System Engineering and Productivity/ 2025/ Vol. 5/ No. 4/ 45-69

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2025.2064025.1337

Development of an Integrated Sustainability and Resilience Model for Appropriate Smart Technology Implementation in Small and Medium Enterprises Under Crisis Conditions

Mehdi Namdarzadegan [1], **Ali Bozorgi-Amiri** [2*]

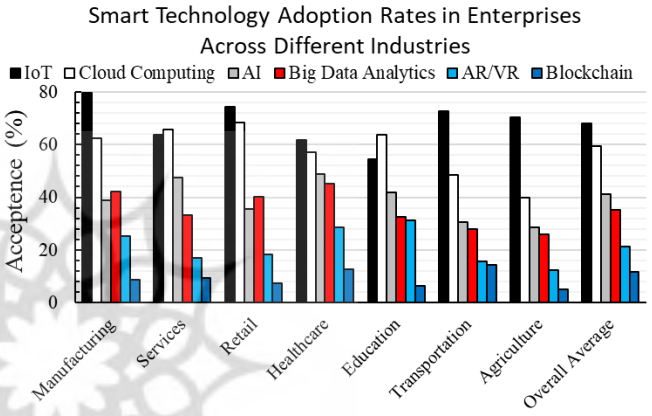
[1] Ph.D. Student, Faculty of Industrial Engineering, Alborz Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

[2] Associate Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Technologies with higher scalability demonstrate greater implementation success under crisis conditions.
- Internet of Things (IoT) demonstrated the highest adoption rate.
- The proposed model predicts smart technology implementation success under crisis conditions with 89.2% accuracy.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 24 June 2025
Revised: 22 July 2025
Accepted: 4 August 2025
Available online: 4 August 2025
*Correspondence: alibozorgi@ut.ac.ir
How to cite this article:
Namdarzadegan, M., Bozorgi-Amiri, A., (2025). Development of an integrated sustainability and resilience model for appropriate smart technology implementation in small and medium enterprises under crisis conditions. *System Engineering and Productivity*, 5 (4), 45-69.

Keywords:
Small and Medium-Sized Enterprises
Smart Technologies
Sustainability
Resilience
Deep Reinforcement Learning

ABSTRACT

Small and medium enterprises (SMEs) encounter significant challenges in digital transformation during various crises, including economic shocks and supply chain disruptions. This research develops an integrated sustainability and resilience model for smart technology implementation in SMEs under crisis conditions. The methodology employs an innovative combination of Real Options Theory (ROT) with Deep Reinforcement Learning (DRL) algorithms. Through an exploratory-analytical study, data from 85 small enterprises were collected and analyzed. Fifteen key criteria affecting the sustainability and resilience of smart technology implementation were identified and categorized into organizational factors, technological characteristics, and environmental factors. Structural equation modeling was utilized to analyze relationships between these criteria and mediating variables of technology absorption capacity and change management capability. Real options modeling was conducted using the binomial tree method, followed by the development of a reinforcement learning model to optimize smart technology implementation strategies. Results demonstrate that smart technologies with high scalability, adaptability, and operational efficiency exhibit greater implementation success during crisis conditions, with Internet of Things achieving the highest adoption rate among examined technologies. The proposed model predicts smart technology implementation success under crisis conditions with 89.2% accuracy. This research provides a decision support system enabling enterprise managers to formulate sustainable and resilient strategies for smart technology implementation under severe uncertainty conditions.

2538-2195/© 2026 The Authors. Published by University of Eyvanekey. This is an open-access article under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license.

1. Introduction

Small and medium enterprises (SMEs) are important economic movers in both developed and developing economies, contributing significantly to employment, innovation, and economic growth. These firms are, however, very vulnerable to crisis scenarios, including economic recessions, pandemic outbreaks, supply chain disruptions, and market volatility. The COVID-19 pandemic, in particular, demonstrated the vulnerability of SMEs to exogenous shocks and highlighted the digital transformation as a resilience strategy.

New smart technologies like Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), cloud computing, blockchain, augmented/virtual reality (AR/VR), and big data analytics have immense potential in enhancing SME operational competences and business models. In spite of this potential, technology adoption under crisis conditions has its unique challenges, with failure rates exceeding 80% due to the absence of feasible and sustainable implementation strategies.

While previous research has extensively explored technology adoption in stable business environments, it leaves a significant knowledge gap on how SMEs can adopt smart technologies in a sustainable and resilient way during crisis situations. To address this gap, this research develops a composite model that combines sustainability (the dynamic of maintaining continued and effective technology use) with resilience (the ability to adapt, modify, or abandon technologies in response to environmental discontinuities) (Alkhodair & Alkhudhayr, 2025; Awad & Martín-Rojas, 2024; Durst & Henschel, 2021; Gregurec et al., 2021; Guo et al., 2020; Kannan & Gambetta, 2023; Kaňovská & Bumberová, 2021; Khurana et al., 2022; Klein & Todesco, 2021; Matarazzo et al., 2021; Mick et al., 2024; Sagala & Őri, 2025; Valenza & Damiano, 2025; Zamani, 2022).

2. Methodology

The theoretical foundation of this study integrates two synergistic theories: Real Options Theory (ROT) and Deep Reinforcement Learning (DRL).

Real Options Theory presents some analytical frameworks to evaluate and manage investments under uncertainty. Unlike traditional investment appraisal techniques (e.g., Net Present Value), ROT values the flexibility of decision-making for managers, which allows organizations to modify their strategy in response to environmental changes. In technology management, ROT helps in identifying and estimating various implementation options, including deferral options (postponing investment), staging options (investing in stages), scaling options (altering implementation size), and abandonment options (abandoning unsuccessful implementations).

Deep Reinforcement Learning combines deep neural networks and reinforcement learning to enable learning of optimal policies in dynamic environments that have large state spaces. In DRL, an agent learns through interactions with the environment and receives rewards or penalties that guide its actions. The approach is very suitable to model complex decisions under uncertain environments as it enables strategy optimization adaptively based on the dynamics in the environment.

By integrating these approaches, our model captures both the value of flexibility in technology investment decisions (through ROT) and the ability to optimize investment strategies in uncertain, dynamic environments (through DRL).

This research employed a multi-stage mixed-methods design:

1. **Conceptual Framework Development:** Based on extensive literature review, we developed a conceptual framework identifying factors affecting sustainability and resilience in smart technology adoption. The framework categorized factors into organizational dimensions (digital readiness, strategic alignment, organizational culture, required skills, implementation cost), technological characteristics (adaptability, scalability, operational efficiency, technical support, reliability), and environmental factors (competitive pressure, government support, supply chain integration, market dynamics, regulatory requirements).
2. **Quantitative Data Collection:** Data were collected from 85 SMEs across seven industries (manufacturing, food processing, apparel, electronics, chemical, metals, and pharmaceutical) through structured questionnaires. These enterprises had implemented at least one smart technology during crisis conditions (defined as periods of significant market volatility, supply chain disruption, or operational constraints).
3. **Structural Equation Modeling:** We used structural equation modeling to investigate relations between ascertained factors and two mediating variables: technology absorption capacity and change

management capability. The analysis enabled the identification of direct and indirect effects on implementation success.

4. **Real Options Modeling:** Using the binomial tree method, we modeled four implementation options: deferral, staging, scaling, and abandonment. The modeling took into account implementation costs, anticipated benefits, and volatility under crisis conditions.
5. **Deep Reinforcement Learning Model Development:** A DRL model was built with the Proximal Policy Optimization algorithm to optimize technology implementation plans under different crisis situations. The model was trained on past implementation data and artificial crisis situations.
6. **Model Validation:** The combined model was validated with out-of-sample data from 15 SMEs that have implemented smart technologies in recent crisis times.

3. Results and discussion

Our results unveil some important insights:

1. **Critical Success Factors:** Among organizational factors, strategic alignment (β=0.72, p<0.001) and digital readiness (β=0.68, p<0.001) had strongest influence on implementation success. Among technological characteristics, scalability (β=0.75, p<0.001), adaptability (β=0.71, p<0.001), and operational efficiency (β=0.69, p<0.001) were most salient.
2. **Technology Adoption Trends:** Internet of Things had the largest cumulative adoption rate (55%), followed by cloud computing (44%), big data analytics (36%), artificial intelligence (33%), augmented/virtual reality (24%), and blockchain (17%). The levels of adoption varied by industry, with manufacturing having the largest IoT adoption (70%) and agriculture having the lowest (40%).
3. **Implementation Functions:** Technology implementation varied significantly across organizational functions, with operations/production recording the highest implementation levels (approximately 75% in auto manufacturing), followed by sales/marketing, supply chain, human resources, and R&D.
4. **Mediating Variables:** Technology absorption capacity and change management capability significantly mediated the relationship between organizational/technological factors and implementation success (indirect effect=0.43, p<0.01).
5. **Real Options Value:** The real options approach discovered tremendous value in implementation flexibility during crisis conditions, with scaling options providing the highest value (27% more than traditional NPV), followed by staging options (21% more) and deferral options (16% more).
6. **DRL Model Performance:** The DRL model was 89.2% accurate in predicting implementation success under different crisis conditions, outperforming traditional decision models (75.3% accurate) and single-approach models (ROT: 81.5%, regression models: 79.8%).

This research has several theoretical and practical implications:

- This integration of sustainability and resilience concepts represents a novel conceptual framework to understand technology adoption under the crisis context.
- The combination of ROT and DRL represents a methodological improvement in decision-making modeling under uncertainty in complicated scenarios.
- The identification of mediating variables (technology absorption capacity and change management capacity) complements existing technology adoption models by highlighting organizational learning processes.
- SMEs should prioritize high scalability, flexibility, and efficiency of operations technologies during crisis conditions.
- Implementation plans should incorporate flexibility options, particularly scaling options that allow the scope of implementation to be modified according to changing conditions.
- Technology absorption capacity and change management capability must be developed by organizations as important organizational competencies for sustainable and resilient technology implementation.
- The decision support system developed in this research provides SME managers with a practical tool for evaluating and

optimizing technology implementation strategies under uncertainty.

4. Conclusion

This research closes a significant knowledge gap in understanding how SMEs can deploy smart technologies in a sustainable and resilient way during crisis situations. By integrating ROT and DRL approaches, we developed a model that successfully predicts implementation success and provides practical assistance in the governance of technology investments under uncertainty. Future research needs to resolve the long-term effect of crisis-driven technology adoption on organizational performance, investigate industry-specific implementation patterns, and extend the model to emerging technologies and crisis situations. In addition, comparative research across various economic settings would allow a more nuanced comprehension of how institutional environments influence sustainable and resilient technology adoption in SMEs. In short, with SMEs continuing to face increasing environmental turbulence and technological disruption, the ability to implement smart technologies in a sustainable and resilient way will be a final source of competitive advantage and long-term sustainability.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have had equal roles and contributions to the article.

