	C-12	C-11	C-10	C-9	C-8	C-7	C-6	C-5	C-4	C-3	C-2	C-1	
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	C-1
۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	C-2
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	C-3
۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	C-4
۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	C-5
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	C-6
۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	C-7
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	C-8
۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	C-9
۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	C-10
۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	C-11
۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	C-12
۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	C-13
۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	C-14
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	C-15
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	C-16
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	C-17
۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	C-18
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	C-19
۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	C-20
۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	C-21
۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	C-22
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	C-23
۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	C-24
۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	C-25
۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	C-26
۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	C-27
۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	C-28

جدول ۳. فرآیند سطح‌بندی مؤلفه‌ها

Table 3. Component leveling process

تقاطع	مجموعه پیشین	مجموعه دسترسی پذیری	تکرار شماره
C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۱
C-1C-2C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۲
C-3C-19	C-3C-19	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۳
C-1C-2C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۴
C-1C-5C-20C-24C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-5C-8C-20C-24C-25C-27C-28	۵
C-1C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-20C-21C-24C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-15C-16C-20C-21C-24C-25C-27C-28	۶
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-27C-28	۷
C-8	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-8	۸
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-24C-25C-26C-27C-28	۹
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-24C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-24C-25C-27C-28	۱۰
C-1C-2C-4C-7C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-20C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۱۱
C-1C-2C-4C-7C-9C-11C-12C-15C-20C-21C-22C-26	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-12C-13C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-24C-25C-26C-27C-28	۱۲
C-1C-2C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-20C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۱۳
C-1C-2C-7C-9C-10C-11C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-26C-27	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-1C-2C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-24C-25C-26C-27C-28	۱۴
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۱۵
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-14C-16C-18C-20C-24C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-14C-16C-18C-20C-24C-25C-27C-28	۱۶
C-1C-2C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۱۷
C-1C-2C-4C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-24C-25C-27C-28	۱۸
C-3C-19	C-3C-19	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۱۹
C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-24C-25C-26C-27C-28	۲۰

Exit > Level 1

ادامه جدول ۳.

Table 3 continued.

تقاطع	مجموعه پیشین	مجموعه دسترسی پذیری	شماره تکرار ۱
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۲۱
C-1C-2C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-17C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۲۲
C-1C-2C-4C-7C-11C-13C-15C-17C-21C-22C-23	C-1C-2C-3C-4C-7C-11C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	۲۳
C-1C-5C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-21C-24C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-5C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-21C-24C-25C-28	۲۴
C-25	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-25C-26C-27C-28	C-25	۲۵ Exit > Level 1
C-1C-2C-4C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-20C-21C-22C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-24C-25C-26C-27C-28	۲۶
C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-24C-25C-26C-27C-28	۲۷
C-1C-2C-5C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-18C-20C-21C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-5C-6C-7C-8C-9C-10C-15C-16C-18C-20C-21C-24C-25C-26C-27C-28	۲۸
تکرار ۲			
C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۱ Exit > Level 2
C-1C-2C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۲
C-3C-19	C-3C-19	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۳
C-1C-2C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۴
C-1C-5C-20C-24C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-5C-20C-24C-27C-28	۵ Exit > Level 2
C-1C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-20C-21C-24C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-5C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-20C-21C-24C-27C-28	۶
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-27C-28	۷
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-24C-26C-27C-28	۹

ادامه جدول ۳.

Table 3 continued.

تقاطع	مجموعه پیشین	مجموعه دسترسی پذیری	شماره تکرار ۲
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-24C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-24C-27C-28	۱۰
C-1C-2C-4C-7C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-20C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۱۱
C-1C-2C-4C-7C-9C-11C-12C-15C-20C-21C-22C-26	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-12C-13C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-24C-26C-27C-28	۱۲
C-1C-2C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-20C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۱۳
C-1C-2C-7C-9C-10C-11C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-26C-27	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-1C-2C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-24C-26C-27C-28	۱۴
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۱۵
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-14C-16C-18C-20C-24C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-14C-16C-18C-20C-24C-27C-28	۱۶
C-1C-2C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23C-26	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۱۷
C-1C-2C-4C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-24C-27C-28	۱۸
C-3C-19	C-3C-19	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۱۹
C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-24C-26C-27C-28	۲۰
C-1C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۲۱
C-1C-2C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-17C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-1C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۲۲
C-1C-2C-4C-7C-11C-13C-15C-17C-21C-22C-23	C-1C-2C-3C-4C-7C-11C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	۲۳
C-1C-5C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-21C-24C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-5C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-21C-24C-28	۲۴ Exit > Level 2
C-1C-2C-4C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-20C-21C-22C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-24C-26C-27C-28	۲۶
C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27C-28	C-1C-2C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-24C-26C-27C-28	۲۷
C-1C-2C-5C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-18C-20C-21C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-3C-4C-5C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-24C-26C-27C-28	C-1C-2C-5C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-18C-20C-21C-24C-26C-27C-28	۲۸ Exit > Level 2