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

Alkhodair, M., & Alkhudhayr, H. (2025). Harnessing Industry 4.0 for SMEs: Advancing smart manufacturing and logistics for sustainable supply chains. *Sustainability, 17*(3), Article 813. https://doi.org/10.3390/su17030813

Awad, J. A., & Martín-Rojas, R. (2024). Digital transformation influence on organisational resilience through organisational learning and innovation. *Journal of Innovation and Entrepreneurship, 13*(1), Article 69. https://doi.org/10.1186/s13731-024-00405-4

Durst, S., & Henschel, T. (2021). COVID-19 as an accelerator for developing stronger businesses? Insights from Estonian small firms. *Journal of the International Council for Small Business, 2*(1), 1–29. https://doi.org/10.1080/26437015.2020.1859935

Gregurec, I., Tomičić Furjan, M., & Tomičić-Pupek, K. (2021). The impact of COVID-19 on sustainable business models in SMEs. *Sustainability, 13*(3), Article 1098. https://doi.org/10.3390/su13031098

Guo, H., Yang, Z., Huang, R., & Guo, A. (2020). The digitalization and public crisis responses of small and medium enterprises: Implications from a COVID-19 survey. *Frontiers of Business Research in China, 14*, Article 19. https://doi.org/10.1186/s11782-020-00087-1

Kannan, S., & Gambetta, N. (2023). Technology-driven sustainability in small and medium-sized enterprises: A systematic literature review. *Journal of Small Business Strategy, 33*(3), 1–28. https://doi.org/10.53703/001c.126636

Kaňovská, L., & Bumberová, V. (2021). The differences in the propensity of providing smart services by SMEs from the electrical engineering industry with regard to their cooperation and innovation flexibility. *Sustainability, 13*(9), Article 5008. https://doi.org/10.3390/su13095008

Khurana, I., Dutta, D. K., & Ghura, A. S. (2022). SMEs and digital transformation during a crisis: The emergence of resilience as a second-order dynamic capability in an entrepreneurial ecosystem. *Journal of Business Research, 150*, 623–641. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.06.048

Klein, V. B., & Todesco, J. L. (2021). COVID-19 crisis and SMEs responses: The role of digital transformation. *Knowledge and Process Management, 28*(2), 117–133. https://doi.org/10.1002/kpm.1660

Matarazzo, M., Penco, L., Profumo, G., & Quaglia, R. (2021). Digital transformation and customer value creation in Made in Italy SMEs: A dynamic capabilities perspective. *Journal of Business Research, 123*, 642–656. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.10.033

Mick, M. M. A. P., Kovaleski, J. L., & Chiroli, D. M. D. G. (2024). Sustainable digital transformation roadmaps for SMEs: A systematic literature review. *Sustainability, 16*(19), Article 8551. https://doi.org/10.3390/su16198551

Sagala, G. H., & Őri, D. (2025). Exploring digital transformation strategy to achieve SMEs resilience and antifragility: A systematic literature review. *Journal of Small Business & Entrepreneurship, 37*(3), 495–524. https://doi.org/10.1080/08276331.2024.2392080

Valenza, G., & Damiano, R. (2025). Enacting resilience in small and medium enterprises following the sustainability path: A systematic literature review. *Strategic Change, 34*(2), 237–252. https://doi.org/10.1002/jsc.2608

Zamani, S. Z. (2022). Small and medium enterprises (SMEs) facing an evolving technological era: A systematic literature review on the adoption of technologies in SMEs. *European Journal of Innovation Management, 25*(6), 735–757. https://doi.org/10.1108/EJIM-07-2021-0360

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۵/ شماره ۴/ صفحه ۴۵-۶۹

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2025.2064025.1337

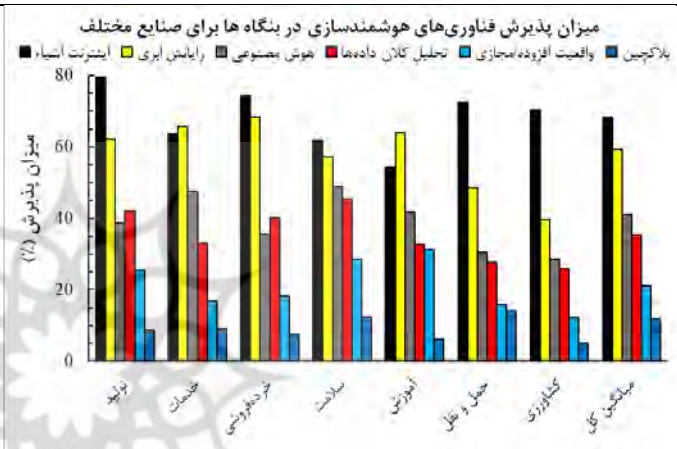
توسعه مدل ترکیبی پایداری و انعطاف‌پذیری برای پیاده‌سازی فناوری هوشمندسازی مناسب در بنگاه‌های کوچک و متوسط تحت شرایط بحرانی

مهدی نامدارزادگان [۱]، علی بزرگی امیری [۲*]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- فناوری‌هایی که قابلیت مقیاس‌پذیری بالاتری دارند، در شرایط بحرانی موفقیت بیشتری در پیاده‌سازی نشان می‌دهند.
- اینترنت اشیاء، بالاترین میزان پذیرش در بنگاه‌ها را داشت.
- مدل پیشنهادی با دقت ۸۹/۲٪ موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط بحرانی را پیش‌بینی می‌کند.

چکیده

بنگاه‌های کوچک و متوسط (SME) در دوران بحران‌های مختلف همچون شوک‌های اقتصادی و اختلالات زنجیره تأمین با چالش‌های جدی در تحول دیجیتال خود مواجه می‌شوند. این پژوهش به توسعه یک مدل ترکیبی پایداری و انعطاف‌پذیری برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط تحت شرایط بحرانی می‌پردازد. روش‌شناسی این پژوهش شامل ترکیب نوآورانه تئوری گزینه‌های واقعی (ROT) با الگوریتم‌های یادگیری عمیق تقویتی (DRL) است. در قالب یک مطالعه اکتشافی-تحلیلی، داده‌های ۸۵ بنگاه کوچک، جمع‌آوری و تحلیل شد. ۱۵ معیار کلیدی مؤثر بر پایداری و انعطاف‌پذیری پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه شناسایی شد که در سه دسته عوامل سازمانی، ویژگی‌های فناوری و عوامل محیطی طبقه‌بندی شدند. با استفاده از تکنیک مدل‌سازی معادلات ساختاری، رابطه بین این معیارها و متغیرهای میانجی ظرفیت جذب فناوری و قابلیت مدیریت تغییر مورد تحلیل قرار گرفت. مدل‌سازی گزینه‌های واقعی با روش درخت دوجمله‌ای انجام شد. سپس یک مدل یادگیری تقویتی برای بهینه‌سازی استراتژی‌های پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی توسعه یافت. نتایج نشان می‌دهد فناوری‌های هوشمندسازی که قابلیت مقیاس‌پذیری بالا، قابلیت انطباق‌پذیری بالا و کارآرایی عملیاتی بالا دارند، در شرایط بحرانی موفقیت بیشتری در پیاده‌سازی در بنگاه نشان می‌دهند که در این تحقیق، از بین فناوری‌های موردبررسی اینترنت اشیاء، بالاترین میزان پذیرش را داشت. مدل پیشنهادی با دقت ۸۹/۲٪ قادر به پیش‌بینی موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط بحرانی است. این پژوهش با ارائه یک سیستم پشتیبان تصمیم، به مدیران بنگاه‌ها کمک می‌کند تا استراتژی‌های پایدار و انعطاف‌پذیر برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط عدم قطعیت شدید تدوین نمایند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

*نویسنده مسئول:

alibozorgi@ut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

بنگاه‌های کوچک و متوسط

فناوری‌های هوشمندسازی

پایداری

انعطاف‌پذیری

یادگیری عمیق تقویتی

۲۱۹۵-۲۵۳۸/© ۲۰۲۶ نویسندگان. منتشرشده توسط دانشگاه ایوان‌کی. این یک مقاله با دسترسی آزاد تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) است.

۱- مقدمه

بنگاه‌های کوچک و متوسط به‌عنوان موتور محرک توسعه اقتصادی و نوآوری در سراسر جهان شناخته می‌شوند و بیش از ۹۰٪ از کسب‌وکارهای جهان را تشکیل می‌دهند (Alkhodair & Alkhudhayr, 2025). با این‌حال، این بنگاه‌ها در شرایط بحرانی مانند همه‌گیری کووید-۱۹، تحریم‌های اقتصادی، اختلالات زنجیره تأمین و تغییرات ناگهانی بازار، آسیب‌پذیرتر از شرکت‌های بزرگ هستند (Awad & Martín-Rojas, 2024). طبق گزارش‌های اخیر حدود ۷۰٪ از بنگاه‌های کوچک و متوسط در کشورهای درحال‌توسعه در دوران همه‌گیری کووید-۱۹ با کاهش درآمد حداقل ۵۰٪ مواجه شدند (Dwivedi et al., 2022).

در چنین شرایطی، پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی می‌تواند به افزایش انعطاف‌پذیری و توان رقابتی بنگاه‌های کوچک و متوسط کمک کند (Gregurec et al., 2021). این فناوری‌ها، شامل اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، رایانش ابری، بلاکچین و واقعیت افزوده/مجازی، پتانسیل ایجاد مدل‌های کسب‌وکار نوآورانه، بهینه‌سازی فرآیندها و افزایش چابکی سازمانی را دارند (Kannan & Gambetta, 2025). بااین‌حال، انتخاب و پیاده‌سازی این فناوری‌ها در شرایط بحرانی و عدم قطعیت شدید، چالش‌های خاص خود را دارد. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نرخ شکست پروژه‌های پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط در شرایط بحرانی به بیش از ۸۰٪ می‌رسد (Guo et al., 2020) که عمدتاً ناشی از فقدان استراتژی‌های پایدار و انعطاف‌پذیر است.

علیرغم اهمیت موضوع، پژوهش‌های اندکی به‌طور خاص بر پیاده‌سازی فناوری هوشمندسازی در شرایط بحرانی تمرکز کرده‌اند. مطالعات قبلی در زمینه انتخاب فناوری در بنگاه‌های کوچک و متوسط عمدتاً بر جنبه‌های مختلفی همچون معیارهای انتخاب فناوری، ریسک‌های پیاده‌سازی و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین متمرکز بوده‌اند. اما شکاف قابل‌توجهی در زمینه مدل‌سازی تصمیمات پیاده‌سازی فناوری در شرایط بحرانی و با در نظر گرفتن هم‌زمان پایداری و انعطاف‌پذیری وجود دارد (Kannan & Gambetta, 2025). مطالعات اخیر در حوزه مدیریت فناوری (Kannan & Gambetta, 2023) نشان می‌دهد که دو رویکرد نظری می‌توانند برای مدل‌سازی تصمیمات پیاده‌سازی فناوری تحت شرایط عدم قطعیت شدید مفید باشند: تئوری گزینه‌های واقعی و یادگیری عمیق تقویتی. تئوری گزینه‌های واقعی، که اصالتاً از حوزه مالی نشأت گرفته، چارچوب مفهومی مناسبی برای تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم قطعیت شدید فراهم می‌کند (Kaňovská & Bumberová, 2021). این تئوری امکان ارزش‌گذاری انعطاف‌پذیری و امکان تعویق، گسترش، تغییر یا ترک سرمایه‌گذاری‌ها را در شرایط متغیر فراهم می‌سازد. از سوی دیگر، یادگیری عمیق تقویتی به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین رویکردهای هوش مصنوعی، قابلیت مدل‌سازی و بهینه‌سازی تصمیمات پیچیده در محیط‌های پویا و نامطمئن را دارد (Matarazzo et al., 2021). بااین‌وجود، مطالعات اندکی به ترکیب این دو رویکرد برای مدل‌سازی تصمیمات پیاده‌سازی فناوری پرداخته‌اند (Melo et al., 2023). هدف اصلی این پژوهش، توسعه مدلی ترکیبی است که با تلفیق تئوری گزینه‌های واقعی و یادگیری عمیق تقویتی، به بنگاه‌های کوچک و متوسط کمک کند تا استراتژی‌های پایدار و انعطاف‌پذیری برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط بحرانی تدوین نمایند.

اهداف اختصاصی این پژوهش عبارت‌اند از:

۱) شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر پایداری و انعطاف‌پذیری پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط تحت شرایط بحرانی

۲) توسعه یک مدل ارزیابی مبتنی بر تئوری گزینه‌های واقعی برای ارزش‌گذاری گزینه‌های مختلف پیاده‌سازی فناوری

۳) طراحی و پیاده‌سازی یک الگوریتم یادگیری عمیق تقویتی برای بهینه‌سازی تصمیمات پیاده‌سازی فناوری تحت شرایط عدم قطعیت

۴) توسعه و اعتبارسنجی یک مدل ترکیبی پایداری و انعطاف‌پذیری برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی

۵) طراحی یک سیستم پشتیبان تصمیم کاربردی برای کمک به مدیران بنگاه‌های کوچک و

متوسط در انتخاب و پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط بحرانی

نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از:

۱) ترکیب تئوری گزینه‌های واقعی با الگوریتم‌های یادگیری عمیق تقویتی برای مدل‌سازی تصمیمات پیاده‌سازی فناوری

۲) توسعه یک چارچوب جامع برای ارزیابی پایداری و انعطاف‌پذیری پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط بحرانی

۳) ارائه یک سیستم پشتیبان تصمیم عملی برای کمک به مدیران بنگاه‌های کوچک و متوسط در شرایط واقعی کسب‌وکار.