ادامه جدول ۳.

Table 3 continued.

تقاطع	مجموعه پیشین	مجموعه دسترسی پذیری	شماره تکرار
C-2C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۲
C-3C-19	C-3C-19	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۳
C-2C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۴
C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-20C-21C-27	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-6C-7C-9C-10C-15C-16C-20C-21C-27	۶ Exit > Level 3
C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-27	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-27	۷ Exit > Level 3
C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-26C-27	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-26C-27	۹ Exit > Level 3
C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-27	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-27	۱۰ Exit > Level 3
C-2C-4C-7C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-20C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۱۱
C-2C-4C-7C-9C-11C-12C-15C-20C-21C-22C-26	C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-12C-13C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-26C-27	۱۲
C-2C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-20C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۱۳
C-2C-7C-9C-10C-11C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-26C-27	C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-6C-7C-9C-10C-11C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-26C-27	۱۴
C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۱۵
C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-14C-16C-18C-20C-27	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-14C-16C-18C-20C-27	۱۶ Exit > Level 3
C-2C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-7C-9C-11C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۱۷
C-2C-4C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-27	C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-27	۱۸
C-3C-19	C-3C-19	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۱۹

ادامه جدول ۳.

Table 3 continued.

تقاطع	مجموعه پیشین	مجموعه دسترسی پذیری	شماره	تکرار ۳
C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-26C-27	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-26C-27	۲۰	Exit > Level 3
C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۲۱	
C-2C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-17C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-3C-4C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۲۲	
C-2C-4C-7C-11C-13C-15C-17C-21C-22C-23	C-2C-3C-4C-7C-11C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-23C-26C-27	۲۳	
C-2C-4C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-20C-21C-22C-26C-27	C-2C-3C-4C-9C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-20C-21C-22C-26C-27	۲۶	
C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-26C-27	C-2C-3C-4C-6C-7C-9C-10C-11C-12C-13C-14C-15C-16C-17C-18C-19C-20C-21C-22C-23C-26C-27	C-2C-4C-6C-7C-9C-10C-14C-15C-16C-18C-20C-21C-22C-26C-27	۲۷	Exit > Level 3
تکرار ۴				
C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	۲	Exit > Level 4
C-3C-19	C-3C-19	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-21C-22C-23C-26	۳	
C-2C-4C-11C-12C-13C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-15C-17C-18C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	۴	
C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	۱۱	
C-2C-4C-11C-12C-15C-21C-22C-26	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-11C-12C-14C-15C-18C-21C-22C-26	۱۲	
C-2C-4C-11C-13C-15C-17C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-11C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	۱۳	
C-2C-11C-14C-15C-18C-21C-26	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-11C-14C-15C-18C-21C-26	۱۴	Exit > Level 4
C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	۱۵	Exit > Level 4
C-2C-4C-11C-13C-15C-17C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-11C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	۱۷	

ادامه جدول ۳.

Table 3 continued.