۲- مروری بر ادبیات پژوهش

۲-۱- پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط

فناوری‌های هوشمندسازی، مجموعه گسترده‌ای از فناوری‌های نوظهور را شامل می‌شوند که داده‌ها را به اطلاعات ارزشمند برای تصمیم‌گیری تبدیل می‌کنند. این فناوری‌ها شامل اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، رایانش ابری، بلاکچین، واقعیت افزوده/مجازی و تحلیل کلان داده‌ها می‌شوند (Mick et al., 2024) این فناوری‌ها پتانسیل تحول اساسی در روش‌های عملیاتی و مدل‌های کسب‌وکار بنگاه‌های کوچک و متوسط را دارند. طبق مطالعات (Durst & Henschel, 2021) بنگاه‌هایی که در فناوری‌های دیجیتال سرمایه‌گذاری کرده‌اند، در دوران همه‌گیری کووید-۱۹ عملکرد بسیار بهتری نسبت به همتایان خود داشته‌اند. مطالعات متعددی به بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش و پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط پرداخته‌اند (Zamani, 2022). چارچوبی جامع برای نقشه راه تحول دیجیتال پایدار در بنگاه‌های کوچک و متوسط ارائه کردند که عوامل سازمانی، فناورانه و محیطی را در برمی‌گیرد (Valenza & Damiano, 2025) عوامل سازمانی (مانند حمایت مدیریت ارشد، منابع مالی و دانش فنی)، عوامل فناورانه (مانند سازگاری، پیچیدگی و مزیت نسبی) و عوامل محیطی (مانند فشار رقابتی و حمایت دولت) را در پذیرش فناوری‌های نوین در بنگاه‌های کوچک و متوسط مؤثر دانستند. بااین‌حال، بیشتر مطالعات پیشین در شرایط ثبات نسبی محیط کسب‌وکار انجام‌شده‌اند و کمتر به پیاده‌سازی فناوری در شرایط بحرانی توجه کرده‌اند (Petropoulou et al., 2024). در شرایط بحرانی، عدم قطعیت افزایش می‌یابد، محدودیت منابع تشدید می‌شود، و فشارهای زمانی برای تصمیم‌گیری افزایش می‌یابد(Mick et al., 2024). مطالعات نشان داد که در شرایط بحرانی، بنگاه‌های کوچک و متوسط نیازمند توسعه قابلیت‌های پویای مرتبه دوم هستند تا بتوانند به‌طور مؤثر به بحران‌ها پاسخ دهند. آن‌ها استدلال می‌کنند که انعطاف‌پذیری دیجیتال یک قابلیت پویای مرتبه دوم است که به بنگاه‌های کوچک و متوسط کمک می‌کند تا در شرایط بحران، هم به بقا و هم به نوآوری بپردازند (Matarazzo et al., 2021). مطالعه دیگری نشان داد که بنگاه‌های کوچک و متوسط در شرایط بحرانی نیازمند استراتژی‌های انعطاف‌پذیر برای تحول دیجیتال هستند که امکان سازگاری با تغییرات سریع محیطی را فراهم کند (Kannan & Gambetta, 2025).

۲-۲- پایداری و انعطاف‌پذیری در پیاده‌سازی فناوری

پایداری و انعطاف‌پذیری دو مفهوم کلیدی در مدیریت سرمایه‌گذاری‌های فناوری هستند. پایداری به توانایی بنگاه در حفظ و ادامه استفاده از فناوری علیرغم تغییرات محیطی اشاره دارد، درحالی‌که انعطاف‌پذیری به توانایی تغییر، تعدیل یا حتی کنار گذاشتن فناوری در پاسخ به تغییرات محیطی اشاره می‌کند (Guo et al., 2020). ترکیب این دو ویژگی می‌تواند به بنگاه‌ها کمک کند تا در شرایط بحرانی، هم ثبات و هم توانایی سازگاری با شرایط جدید را داشته باشند.

مفهوم "انعطاف‌پذیری و پادشکنندگی دیجیتال" به‌عنوان توانایی بنگاه در برابر شوک‌های دیجیتال، بازیابی از آن‌ها و تکامل از طریق نوآوری دیجیتال مطرح می‌شود (Alkhodair & Alkhudhayr, 2025) این پژوهشگران سه بعد برای انعطاف‌پذیری دیجیتال شناسایی کردند: (۱) قابلیت‌های جذب فناوری، (۲) قابلیت‌های مدیریت تغییر، و (۳) قابلیت‌های نوآوری مستمر.در مطالعه دیگری تأکید می‌شود که انعطاف‌پذیری در بنگاه‌های کوچک و متوسط

نیازمند ترکیبی از سازگاری، پایداری، فناوری و مدیریت ریسک است (Awad & Martín-Rojas, 2024) در زمینه پایداری پیاده‌سازی فناوری، مطالعه دیگری پنج عامل کلیدی را شناسایی کرد: (۱) همسویی استراتژیک، (۲) حمایت مدیریت ارشد، (۳) تخصیص منابع کافی، (۴) مدیریت تغییر مؤثر، و (۵) ارزیابی عملکرد. این عوامل به بنگاه‌ها کمک می‌کنند تا علیرغم چالش‌های محیطی، به استفاده مستمر و اثربخش از فناوری‌های جدید ادامه دهند (Guo et al., 2020). در مطالعه دیگری خود نشان داده شد که پایداری و انعطاف‌پذیری در بنگاه‌های کوچک و متوسط مستلزم رویکردی چندبعدی است که ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را در برمی‌گیرد (Kannan & Gambetta, 2025). باوجوداین، مطالعات ارزشمند، هنوز شکاف قابل‌توجهی در زمینه مدل‌سازی ترکیبی پایداری و انعطاف‌پذیری در پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی، به‌ویژه در شرایط بحرانی، وجود دارد.

۲-۳- تئوری گزینه‌های واقعی در مدیریت فناوری

تئوری گزینه‌های واقعی، یک چارچوب تصمیم‌گیری مالی و استراتژیک است که مفاهیم گزینه‌های مالی را به دارایی‌ها و فرصت‌های تجاری واقعی (غیرمالی) گسترش می‌دهد. این تئوری ارزش انعطاف‌پذیری مدیریتی را در شرایط عدم قطعیت به رسمیت می‌شناسد. تئوری گزینه‌های واقعی یک رویکرد تحلیلی برای ارزیابی و مدیریت سرمایه‌گذاری‌ها در شرایط عدم قطعیت است که از مفاهیم گزینه‌های مالی الهام گرفته است (Klein & Todesco, 2021) این تئوری، انعطاف‌پذیری در تصمیم‌گیری را ارزش‌گذاری می‌کند و به مدیران امکان می‌دهد در واکنش به تغییرات محیطی، تصمیمات خود را تعدیل کنند. پنج نوع گزینه واقعی رایج عبارت‌اند از: گزینه تعویق (امکان به تأخیر انداختن سرمایه‌گذاری)، گزینه مرحله‌ای کردن (امکان سرمایه‌گذاری تدریجی)، گزینه مقیاس‌پذیری (امکان تغییر مقیاس سرمایه‌گذاری)، گزینه تغییر (امکان تغییر جهت یا کاربرد)، و گزینه خروج (امکان کنار گذاشتن سرمایه‌گذاری). در حوزه مدیریت فناوری، تئوری گزینه‌های واقعی به‌طور فزاینده‌ای برای تحلیل سرمایه‌گذاری‌های فناوری به کار گرفته می‌شود (Matarazzo et al., 2021). در مطالعه‌ای دیگر در مورد فناوری‌های پایداری‌محور در بنگاه‌های کوچک و متوسط نشان داده شد که استفاده از رویکرد گزینه‌های واقعی می‌تواند به این بنگاه‌ها کمک کند تا ریسک‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری در فناوری‌های جدید را مدیریت کنند (Melo et al., 2023). این رویکرد می‌تواند ارزش انعطاف‌پذیری در تصمیمات پیاده‌سازی فناوری را به‌طور مؤثرتری نسبت به روش‌های سنتی ارزیابی سرمایه‌گذاری (مانند ارزش فعلی خالص) محاسبه کند.

در یک مطالعه نشان که استفاده از تئوری گزینه‌های واقعی در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک، به‌ویژه در محیط‌های با عدم قطعیت بالا، می‌تواند به بهبود عملکرد بنگاه‌های کوچک و متوسط منجر شود (Zamani, 2022) در مطالعه‌ای دیگر (Őri et al., 2024) نیز نقش تئوری گزینه‌های واقعی را در طراحی نقشه راه تحول دیجیتال پایدار در بنگاه‌های کوچک و متوسط بررسی کردند و نشان دادند که این رویکرد می‌تواند به مدیران کمک کند تا با اتخاذ رویکردهای یادگیری تکراری، ریسک‌های مرتبط با نوآوری را مدیریت کنند. باوجود مزایای تئوری گزینه‌های واقعی ، این رویکرد با چالش‌هایی نیز مواجه است. چالش اصلی، پیچیدگی محاسباتی در مدل‌سازی گزینه‌های متعدد و وابسته به هم است. علاوه بر این، تئوری گزینه‌های واقعی نیازمند تخمین پارامترهایی مانند نوسانات و ارزش انتظاری است که در دنیای واقعی کسب‌وکار، تخمین دقیق آن‌ها دشوار است.

۲-۴- یادگیری عمیق تقویتی در مدیریت فناوری

یادگیری عمیق تقویتی یک زیرشاخه از یادگیری ماشین است که یادگیری تقویتی و یادگیری عمیق را با هم ترکیب می‌کند. در این روش، عامل‌ها با تعامل با محیط خود و از طریق پاداش‌ها یاد می‌گیرند که چگونه تصمیم‌گیری کنند. این سیستم از شبکه‌های عصبی عمیق برای پردازش داده‌های پیچیده و یادگیری استراتژی‌ها استفاده می‌کند. ترکیبی از یادگیری تقویتی سنتی و شبکه‌های عصبی عمیق است که امکان یادگیری سیاست‌های بهینه در محیط‌های پیچیده، پویا و با فضای

حالت گسترده فراهم می‌کند (Klein & Todesco, 2021). در یادگیری عمیق تقویتی، یک عامل از طریق تعامل با محیط و دریافت پاداش یا جریمه، به‌تدریج سیاست بهینه را می‌آموزد. شبکه‌های عصبی عمیق به‌عنوان تقریب‌زننده‌های تابع ارزش یا تابع سیاست استفاده می‌شوند. در حوزه مدیریت فناوری و تصمیم‌گیری‌های کسب‌وکار، یادگیری عمیق تقویتی به‌تدریج در حال کاربرد است.در یک مطالعه دیگر محققان نشان دادند (Awad & Martín-Rojas, 2024) که از یادگیری عمیق تقویتی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار بنگاه‌های کوچک و متوسط در مواجهه با بحران‌های مختلف استفاده کردند و نشان دادند که این رویکرد می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر در شرایط عدم قطعیت منجر شود. در مطالعه‌ای دیگر در مورد تحول دیجیتال بنگاه‌های کوچک و متوسط در دوران بحران، نقش یادگیری عمیق تقویتی را در توسعه قابلیت‌های پویای مرتبه دوم بررسی کردند و نشان دادند که این رویکرد عملکرد بهتری نسبت به روش‌های سنتی دارد (Mick et al., 2024) مزیت اصلی یادگیری عمیق تقویتی ، توانایی آن در یادگیری از تجربه و بهینه‌سازی تصمیمات در محیط‌های پیچیده و متغیر است. این ویژگی به‌ویژه برای مدل‌سازی تصمیمات پیاده‌سازی فناوری در شرایط بحرانی مناسب است. بااین‌حال، یادگیری عمیق تقویتی نیز با چالش‌هایی مانند نیاز به داده‌های زیاد برای آموزش، پیچیدگی محاسباتی و دشواری تفسیر تصمیمات مواجه است (Petropoulou et al., 2024).

۲-۵- شکاف پژوهشی و مشارکت نظری

مرور ادبیات نشان می‌دهد که علیرغم اهمیت پایداری و انعطاف‌پذیری در پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط، به‌ویژه در شرایط بحرانی، هنوز شکاف‌های قابل‌توجهی در این حوزه وجود دارد:

- بیشتر مطالعات پیشین بر پذیرش و پیاده‌سازی فناوری در شرایط عادی متمرکز بوده‌اند و کمتر به پیاده‌سازی فناوری در شرایط بحرانی توجه کرده‌اند (Alkhodair & Alkhudhayr, 2025).
- رویکردهای موجود عمدتاً یا بر پایداری یا بر انعطاف‌پذیری تمرکز کرده‌اند، اما کمتر به ترکیب این دو بعد در یک چارچوب واحد پرداخته‌اند (Valenza & Damiano, 2025).
- تئوری گزینه‌های واقعی و یادگیری عمیق تقویتی هر یک به‌تنهایی پتانسیل زیادی برای مدل‌سازی تصمیمات پیچیده در شرایط عدم قطعیت دارند، اما مطالعات اندکی به ترکیب این دو رویکرد پرداخته‌اند. این پژوهش، با ترکیب نوآورانه تئوری گزینه‌های واقعی و یادگیری عمیق تقویتی در یک مدل ترکیبی پایداری و انعطاف‌پذیری، به پر کردن این شکاف‌ها می‌پردازد. این مدل ترکیبی، مزایای هر دو رویکرد را ترکیب می‌کند: تئوری گزینه‌های واقعی امکان ارزش‌گذاری گزینه‌های مختلف پیاده‌سازی فناوری را فراهم می‌کند، درحالی‌که یادگیری عمیق تقویتی امکان بهینه‌سازی استراتژی‌های پیاده‌سازی در محیط‌های پویا و با عدم قطعیت بالا را فراهم می‌سازد. همچنین، با استفاده از داده‌های واقعی از ۸۵ بنگاه کوچک و متوسط در ۷ صنعت مختلف، این مطالعه درک جامع‌تری از عوامل مؤثر بر پایداری و انعطاف‌پذیری پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط بحرانی ارائه می‌دهد.

۳- چارچوب مفهومی و فرضیات پژوهش

بر اساس مرور ادبیات و باهدف توسعه یک مدل ترکیبی پایداری و انعطاف‌پذیری، چارچوب مفهومی پژوهش در شکل **۱** نشان داده‌شده است. این چارچوب، عوامل مؤثر بر پایداری و انعطاف‌پذیری پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی ، متغیرهای میانجی، و رابطه آن‌ها با موفقیت پیاده‌سازی فناوری را نشان می‌دهد. همچنین، نقش تئوری گزینه‌های واقعی و یادگیری عمیق تقویتی در مدل‌سازی و بهینه‌سازی تصمیمات پیاده‌سازی فناوری نشان داده‌شده است. بر اساس چارچوب مفهومی، فرضیات پژوهش به شرح زیر تدوین‌شده‌اند:

- **فرضیه ۱:** عوامل سازمانی (آمادگی دیجیتال، سازگاری استراتژیک، فرهنگ‌سازمانی، مهارت‌های موردنیاز و هزینه‌های پیاده‌سازی) تأثیر مثبت و معناداری بر موفقیت پیاده‌سازی

فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط تحت شرایط بحرانی دارند.

- **فرضیه ۲:** ویژگی‌های فناوری (قابلیت انطباق‌پذیری، مقیاس‌پذیری، کارآیی عملیاتی، پشتیبانی فنی و قابلیت اطمینان) تأثیر مثبت و معناداری بر موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط تحت شرایط بحرانی دارند.
- **فرضیه ۳:** عوامل محیطی (مقررات، فشار رقابتی، حمایت‌های دولتی، زیرساخت‌های منطقه‌ای اکوسیستم همکاران) تأثیر معناداری بر موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط تحت شرایط بحرانی دارند.
- **فرضیه ۴:** ظرفیت جذب فناوری به‌عنوان متغیر میانجی در رابطه بین عوامل سازمانی و موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی عمل می‌کند.
- **فرضیه ۵:** قابلیت مدیریت تغییر به‌عنوان متغیر میانجی در رابطه بین عوامل سازمانی و موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی عمل می‌کند.
- **فرضیه ۶:** فشار بحران به‌عنوان متغیر تعدیل‌کننده در رابطه بین متغیرهای مستقل و موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی عمل می‌کند.
- **فرضیه ۷:** مدل ترکیبی پایداری و انعطاف‌پذیری مبتنی بر تئوری گزینه‌های واقعی و یادگیری عمیق تقویتی، قدرت پیش‌بینی بالاتری نسبت به مدل‌های سنتی تصمیم‌گیری برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط بحرانی دارد.

۴- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از روش‌شناسی ترکیبی (آمیخته) با رویکرد اکتشافی-تحلیلی استفاده می‌کند. مراحل اصلی انجام پژوهش در شکل **۲** نشان داده‌شده است. در فاز اول، مطالعات مقدماتی و مرور ادبیات انجام می‌شود. در فاز دوم جمع‌آوری داده‌ها و در فاز شناسایی معیارهای هوشمندسازی انجام می‌گردد.در فاز چهارم مدل مفهومی و توسعه داده می‌شود و فرضیات پژوهش مشخص می‌شود. در فاز پنجم تجزیه‌وتحلیل‌های آماری انجام می‌شود و در فاز ششم، توسعه مدل هوشمند انجام می‌شود. در فاز هفتم توسعه سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری انجام می‌شود در فاز هشتم و نهایی هم اعتبار سنجی و نتیجه‌گیری پژوهش انجام می‌شود.

۴-۱- جامعه و نمونه آماری

جامعه آماری این پژوهش شامل بنگاه‌های کوچک و متوسط فعال در ایران است که طبق تعریف وزارت صنعت، معدن و تجارت، بنگاه‌هایی با کمتر از ۲۵۰ نفر کارکنان هستند. با استفاده از روش نمونه‌گیری طبقه‌ای هدفمند، ۸۵ بنگاه کوچک و متوسط از ۷ صنعت مختلف (تولید، خدمات، خرده‌فروشی، سلامت، آموزش، حمل‌ونقل، و کشاورزی) طی دوره ۳ ساله موردمطالعه قرار گرفتند. این دوره زمانی به‌طور استراتژیک انتخاب‌شده است تا دوره‌های پیش، حین و پس از بحران همه‌گیری کووید-۱۹ را پوشش دهد. جدول **۱** توزیع نمونه‌های موردمطالعه را بر اساس صنعت و اندازه نشان می‌دهد.

۴-۲- روش‌های جمع‌آوری داده

داده‌های این پژوهش با استفاده از روش‌های متعدد جمع‌آوری‌شده‌اند. پس از تجمیع نتایج مرور ادبیات و مصاحبه‌ها، فهرستی از ۴۰ معیار و ۴ متغیر میانجی و ۲ متغیر تعدیل‌کننده و ۱ متغیر وابسته استخراج شد. این فهرست با استفاده از روش دلفی فازی و در دو مرحله با مشارکت ۲۴ خبره (۱۲ مدیر بنگاه کوچک و متوسط، ۸ مشاور فناوری و ۴ پژوهشگر دانشگاهی) پالایش شد. نتیجه این فرآیند، استخراج ۱۵ معیار کلیدی در سه بعد فنی، سازمانی، محیطی و ۲ متغیر میانجی، ۱ متغیر تعدیل‌کننده و ۱ متغیر وابسته بود که در جدول **۲** نشان داده شده‌اند.

۱) **پرسشنامه ساختارمند:** پرسشنامه‌ای با ۴۷ گویه در طیف لیکرت ۵ درجه‌ای برای تعیین معیارها و متغیرهای پژوهش طراحی شد. روایی محتوایی پرسشنامه توسط ۹ متخصص در حوزه

مدیریت فناوری و کسب‌وکارهای کوچک و متوسط تأیید شد. پایایی ابزار با استفاده از آلفای کرونباخ (۰/۸۷) و پایایی ترکیبی (۰/۹۲) مورد تأیید قرار گرفت.

۲) **مصاحبه نیمه‌ساختارمند:** با ۱۲ نفر از مدیران ارشد و میانی بنگاه‌های موردمطالعه، مصاحبه‌های نیمه‌ساختارمند با متوسط زمان ۷۵ دقیقه انجام شد. این مصاحبه‌ها به‌منظور درک عمیق‌تر چالش‌ها، فرصت‌ها و استراتژی‌های پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط بحرانی انجام شد. جدول **۲** متغیرهای پژوهش در قالب معیارها و تعریف عملیاتی هر معیار را نشان می‌دهد.

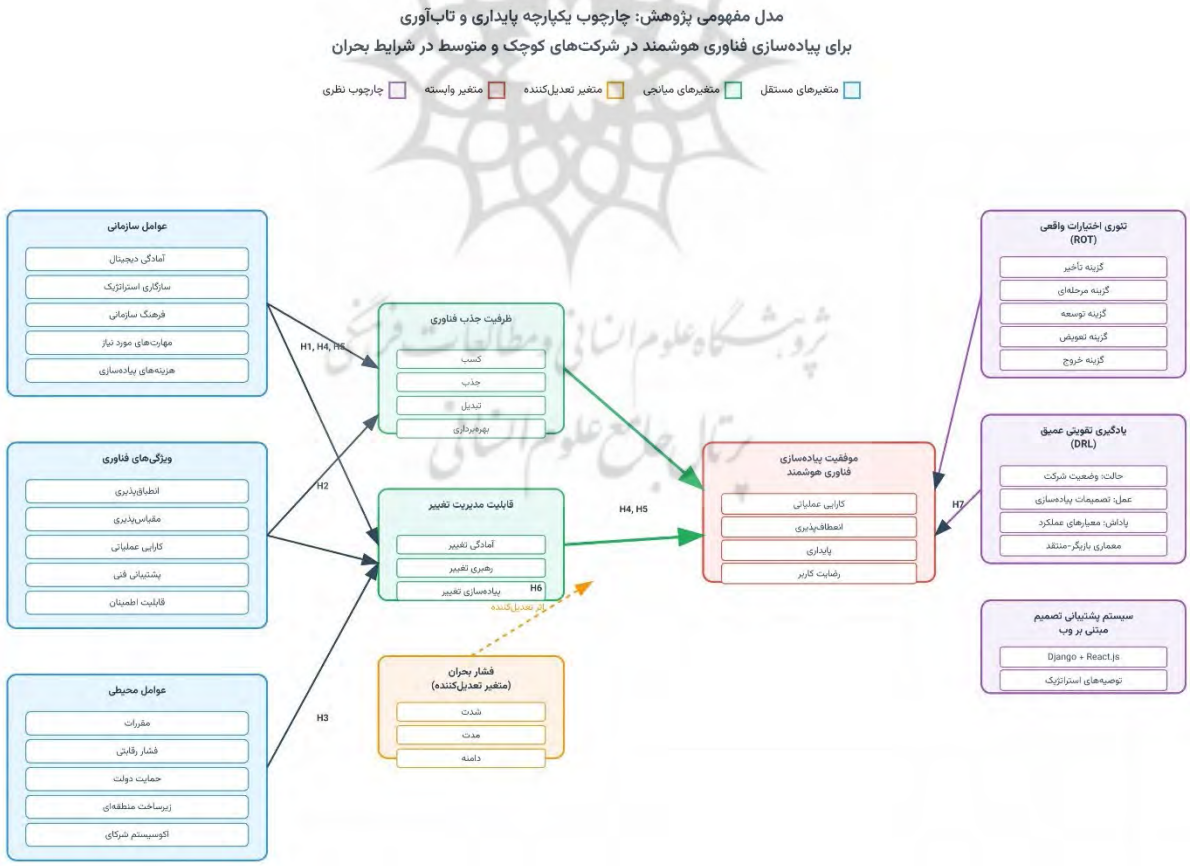
۳) **داده‌های ثانویه:** داده‌های مالی و عملیاتی بنگاه‌ها، گزارش‌های صنعت، و مطالعات موردی موجود در مورد پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط ایرانی جمع‌آوری شد.