تقاطع	مجموعه پیشین	مجموعه دسترسی پذیری	شماره	تکرار ۴
C-2C-4C-14C-15C-18C-21	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-14C-15C-18C-21	۱۸	Exit > Level 4
C-3C-19	C-3C-19	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-21C-22C-23C-26	۱۹	
C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	۲۱	Exit > Level 4
C-2C-4C-11C-12C-13C-15C-17C-21C-22C-23C-26	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	۲۲	
C-2C-4C-11C-13C-15C-17C-21C-22C-23	C-2C-3C-4C-11C-13C-15C-17C-19C-21C-22C-23	C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-23C-26	۲۳	
C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-21C-22C-26	C-2C-3C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-19C-21C-22C-23C-26	C-2C-4C-11C-12C-13C-14C-15C-17C-18C-21C-22C-26	۲۶	
				تکرار ۵
C-3C-19	C-3C-19	C-3C-4C-11C-12C-13C-17C-19C-22C-23C-26	۲	
C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-23C-26	C-3C-4C-11C-12C-13C-17C-19C-22C-23C-26	C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-23C-26	۴	Exit > Level 5
C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-23C-26	C-3C-4C-11C-12C-13C-17C-19C-22C-23C-26	C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-23C-26	۱۱	Exit > Level 5
C-4C-11C-12C-22C-26	C-3C-4C-11C-12C-13C-17C-19C-22C-23C-26	C-4C-11C-12C-22C-26	۱۲	Exit > Level 5
C-4C-11C-13C-17C-22C-23C-26	C-3C-4C-11C-13C-17C-19C-22C-23C-26	C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-23C-26	۱۳	
C-4C-11C-13C-17C-22C-23C-26	C-3C-4C-11C-13C-17C-19C-22C-23C-26	C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-23C-26	۱۷	
C-3C-19	C-3C-19	C-3C-4C-11C-12C-13C-17C-19C-22C-23C-26	۱۹	
C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-23C-26	C-3C-4C-11C-12C-13C-17C-19C-22C-23C-26	C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-23C-26	۲۲	Exit > Level 5
C-4C-11C-13C-17C-22C-23	C-3C-4C-11C-13C-17C-19C-22C-23	C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-23C-26	۲۳	

ادامه جدول ۳.

Table 3 continued.

تقاطع	مجموعه پیشین	مجموعه دسترسی پذیری	شماره	تکرار ۵
C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-26	C-3C-4C-11C-12C-13C-17C-19C-22C-23C-26	C-4C-11C-12C-13C-17C-22C-26	۲۶	Exit > Level 5
تکرار ۶				
C-3C-19	C-3C-19	C-3C-13C-17C-19C-23	۲	
C-13C-17C-23	C-3C-13C-17C-19C-23	C-13C-17C-23	۱۳	Exit > Level 6
C-13C-17C-23	C-3C-13C-17C-19C-23	C-13C-17C-23	۱۷	Exit > Level 6
C-3C-19	C-3C-19	C-3C-13C-17C-19C-23	۱۹	
C-13C-17C-23	C-3C-13C-17C-19C-23	C-13C-17C-23	۲۳	Exit > Level 6
تکرار ۷				
C-3C-19	C-3C-19	C-3C-19	۲	Exit > Level 7
C-3C-19	C-3C-19	C-3C-19	۱۹	Exit > Level 7

جدول ۴. مفهوم‌سازی (کدها) موانع صنعت ساخت چهارم در توسعه مسکن ایران

Table 4. Conceptualization (codes) of barriers to the construction 4.0 industry in Iranian housing development

تم	ساب تم	کد
اجتماعی-فرهنگی	تغییر و پذیرش	<ul style="list-style-type: none"> • مقاومت در برابر تغییر • باور و نگرش منفی به تکنولوژی های جدید • عدم اعتماد به فرآیندهای صنعتی سازی • نگرش عدم نیاز به کسب مهارت های جدید در صنعت ساخت مسکن • کم ارزش انگاری ساخت پیشرفته
	آگاهی و آموزش	<ul style="list-style-type: none"> • عدم آگاهی و دانش لازم در مورد مزایا و قابلیت های صنعت ساخت چهارم • ناآشنایی بازیگران (Actors) همچون مهندسين برای تشویق و ترغیب کارفرماها به صنعت ساخت چهارم • ناآشنایی اساتید دانشگاه برای جریان سازی • بی توجهی متولیان به آگاهی بخشی و آموزش های تخصصی • ضعف در تبدیل دانش نظری به عملی
	سنت	<ul style="list-style-type: none"> • چیرگی رویه و فرهنگ ساخت سنتی • چیرگی یا تأثیرات سنت های محلی در انتخاب روش های ساخت مسکن • عدم تطابق بین شیوه های جدید و قدیمی ساخت • مقاومت فرهنگی در برابر نوآوری • چالش های فلسفی در تعریف ارزش ها
	نابرابری	<ul style="list-style-type: none"> • نابرابری های اجتماعی و اقتصادی • وجود رقابت های غیرسازنده بین شرکت های ساخت مسکن • گرانی قیمت انگاری ورود به این صنعت • نگرش مصرف گرایانه
	نوآوری و بهره برداری	<ul style="list-style-type: none"> • فقدان فرهنگ سازی بهره برداری از صنعت ساخت تکنولوژیک • عدم وجود ریسک پذیری در حوزه ساخت مسکن • ضعف در ترویج صنعت ساخت تکنولوژیک
	هم افزایی	<ul style="list-style-type: none"> • عدم فرهنگ سازی مؤثر برای عموم جامعه • عدم تمایل به انطباق با راه حل های بومی

ادامه جدول ۴.