۴) **مشاهده مستقیم:** در ۱۵ بنگاه منتخب، مشاهده مستقیم فرآیندهای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی انجام شد.

۴-۳- متغیرهای پژوهش و روش‌های سنجش

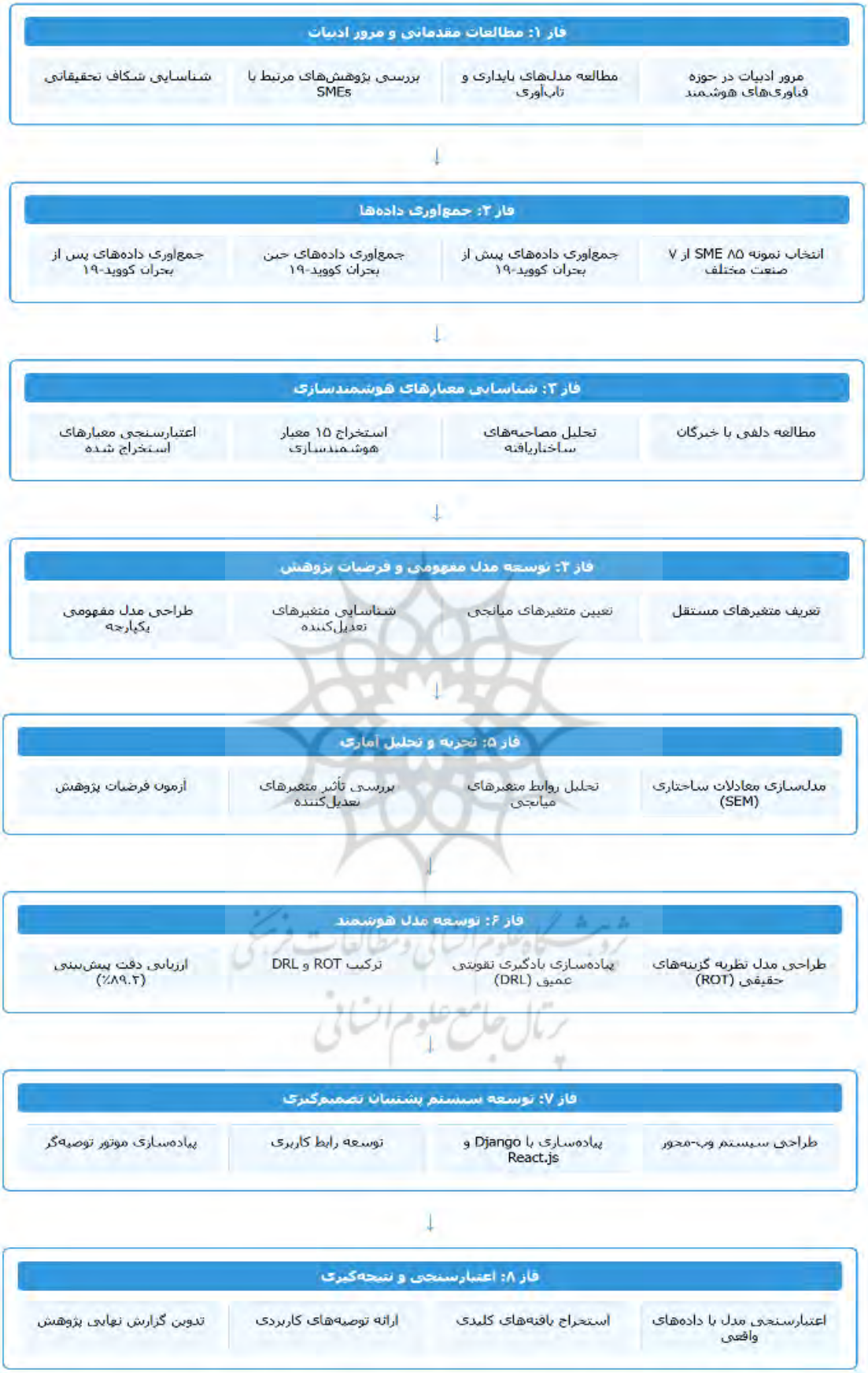
متغیرهای این پژوهش در سه دسته متغیرهای مستقل، میانجی و وابسته طبقه‌بندی‌شده‌اند:

۱) **متغیرهای مستقل:** شامل معیارهای سازمانی (۵ معیار)، ویژگی‌های فناوری (۵ معیار) و عوامل محیطی (۵ معیار) است. سنجش این معیارها با استفاده از گویه‌های استاندارد و بومی‌سازی شده بر اساس ادبیات موضوع و مشارکت خبرگان انجام شد.



شکل ۱. مدل مفهومی پژوهش.

Figure 1. Conceptual model of the research.



شکل ۲. مراحل اصلی انجام پژوهش.

Figure 2. Main steps in conducting research.

جدول ۱. توزیع نمونه‌های موردمطالعه بر اساس صنعت و اندازه

Table 1. Distribution of study samples by industry and size

صنعت	بنگاه‌های کوچک (کمتر از ۵۰ نفر)	بنگاه‌های متوسط (۵۰ تا ۲۵۰ نفر)	مجموع
تولید	۷	۱۲	۱۹
خدمات	۹	۸	۱۷
خرده‌فروشی	۸	۵	۱۳
سلامت	۵	۶	۱۱
آموزش	۴	۵	۹
حمل‌ونقل	۳	۴	۷
کشاورزی	۶	۳	۹
مجموع	۴۲	۴۳	۸۵

جدول ۲. متغیرهای پژوهش در قالب معیارها و تعریف عملیاتی معیارها

Table 2. Research variables in the form of criteria and operational definition of criteria

دسته‌بندی معیار	معیار	تعریف عملیاتی
عوامل سازمانی	آمادگی دیجیتالی	سطح بلوغ دیجیتال بنگاه
	سازگاری استراتژیک	هم‌راستایی فناوری با اهداف راهبردی سازمان
	فرهنگ‌سازمانی	میزان آمادگی سازمان برای پذیرش تغییر
	مهارت‌های موردنیاز	سطح تخصص لازم برای استفاده از فناوری
	هزینه‌های پیاده‌سازی	مجموع هزینه‌های اولیه، آموزش و نگهداری
عوامل فناوری	قابلیت انطباق‌پذیری	میزان سازگاری فناوری با سیستم‌های موجود
	مقیاس‌پذیری	قابلیت توسعه فناوری متناسب با رشد سازمان
	کارآیی عملیاتی	توانایی در کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری
	پشتیبانی فنی	دسترسی به خدمات پشتیبانی و به‌روزرسانی
عوامل محیطی	مقررات	الزامات قانونی مرتبط با استفاده از فناوری
	فشار رقابتی	میزان فشار رقبا برای پذیرش فناوری‌های نوین
	حمایت‌های دولتی	مشوق‌ها و برنامه‌های حمایتی موجود
	زیرساخت‌های منطقه‌ای	وضعیت زیرساخت‌های فناوری در منطقه
	اکوسیستم همکاران	وجود شرکای فناوری در اکوسیستم کسب‌وکار
متغیرهای میانجی	ظرفیت جذب فناوری	اکتساب، جذب، تبدیل، بهره‌برداری
	قابلیت مدیریت تغییر	آمادگی تغییر، رهبری تغییر، پیاده‌سازی تغییر
متغیر تعدیل‌کننده	فشار بحران	شدت، مدت، گستره
متغیر وابسته	موفقیت پیاده‌سازی فناوری هوشمندسازی	کارایی عملیاتی، انعطاف‌پذیری، پایداری، رضایت کاربران

۲) **متغیرهای میانجی:** شامل ظرفیت جذب فناوری و قابلیت مدیریت تغییر است. ظرفیت جذب فناوری با ۴ بعد (اکتساب، جذب، تبدیل و بهره‌برداری) و قابلیت مدیریت تغییر با ۳ بعد (آمادگی تغییر، رهبری تغییر و پیاده‌سازی تغییر) سنجیده شد.

۳) **متغیر تعدیل‌کننده:** فشار بحران به‌عنوان متغیر تعدیل‌کننده با ۳ بعد (شدت، مدت و گستره) سنجیده شد.

۴) **متغیر وابسته:** موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی با ۴ شاخص (کارایی عملیاتی، انعطاف‌پذیری، پایداری و رضایت کاربران) سنجیده شد.

۴-۴- روش‌های تحلیل داده

تحلیل داده‌ها در چندین مرحله انجام شد:

۱) تحلیل عاملی تأییدی (CFA): برای بررسی روایی سازه معیارها و متغیرهای میانجی و وابسته پژوهش، تحلیل عاملی تأییدی با استفاده از نرم‌افزار AMOS 26 انجام شد. شاخص‌های برازش مدل (RMSEA = 0.041، CFI = 0.967، NFI = 0.955، TLI = 0.962) نشان‌دهنده برازش مناسب مدل اندازه‌گیری بود.

۲) مدل‌سازی معادلات ساختاری: برای آزمون فرضیات پژوهش و بررسی روابط بین متغیرها، از مدل‌سازی معادلات ساختاری استفاده شد.

۳) تحلیل گزینه‌های واقعی: برای ارزش‌گذاری گزینه‌های مختلف پیاده‌سازی فناوری (تعویق، مرحله‌ای کردن، مقیاس‌پذیری، تغییر و خروج)، از روش درخت دوجمله‌ای گسترش‌یافته استفاده شد. ارزش هر گزینه با استفاده از $V_{\text{option}} = \max(V_{\text{flexibility}} - I, 0)$ محاسبه شد (V_{option}: ارزش گزینه، $V_{\text{flexibility}}$: ارزش انعطاف‌پذیری، I: هزینه اولیه سرمایه‌گذاری)

۴) یادگیری عمیق تقویتی: برای بهینه‌سازی استراتژی‌های پیاده‌سازی فناوری در شرایط عدم قطعیت، از الگوریتم Actor-Critic عمیق استفاده شد. در این مدل:

- حالت (State): وضعیت فعلی بنگاه (شامل وضعیت بازار، منابع موجود، سطح آمادگی دیجیتال) و محیط (شدت بحران، فشار رقابتی)
- اقدام (Action): تصمیمات پیاده‌سازی فناوری (تعویق، سرمایه‌گذاری، توسعه تدریجی، تغییر، خروج)
- پاداش (Reward): عملکرد کوتاه‌مدت (کارایی عملیاتی) و بلندمدت (انعطاف‌پذیری، پایداری)
- برای پیاده‌سازی یادگیری عمیق تقویتی، از کتابخانه TensorFlow 2.9 و Keras 2.9 در محیط Python 3.9 استفاده شد. معماری شبکه عصبی شامل ۴ لایه پنهان با تابع فعال‌سازی ReLU و ۱۰۲۴، ۵۱۲، ۲۵۶ و ۱۲۸ نورون به ترتیب در هر لایه بود.

۵) تحلیل حساسیت: برای بررسی حساسیت مدل نسبت به تغییرات در پارامترهای ورودی، تحلیل حساسیت با استفاده از روش Monte Carlo با ۱۰،۰۰۰ شبیه‌سازی انجام شد.

۶) اعتبارسنجی متقاطع: برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل، از روش اعتبارسنجی متقاطع k-fold (با k=10) استفاده شد.

۴-۵- توسعه سیستم پشتیبان تصمیم

برای کمک به مدیران بنگاه‌های کوچک و متوسط در پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط بحرانی، یک سیستم پشتیبان تصمیم مبتنی بر وب با استفاده از فریم‌ورک Django و React.js توسعه یافت. این سیستم، مدل ترکیبی پایداری و انعطاف‌پذیری را در یک رابط کاربری ساده و کاربرپسند پیاده‌سازی کرده و به مدیران امکان می‌دهد تا با واردکردن داده‌های خاص کسب‌وکار خود، توصیه‌های استراتژیک برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی دریافت کنند.

۵- نتایج و یافته‌ها

۵-۱- میزان پذیرش فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط

تحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده از ۸۵ بنگاه کوچک و متوسط در ۷ صنعت مختلف (تولید، خدمات، خرده‌فروشی، سلامت، آموزش، حمل‌ونقل و کشاورزی) طی دوره ۳ ساله (یک سال قبل، حین و۱ سال پس از بحران همه‌گیری کووید-۱۹) اطلاعات ارزشمندی در مورد میزان پذیرش فناوری‌های هوشمندسازی ارائه می‌دهد. شکل ۳ نتایج این تحلیل را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که اینترنت اشیاء با ۶۸/۲٪ بالاترین میزان پذیرش را در بین بنگاه‌های کوچک و متوسط دارد، که تقریباً ۶ برابر بیشتر از پایین‌ترین فناوری (بلاکچین با ۱۱٪/۸) است. رایانش ابری در رده دوم با ۵۹/۴٪ قرار دارد. شکاف قابل‌توجه بین فناوری‌های پرکاربرد (اینترنت اشیا و رایانش ابری) و فناوری‌های نوپا (واقعیت افزوده/ مجازی و بلاک چین) نشان‌دهنده تمایل بنگاه به فناوری‌های عملی، قابل‌اجرا و با ریسک کمتر است. این الگو منطقی است چراکه بنگاه‌های کوچک منابع محدودی دارند و به فناوری‌هایی نیاز دارند که سریع نتیجه دهند.

۵-۱-۱- عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری‌های هوشمندسازی

برای درک بهتر دلایل تفاوت در میزان پذیرش فناوری‌های مختلف، رابطه بین عوامل کلیدی شناسایی‌شده در مدل پژوهش و میزان پذیرش هر فناوری مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحلیل در شکل **۴** ارائه‌شده است. این نمودار، اطلاعات ارزشمندی در مورد معیارهای کلیدی مؤثر بر پذیرش فناوری‌ها ارائه می‌دهد. مقیاس‌پذیری قوی‌ترین معیار مثبت برای اینترنت اشیاء (۰/۹۲) و رایانش ابری (۰/۸۸) است، که نشان می‌دهد بنگاه‌ها به فناوری‌هایی تمایل دارند که بتوانند از آن‌ها در مقیاس کوچک شروع کرده و تدریجاً گسترش دهند. مقررات بیشترین تأثیر منفی را بر بلاکچین دارد (۰/۸۵-) که به دلیل عدم وضوح قوانین و نگرانی‌های نظارتی این فناوری است. از سوی دیگر، برای فناوری‌های با میزان پذیرش پایین‌تر (واقعیت افزوده/مجازی و بلاکچین)، موانع مقرراتی (همبستگی منفی قوی)، نیاز به آمادگی دیجیتال بالا و نیاز به قابلیت مدیریت تغییر پیچیده، مهم‌ترین عوامل بازدارنده هستند.

۵-۱-۲- تحلیل نوع صنعت هر بنگاه پذیرش فناوری‌های هوشمندسازی

برای درک بهتر تفاوت‌های نوع صنعت هر بنگاه، در پذیرش فناوری‌های هوشمندسازی، میزان پذیرش هر فناوری در هفت صنعت موردمطالعه تحلیل شد. نتایج این تحلیل در شکل **۵** ارائه‌شده است. این نمودار الگوهای متمایز پذیرش فناوری در صنایع مختلف را آشکار می‌کند. صنعت تولید در پذیرش اینترنت اشیاء پیشتاز است (۷۹٪/۵)، که کاملاً منطقی است چراکه اینترنت اشیاء کاربردهای مستقیم و اثربخشی در مانیتورینگ تجهیزات، اتوماسیون خطوط تولید و مدیریت انبار دارد. صنعت خدمات بالاترین پذیرش رایانش ابری (۶۵/۷٪) و هوش مصنوعی (۴۷/۵٪) را نشان می‌دهد که با ماهیت مشتری‌محور و نیاز به پردازش داده‌های متنوع همخوانی دارد. جالب‌توجه است که صنعت آموزش بالاترین پذیرش واقعیت افزوده/مجازی (۳۱/۲٪) را دارد که با ماهیت تعاملی و بصری فرآیند یادگیری منطبق است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که ماهیت فعالیت هر صنعت و نیازهای خاص آن، تأثیر قابل‌توجهی بر انتخاب و پذیرش فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه دارد.

۵-۱-۳- تحلیل حساسیت: تأثیر بهبود عوامل کلیدی بر موفقیت پیاده‌سازی

به‌منظور شناسایی مهم‌ترین اهرم‌های بهبود موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی، یک تحلیل حساسیت انجام شد. در این تحلیل، تأثیر افزایش ۱۰٪ در هر عامل کلیدی بر افزایش موفقیت پیاده‌سازی هر فناوری محاسبه شد. نتایج این تحلیل در جدول **۳** ارائه‌شده است. این جدول نشان می‌دهد که:

۱) برای اینترنت اشیاء و رایانش ابری، بهبود مقیاس‌پذیری (به ترتیب ۱۱/۶٪+ و ۱۰/۷٪+) و سازگاری استراتژیک (به ترتیب ۱۰/۳٪+ و ۹/۸٪+) بیشترین تأثیر را بر افزایش موفقیت پیاده‌سازی دارند.

۲) برای هوش مصنوعی و تحلیل کلان داده‌ها، بهبود قابلیت مدیریت تغییر (به ترتیب ۱۱/۳٪+ و ۱۰/۶٪+)

۳) و کاهش موانع مقرراتی (به ترتیب ۹/۶٪+ و ۹/۱٪+) بیشترین تأثیر را دارند.

۴) برای بلاکچین، کاهش موانع مقرراتی (۱۲/۶٪+) بیشترین تأثیر را بر افزایش موفقیت پیاده‌سازی دارد.

این یافته‌ها به مدیران بنگاه‌ها کمک می‌کند تا با توجه به نوع فناوری موردنظر برای پیاده‌سازی، بر روی بهبود عوامل کلیدی متناسب با آن فناوری تمرکز کنند و منابع محدود خود را به‌صورت بهینه تخصیص دهند.

۵-۲- شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر پایداری و انعطاف‌پذیری

تحلیل عاملی تأییدی منجر به شناسایی ۱۵ معیار کلیدی مؤثر بر پایداری و انعطاف‌پذیری پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی شد که در سه دسته عوامل سازمانی، ویژگی‌های فناوری و عوامل محیطی طبقه‌بندی شدند. جدول **۴** این عوامل را به همراه بار عاملی و واریانس تبیین شده نشان می‌دهد.

۵-۳- آزمون فرضیات پژوهش

برای آزمون فرضیات پژوهش، از مدل‌سازی معادلات ساختاری استفاده شد. نتایج آزمون فرضیات در جدول **۵** نشان داده‌شده است.نتایج آزمون فرضیات نشان می‌دهد که همه فرضیات پژوهش تأییدشده‌اند. عوامل سازمانی قوی‌ترین تأثیر را بر موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی دارند ($\beta = 0.62$)، پس‌ازآن ویژگی‌های فناوری ($\beta = 0.58$) و عوامل محیطی ($\beta = 0.43$) قرار دارند. همچنین، نقش میانجی ظرفیت جذب فناوری و قابلیت مدیریت تغییر در رابطه بین عوامل سازمانی و موفقیت پیاده‌سازی فناوری تأیید شد.

۵-۴- ارزیابی گزینه‌های واقعی برای پیاده‌سازی فناوری

با استفاده از تئوری گزینه‌های واقعی، ارزش پنج نوع گزینه (تعویق، مرحله‌ای کردن، مقیاس‌پذیری، تغییر و خروج) برای پیاده‌سازی هر یک از فناوری‌های هوشمندسازی محاسبه شد. نتایج این ارزیابی در شکل **۶** نشان داده‌شده است. نتایج ارزش‌گذاری گزینه‌های واقعی بینش‌های استراتژیک مهمی ارائه می‌دهد. برای هوش مصنوعی، استراتژی مرحله‌ای کردن بالاترین ارزش (۱۸۹/۳ میلیون تومان) را دارد که کاملاً منطقی است، چرا که هوش مصنوعی نیاز به یادگیری تدریجی، آموزش داده، و تطبیق با فرآیندهای سازمانی دارد. در مقابل، برای بلاکچین، گزینه تعویق بالاترین ارزش (۱۸۵/۴ میلیون تومان) را دارد که نشان‌دهنده عدم آمادگی فعلی بازار، نبود زیرساخت‌های لازم و ابهامات قانونی این فناوری است. رایانش ابری پایین‌ترین ارزش تعویق (۹۸/۵ میلیون تومان) را دارد که نشان می‌دهد این فناوری برای اجرای فوری و سریع مناسب است و تأخیر در پیاده‌سازی آن فرصت‌های زیادی را از دست می‌دهد.

۵-۵- نتایج الگوریتم یادگیری عمیق تقویتی برای بهینه‌سازی استراتژی‌های پیاده‌سازی فناوری

الگوریتم یادگیری عمیق تقویتی با استفاده از معماری Actor-Critic برای بهینه‌سازی استراتژی‌های پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط مختلف توسعه یافت. این الگوریتم پس از ۵۰۰,۰۰۰ اپیزود آموزش، همگرا شد. شکل **۴** در صفحات قبل، روند همگرایی الگوریتم را نشان می‌دهد. استراتژی‌های بهینه توسط الگوریتم یادگیری عمیق تقویتی برای هر فناوری هوشمندسازی و در شرایط مختلف بحران در جدول **۶** نشان داده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط بحران با شدت کم، استراتژی‌های سرمایه‌گذاری کامل یا پیاده‌سازی مرحله‌ای برای اکثر فناوری‌ها توصیه می‌شود. در شرایط بحران با شدت متوسط، استراتژی‌های پیاده‌سازی مرحله‌ای یا تعویق بیشتر توصیه می‌شود. در شرایط بحران شدید، استراتژی تعویق برای اکثر فناوری‌ها بهینه است، با استثناء رایانش ابری و تحلیل کلان داده‌ها که پیاده‌سازی مرحله‌ای با مقیاس محدود برای آن‌ها توصیه می‌شود.

۵-۶- تحلیل حساسیت

برای درک بهتر تأثیر متغیرهای مختلف بر موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی ، تحلیل حساسیت با استفاده از روش مونت‌کارلو انجام شد. شکل **۷** نتایج تحلیل حساسیت برای متغیرهای کلیدی را نشان می‌دهد. تحلیل حساسیت نکات حیاتی برای مدیریت پیاده‌سازی فناوری در بنگاه‌های کوچک و متوسط فاش می‌کند. قابلیت مقیاس‌پذیری حساس‌ترین متغیر مثبت است (۱۱/۶٪+ برای افزایش، ۱۴/۵٪- برای کاهش) که تأکید می‌کند بنگاه‌های کوچک و متوسط باید بر انتخاب فناوری‌هایی تمرکز کنند که امکان شروع از مقیاس کوچک و گسترش تدریجی را فراهم کنند. شدت بحران تأثیر معکوس و قدرتمندی دارد (۱۳/۴٪- برای افزایش شدت) که نشان می‌دهد شرایط بحرانی به‌طور قابل‌توجهی موفقیت پیاده‌سازی را کاهش می‌دهد. قابلیت مدیریت تغییر نیز متغیر بحرانی است (۱۰۱۰.۲/۲٪+, ۱۳/۱٪-) که اهمیت سرمایه‌گذاری در توانمندی‌های سازمانی و آمادگی کارکنان را نشان می‌دهد. عدم تقارن در تأثیرات (تأثیر منفی بیشتر از مثبت) نشان می‌دهد که اجتناب از اشتباهات مهم‌تر از بهینه‌سازی عوامل مثبت است.