Table 4 continued.

تم	ساب تم	کد
اقتصادی	توسعه	<ul style="list-style-type: none"> • بالا بودن هزینه های آموزشی برای مهارت آموزی • عدم سرمایه گذاری در توسعه مهارت ها و توانمندی های نیروی کار
	بازار	<ul style="list-style-type: none"> • تأثیر رقابت در قیمت گذاری و کاهش حاشیه سود • مشکلات در دسترسی به بازارهای فروش برای محصولات جدید
سرمایه گذاری در تحقیق		<ul style="list-style-type: none"> • عدم سرمایه گذاری در تحقیق و توسعه • سرمایه گذاری های اولیه بالا برای پیاده سازی تکنولوژی های جدید • فقدان رقابت تکنولوژیکی در صنعت ساخت مسکن • نبود سرمایه گذاری کافی برای توسعه تکنولوژی های مرتبط
	حمایتی	<ul style="list-style-type: none"> • عدم اختصاص یارانه به پروژه های مرتبط • عدم حمایت مالی از صنایع مرتبط با صنعت چهارم • فقدان مشوق های مالی • عدم سرمایه گذاری نهادهای دولتی در تجاری سازی دستاوردهای پژوهشی
	ریسک و بی ثباتی	<ul style="list-style-type: none"> • ریسک بالای سرمایه گذاری در حوزه صنعت ساخت مسکن چهارم • طولانی بودن دوره بازگشت سرمایه در پروژه های صنعتی جدید • عدم توجه اقتصادی سرمایه گذاری در تکنولوژی های جدید نسبت به روش های سنتی • تأثیر نوسانات اقتصادی و غیرقابل پیش بینی بودن شرایط بازار بر تصمیمات سرمایه گذاری • تأثیر تغییرات سیاسی و اقتصادی بر برنامه های توسعه و سرمایه گذاری • نوسانات نرخ ارز • سوداگرانه بودن بازار زمین
	تامین مالی	<ul style="list-style-type: none"> • عدم دسترسی به منابع مالی و اعتباری کافی برای پروژه های نوآورانه • محدودیت های مالی در اجرای پروژه های مسکن چهارم • عدم تخصیص بودجه به شرکت های فعال در توسعه صنعت چهارم مسکن • فقدان سیستم های اقتصادی برای توجیه پذیری اجرای صنعت ساخت چهارم • محدودیت ها در جذب سرمایه گذاری خارجی در بخش ساخت مسکن

ادامه جدول ۴.

Table 4 continued.