جدول ۳. تأثیر افزایش ۱۰٪ در عوامل کلیدی بر افزایش موفقیت پیاده‌سازی فناوری

Table 3. The impact of a 10% increase in key factors on increasing technology implementation success

عامل کلیدی	اینترنت اشیاء	رایانش ابری	هوش مصنوعی	تحلیل کلان داده‌ها	واقعیت افزوده/مجازی	بلاکچین
مقیاس‌پذیری	۱۱/۶	۱۰/۷	۸/۹	۸/۵	۷/۲	۶/۱
قابلیت مدیریت تغییر	۹/۴	۹/۱	۱۱/۳	۱۰/۶	۸/۵	۷/۸
آمادگی دیجیتال	۹/۸	۹/۵	۸/۷	۸/۲	۷/۵	۶/۹
کاهش موانع مقرراتی	۶/۲	۷/۳	۹/۶	۹/۱	۸/۳	۱۲/۶
سازگاری استراتژیک	۱۰/۳	۹/۸	۸/۹	۸/۶	۷/۸	۷/۱

جدول ۴. عوامل کلیدی مؤثر بر پایداری و انعطاف‌پذیری پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی

Table 4. Key factors affecting the sustainability and flexibility of implementing smart technologies

دسته	معیار	بار عاملی	واریانس تبیین‌شده (٪)
عوامل سازمانی	آمادگی دیجیتالی	۰/۸۳	۱۷/۲
	سازگاری استراتژیک	۰/۹۱	۲۱/۵
	فرهنگ‌سازمانی	۰/۷۸	۱۴/۳
	مهارت‌های موردنیاز	۰/۸۵	۱۸/۴
	هزینه‌های پیاده‌سازی	۰/۷۹	۱۵/۱
ویژگی‌های فناوری	قابلیت انطباق‌پذیری	۰/۸۴	۱۹/۲
	مقیاس‌پذیری	۰/۹۲	۲۲/۴
	کارآیی عملیاتی	۰/۸۷	۲۰/۱
	پشتیبانی فنی	۰/۷۶	۱۳/۸
	قابلیت اطمینان	-۰/۶۹	۱۱/۳
عوامل محیطی	مقررات	-۰/۷۴	۱۲/۵
	فشار رقابتی	۰/۸۱	۱۶/۹
	حمایت‌های دولتی	۰/۷۲	۱۲/۱
	زیرساخت‌های منطقه‌ای	۰/۷۹	۱۵/۲
	اکوسیستم همکاران	۰/۸۳	۱۷/۸

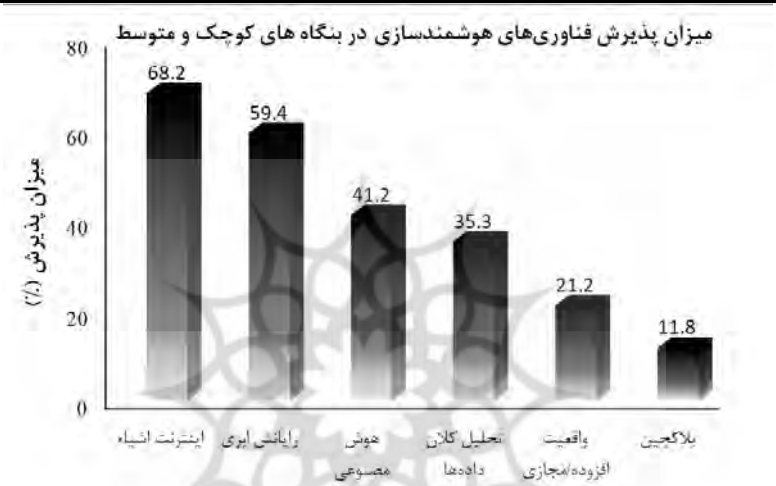
جدول ۵. نتایج آزمون فرضیات پژوهش

فرضیه	ضریب مسیر (β)	p-value	نتیجه
فرضیه ۱: عوامل سازمانی ← موفقیت پیاده‌سازی	۰/۶۲	۰/۰۰۱	تأیید
فرضیه ۲: ویژگی‌های فناوری ← موفقیت پیاده‌سازی	۰/۵۸	۰/۰۰۱	تأیید
فرضیه ۳: عوامل محیطی ← موفقیت پیاده‌سازی	۰/۴۳	۰/۰۱	تأیید
فرضیه ۴: عوامل سازمانی ← ظرفیت جذب فناوری ← موفقیت پیاده‌سازی	۰/۴۶	۰/۰۰۱	تأیید
فرضیه ۵: عوامل سازمانی ← قابلیت مدیریت تغییر ← موفقیت پیاده‌سازی	۰/۳۹	۰/۰۱	تأیید
فرضیه ۶: اثر تعدیل‌کننده فشار بحران	۰/۳۱	۰/۰۲	تأیید
فرضیه ۷: مقایسه قدرت پیش‌بینی مدل ترکیبی با مدل‌های سنتی	-	۰/۰۰۱	تأیید

جدول ۶. استراتژی‌های بهینه پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط مختلف بحران

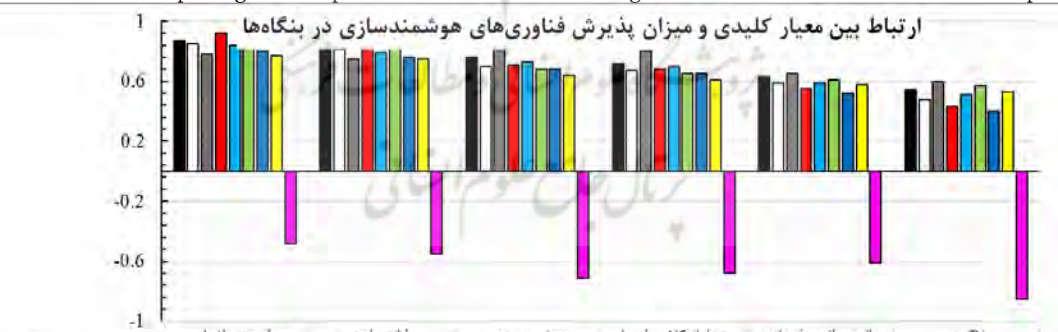
Table 6. Optimal strategies for implementing smart technologies in different crisis situations

فناوری	شدت بحران کم	شدت بحران متوسط	شدت بحران زیاد
اینترنت اشیاء	سرمایه‌گذاری کامل	پیاده‌سازی مرحله‌ای	تعویق و بررسی مجدد
هوش مصنوعی	پیاده‌سازی مرحله‌ای	پیاده‌سازی مرحله‌ای با مقیاس کوچک	تعویق
رایانش ابری	سرمایه‌گذاری کامل	سرمایه‌گذاری با مقیاس محدود	پیاده‌سازی مرحله‌ای
بلاکچین	پیاده‌سازی مرحله‌ای	تعویق	تعویق
واقعیت افزوده/مجازی	سرمایه‌گذاری با مقیاس محدود	تعویق	تعویق
تحلیل کلان داده‌ها	سرمایه‌گذاری کامل	پیاده‌سازی مرحله‌ای	پیاده‌سازی مرحله‌ای با مقیاس کوچک



شکل ۳. نمودار مقایسه میزان پذیرش فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط.

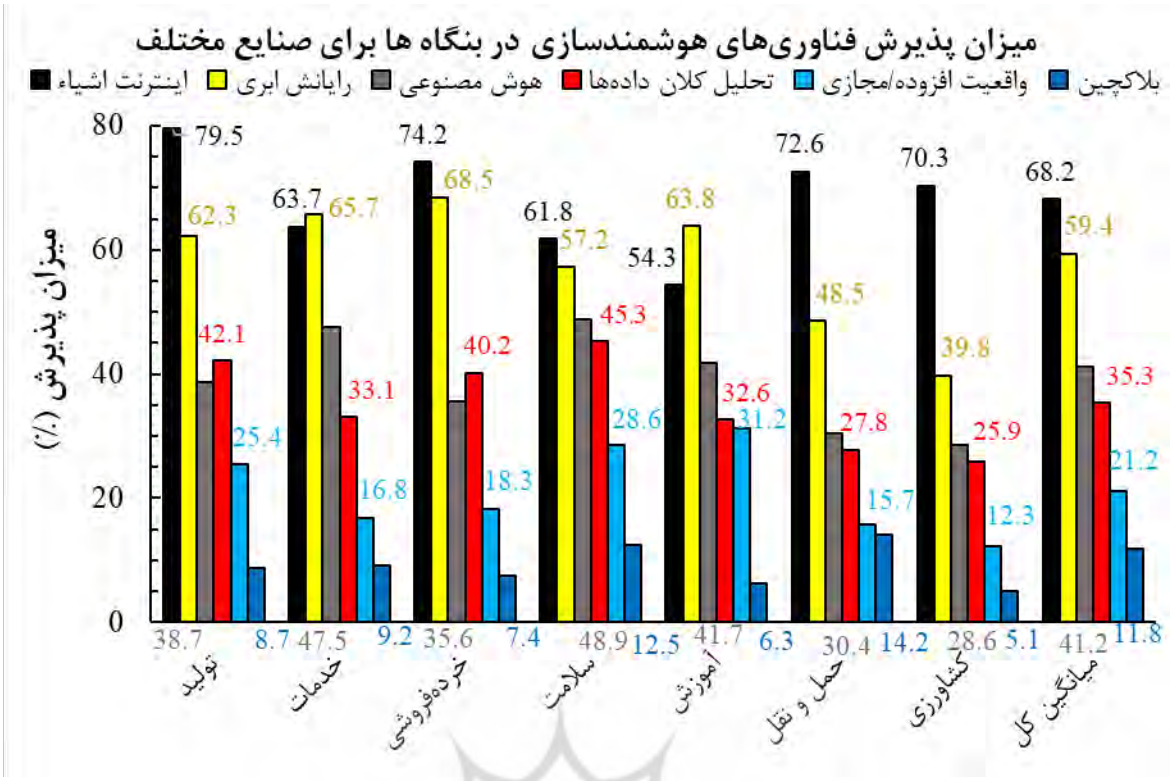
Figure 3. Chart comparing the adoption rate of smart technologies in small and medium-sized enterprises.



	اینترنت اشیاء	رایانش ابری	هوش مصنوعی	تحلیل کلان داده‌ها	واقعیت افزوده/مجازی	بلاکچین
سازگاری استراتژیک	0.87	0.82	0.76	0.72	0.63	0.54
آمادگی دیجیتال	0.85	0.81	0.7	0.67	0.59	0.48
قابلیت مدیریت تغییر	0.78	0.75	0.83	0.8	0.65	0.6
مقیاس‌پذیری	0.92	0.88	0.71	0.68	0.55	0.43
قابلیت انطباق‌پذیری	0.84	0.79	0.73	0.7	0.59	0.51
کارایی عملیاتی	0.89	0.84	0.68	0.65	0.61	0.57
فشار رقابتی	0.8	0.76	0.68	0.65	0.52	0.4
اکوسیستم همکاران	0.77	0.75	0.64	0.61	0.58	0.53
مقررات (تأثیر منفی)	-0.48	-0.55	-0.71	-0.68	-0.61	-0.85

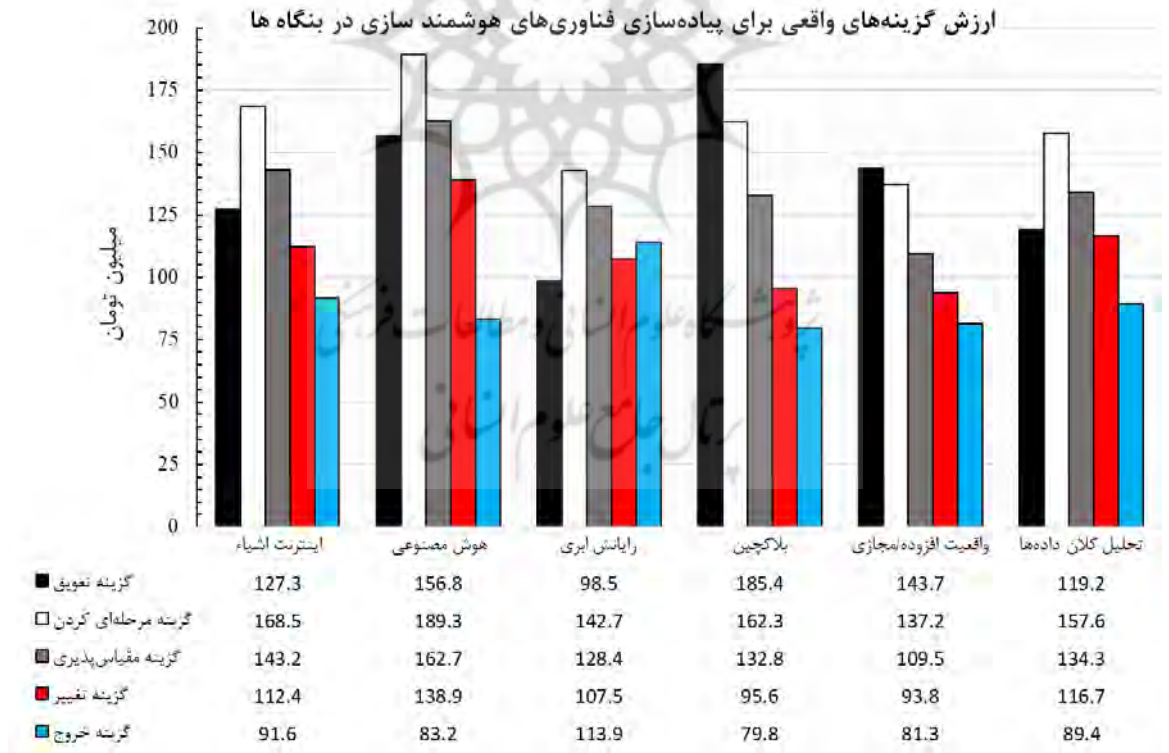
شکل ۴. نمودار ارتباط بین عوامل کلیدی و میزان پذیرش فناوری‌های هوشمندسازی.