تم	ساب تم	کد
قانونی-مقرراتی	اجرایی	• مشکلات صدور و تسهیل مجوز
		• فساد و عدم شفافیت در فرآیندهای اجرای پروژه‌ها
		• پیچیدگی‌های حقوقی در رابطه با قراردادهای و توافقات بین طرفین
		• حاکمیت مجموعه‌های پیچیده از قوانین و مقررات مربوط به ساخت مسکن
تعارضات و تداخل		• تعارض قوانین و مقررات بین نهادی
		• تداخل سیستم‌ها و مقررات مربوط به صنعت ساختمان
		• محدودیت‌های قانونی در واردات تکنولوژی‌های نوین و مواد اولیه
		• عدم وضوح در قوانین مرتبط با مالکیت زمین و حقوق مالکانه
تدوین و به‌روزرسانی		• عدم به‌روزرسانی قوانین و مقررات مربوط به تکنولوژی‌های نوین
		• خلأ سازوکارهای مناسب برای شناسایی و حذف قوانین منسوخ یا مانع
		• فقدان ضابطه‌های شفاف برای بهره‌برداری از صنعت ساخت چهارم
حمایتی		• نبود تسهیلات حمایتی حقوقی یا قانونی از شرکت‌های ساخت نوآور و آوانگارد
		• فقدان قوانین کافی برای حمایت از نوآوری و تکنولوژی‌های جدید
		• فقدان استانداردهای معتبرسازی
استانداردها		• فقدان استانداردهای محیط زیستی
		• عدم وجود استانداردهای مرتبط برای تجهیزات و مصالح ساختمانی
زیرساختی (نرم‌افزاری و سخت‌افزاری)	انرژی	• عدم دسترسی به شبکه انرژی پایدار
		• عدم تنوع در منابع انرژی
	پشتیبانی	• فقدان سیستم‌های مدیریت پروژه پیشرفته
		• ضعف در هماهنگی و یکپارچگی طراحی • کمبود مراکز ارائه خدمات و پشتیبانی
داده‌ها و اطلاعات		• کمبود زیرساخت‌های دیجیتال
		• محدودیت در دسترسی به داده‌ها در پروژه‌ها
		• عدم یکپارچگی تکنولوژی‌های اطلاعاتی
		• کمبود داده‌های دقیق و به‌روز
		• چالش‌های مرتبط با امنیت داده‌ها و حریم خصوصی
		• نقص در بسترهای دیجیتال و تکنولوژی اطلاعات مناسب برای مدیریت ساخت مسکن
		• فرسودگی و ناکارآمدی تجهیزات موجود ساخت مسکن
فناورانه		• محدودیت‌های تکنولوژی محلی
		• عدم دسترسی محدود به ابزار و تجهیزات صنعت ساخت چهارم
		• عدم وجود آزمایشگاه‌های پیشرفته
		• عدم تطبیق نرم‌افزارها با نیازهای خاص پروژه‌ها
		• ضعف در قابلیت‌های هوشمند و سیستم‌های تحلیل داده
		• نبود سیستم‌های پیشرفته برای ارزیابی و پایش صنعت ساخت مسکن

ادامه جدول ۴.

Table 4 continued.

تم	ساب تم	کد
نهادی-اداری	سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی	• فقدان برنامه جامع به برنامه‌ریزی و آمایش مسکن
		• فقدان برنامه‌ریزی استراتژیک برای دستیابی به صنعت ساخت چهارم
		• فقدان برنامه ملی برای بهره‌برداری از صنعت ساخت چهارم
		• ضعف و تعارض در برنامه‌ها و سیاست‌های حمایتی دولتی
مدیریت اجرایی		• مدیریت ناکارآمد پروژه‌ها
		• مدیریت تغییر ناکارآمد
		• نبود سازوکارهای مؤثر برای مدیریت نوآوری و تکنولوژی‌های نوین
		• عدم وجود انگیزه و همراهی در بین تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان
ساختاری		• بوروکراسی پیچیده
		• کمبود شفافیت در فرآیندهای دولتی و اداری
		• تضاد و عدم هماهنگی بین سازمان‌ها و نهادهای مختلف دولتی و غیردولتی در حوزه ساخت
		• فقدان سیستم مؤثر انتقال تجربه در نهادهای مرتبط
همکاری		• نبود همکاری بین‌المللی و انتقال دانش
		• ضعف در مشارکت و همکاری با شرکت‌های تکنولوژی و دانش‌بنیان‌ها
		• فقدان قطب‌های فنی و علمی تکنولوژیک برای توسعه و ارتقاء صنعت چهارم ساخت مسکن
		• ارتباطات ضعیف بین نهادهای مطالعاتی-تحقیقاتی و متولیان اجرایی در ساخت مسکن
منابع		• ضعف در توسعه منابع انسانی و نیروهای تخصصی
		• فقدان فضای مناسب برای آموزش و به روز کردن دانش نیروی کار
		• ضعف در بهره‌گیری از قابلیت‌های تکنولوژی اطلاعات و ارتباطات برای توسعه مهارت‌ها و کارآیی
اطلاع‌رسانی		• عدم اطلاع‌رسانی کافی به ذینفعان در مورد قوانین و مقررات موجود
		• همراهی ضعیف انجمن‌های مرتبط و جامعه مهندسی برای تحقق صنعت ساخت چهارم
تجربیات		• تجربیات منفی گذشته در اجرای پروژه‌های مشابه
		• عدم توجه به ارزیابی‌های محیط‌زیستی در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی

جدول ۵. تعیین سطوح مؤلفه‌ها

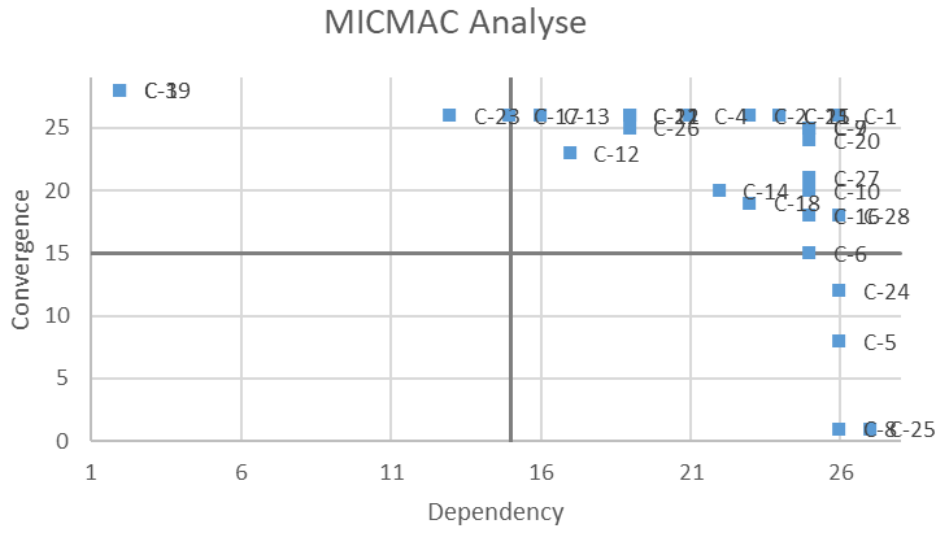
Table 5. Determination of component levels

سطح ۱	بازار	انرژی
سطح ۲	تغییر و پذیرش	نوآوری و بهره‌برداری
سطح ۳	هم‌افزایی	توسعه
سطح ۴	آگاهی و آموزش	مدیریت اجرایی
سطح ۵	نابرابری	ریسک و بی‌ثباتی
سطح ۶	سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی	منابع
سطح ۷	سنت	تجربیات
		تکنولوژیکی
		استانداردها
		سرمایه‌گذاری در تحقیق
		حمایتی
		همکاری
		اجرائی
		داده‌ها و اطلاعات
		و
		اطلاع‌رسانی
		تعارضات و تداخل
		تدوین و به‌روزرسانی
		پشتیبانی
		تأمین مالی
		حمایتی نهادی

جدول ۶. تحلیل MICMAC

Table 6. MICMAC analysis

ردیف	ساب تم	وابستگی	همگرایی	ردیف	ساب تم	وابستگی	همگرایی
۱	تغییر و پذیرش	۲۶	۲۶	۱۵	ساختاری	۲۴	۲۶
۲	آگاهی و آموزش	۲۳	۲۶	۱۶	همکاری	۲۵	۱۸
۳	سنت	۲	۲۸	۱۷	منابع	۱۵	۲۶
۴	نابرابری	۲۱	۲۶	۱۸	اطلاع‌رسانی	۲۳	۱۹
۵	نوآوری و بهره‌برداری	۲۶	۸	۱۹	تجربیات	۲	۲۸
۶	هم‌افزایی	۲۵	۱۵	۲۰	اجرائی	۲۵	۲۴
۷	توسعه	۲۵	۲۵	۲۱	تعارضات و تداخل	۲۴	۲۶
۸	بازار	۲۶	۱	۲۲	تدوین و به‌روزرسانی	۱۹	۲۶
۹	سرمایه‌گذاری در تحقیق	۲۵	۲۵	۲۳	حمایتی نهادی	۱۳	۲۶
۱۰	حمایتی مالی	۲۵	۲۰	۲۴	استانداردها	۲۶	۱۲
۱۱	ریسک و بی‌ثباتی	۱۹	۲۶	۲۵	انرژی	۲۷	۱
۱۲	تأمین مالی	۱۷	۲۳	۲۶	پشتیبانی	۱۹	۲۵
۱۳	سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی	۱۶	۲۶	۲۷	داده‌ها و اطلاعات	۲۵	۲۱
۱۴	مدیریت اجرایی	۲۲	۲۰	۲۸	تکنولوژیکی	۲۶	۱۸



شکل ۳. تحلیل MICMAC.

Figure 3. MICMAC analysis.