Figure 4. Diagram of the relationship between key factors and the adoption rate of smart technologies.



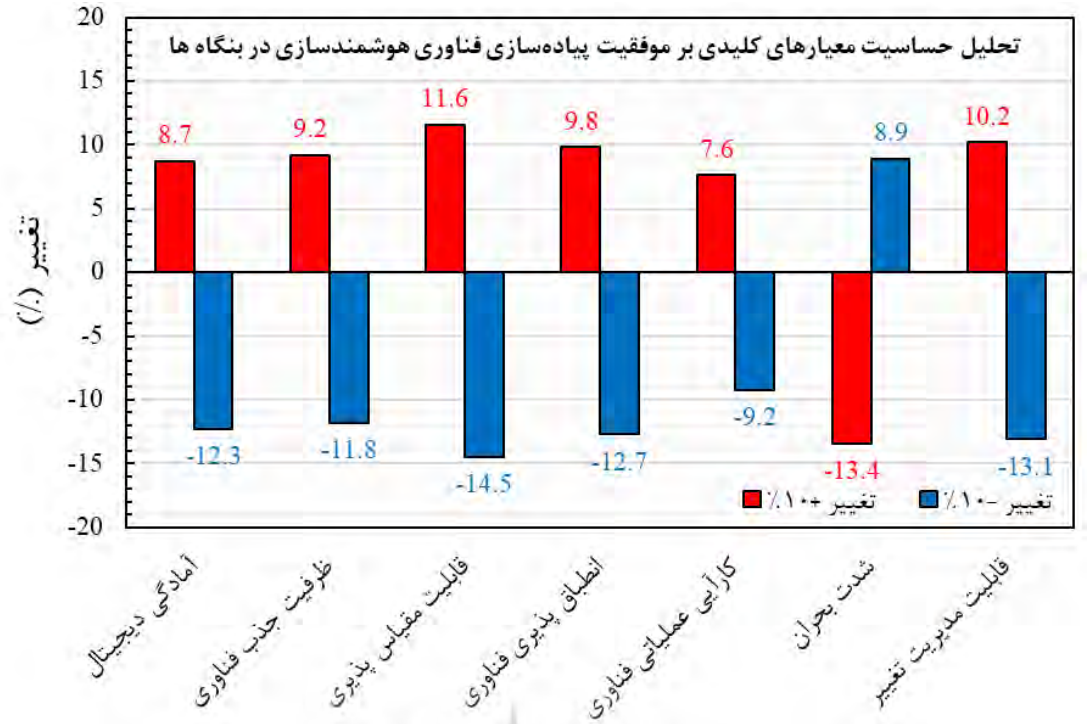
شکل ۵. نمودار میزان پذیرش فناوری‌های هوشمندسازی در صنعت‌های مختلف.

Figure 5. Graph of the adoption rate of smart technologies in different industries.



شکل ۶. نمودار مقایسه ارزش گزینه‌های واقعی برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌ها.

Figure 6. Comparison chart of the value of real options for implementing smart technologies in enterprises.



شکل ۷. نمودار نتایج تحلیل حساسیت متغیرهای کلیدی بر موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی.

Figure 7. Graph of the results of the sensitivity analysis of key variables on the success of implementing smart technologies

۵-۷- سیستم پشتیبان تصمیم مبتنی بر وب

بر اساس مدل ترکیبی پایداری و انعطاف‌پذیری، یک سیستم پشتیبان تصمیم مبتنی بر وب توسعه یافت. این سیستم به مدیران بنگاه‌های کوچک و متوسط امکان می‌دهد تا با واردکردن اطلاعات خاص کسب‌وکار خود و شرایط محیطی، توصیه‌های استراتژیک برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی دریافت کنند.

سیستم پشتیبان تصمیم دارای چهار ماژول اصلی است:

۱) ماژول ارزیابی: ارزیابی وضعیت فعلی بنگاه ازنظر آمادگی دیجیتال، ظرفیت جذب فناوری و قابلیت مدیریت تغییر

۲) ماژول تحلیل ریسک: ارزیابی ریسک‌های مرتبط با پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی مختلف

۳) ماژول تحلیل گزینه‌های واقعی: محاسبه ارزش گزینه‌های مختلف پیاده‌سازی فناوری (تعویق، مرحله‌ای کردن، مقیاس‌پذیری، تغییر و خروج)

۴) ماژول پیشنهاد استراتژی: ارائه استراتژی‌های بهینه پیاده‌سازی فناوری با استفاده از الگوریتم یادگیری عمیق تقویتی

این سیستم با استفاده از وب‌سرویس‌های REST API قابل‌دسترسی است و قابلیت یکپارچه‌سازی با سیستم‌های موجود را دارد.

۶- بحث و تفسیر نتایج

۶-۱- عوامل کلیدی مؤثر بر پایداری و انعطاف‌پذیری پیاده‌سازی فناوری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که معیارهای متعددی بر پایداری و انعطاف‌پذیری پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط تحت شرایط بحرانی تأثیر می‌گذارند. در میان عوامل سازمانی، سازگاری استراتژیک (با بار عاملی ۰/۹۱) و آمادگی دیجیتال (با بار عاملی ۰/۸۳) بیشترین تأثیر را دارند. این یافته با مطالعات قبلی (Alkhodair & Alkhudhayr, 2025) و (Kannan & Gambetta, 2025) همسو است که اهمیت آمادگی دیجیتال و سازگاری استراتژیک را در موفقیت تحول دیجیتال بنگاه‌های کوچک و متوسط تأکید کرده‌اند. در میان عوامل فناوری، مقیاس‌پذیری (با بار عاملی ۰/۹۲) و قابلیت انطباق‌پذیری (با بار عاملی ۰/۸۴) بیشترین تأثیر

را دارند. این یافته نشان می‌دهد که در شرایط بحرانی، فناوری‌هایی که قابلیت تغییر، تعدیل و مقیاس‌پذیری سریع دارند، موفقیت بیشتری در پیاده‌سازی نشان می‌دهند. این یافته با نظریه یکی از محققان قبلی (Khurana et al., 2022) همسو است که بر اهمیت انعطاف‌پذیری فناوری در محیط‌های پویا و متغیر تأکید کرده‌اند. در میان عوامل محیطی، فشار رقابتی (با بار عاملی ۰/۸۱) و اکوسیستم همکاران (با بار عاملی ۰/۸۳) بیشترین تأثیر را دارند. این یافته نشان می‌دهد که حتی در شرایط بحرانی، فشار رقابتی همچنان یک محرک مهم برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی است. همچنین، اکوسیستم می‌تواند به بنگاه‌های کوچک و متوسط کمک کند تا با به اشتراک‌گذاری منابع، دانش و تجربیات، چالش‌های پیاده‌سازی فناوری در شرایط بحرانی را کاهش دهند. نکته جالب‌توجه دیگر، تأثیر منفی مقررات (با بار عاملی ۰/۷۴) بر موفقیت پیاده‌سازی فناوری است. این یافته نشان می‌دهد که با افزایش مقررات، موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی کاهش می‌یابد. بااین‌حال، نتایج تحلیل معادلات ساختاری نشان می‌دهد که این تأثیر منفی می‌تواند باقابلیت مدیریت تغییر بالا و ظرفیت جذب فناوری مناسب تعدیل شود.

۶-۲- ارزش گزینه‌های واقعی در تصمیم‌گیری برای پیاده‌سازی فناوری

نتایج ارزیابی گزینه‌های واقعی نشان می‌دهد که ارزش انعطاف‌پذیری در تصمیمات پیاده‌سازی فناوری قابل‌توجه است. برای مثال، در مورد هوش مصنوعی، ارزش گزینه مرحله‌ای کردن (۱۸۹/۳ میلیون تومان) حدود ۲۱٪ بیشتر از ارزش فعلی خالص (NPV) برآورد شده با روش‌های سنتی ارزیابی سرمایه‌گذاری است. این یافته با یکی از مطالعات قبلی (Zamani, 2022) همسو است که نشان دادند روش‌های سنتی ارزیابی سرمایه‌گذاری، ارزش انعطاف‌پذیری در تصمیمات سرمایه‌گذاری را کم‌ارزش‌گذاری می‌کنند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که نوع گزینه بهینه برای هر فناوری متفاوت است. برای مثال، برای هوش مصنوعی و تحلیل کلان داده‌ها، گزینه مرحله‌ای کردن بیشترین ارزش را دارد، درحالی‌که برای بلاکچین، گزینه تعویق بیشترین ارزش را دارد. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده اهمیت در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص هر فناوری در تصمیم‌گیری برای پیاده‌سازی آن است.

۶-۳- الگوریتم یادگیری عمیق تقویتی و بهینه‌سازی استراتژی‌های پیاده‌سازی فناوری

نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم یادگیری عمیق تقویتی می‌تواند استراتژی‌های بهینه پیاده‌سازی فناوری را با توجه به شرایط محیطی و ویژگی‌های خاص هر فناوری پیشنهاد دهد. این الگوریتم توانسته است با دقت ۸۹/۲٪ موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی را پیش‌بینی کند، که نشان‌دهنده کارایی بالای آن است. نکته جالب‌توجه، تغییر استراتژی‌های بهینه با تغییر شدت بحران است. در شرایط بحران با شدت کم، استراتژی‌های سرمایه‌گذاری کامل یا پیاده‌سازی مرحله‌ای برای اکثر فناوری‌ها توصیه می‌شود. با افزایش شدت بحران، استراتژی‌های محافظه‌کارانه‌تر مانند پیاده‌سازی مرحله‌ای با مقیاس کوچک یا تعویق بیشتر توصیه می‌شود. این یافته با مطالعه قبلی در این زمینه (Valenza & Damiano, 2025) همسو است که نشان دادند در شرایط عدم قطعیت بالا، استراتژی‌های انعطاف‌پذیر و تدریجی عملکرد بهتری دارند.

۶-۴- تحلیل حساسیت و شناسایی عوامل کلیدی

نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که قابلیت مقیاس‌پذیری، مقررات و قابلیت مدیریت تغییر بیشترین تأثیر را بر موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی دارند. این یافته به مدیران بنگاه‌های کوچک و متوسط کمک می‌کند تا منابع محدود خود را بر روی این عوامل کلیدی متمرکز کنند. تأثیر قابل‌توجه قابلیت مقیاس‌پذیری فناوری (افزایش ۱۰٪ در این متغیر منجر به افزایش ۱۱/۶٪ در موفقیت پیاده‌سازی) نشان می‌دهد که انتخاب فناوری‌هایی با قابلیت مقیاس‌پذیری بالا می‌تواند ریسک پیاده‌سازی را در شرایط بحرانی کاهش دهد. این یافته با مطالعات قبلی (Sagala & Őri, 2025) همسو است که نشان دادند فناوری‌های انعطاف‌پذیر در محیط‌های متغیر عملکرد بهتری دارند. همچنین، تأثیر قابل‌توجه قابلیت مدیریت تغییر (افزایش ۱۰٪ در این متغیر منجر به

افزایش ۱۰/۲٪ در موفقیت پیاده‌سازی) نشان می‌دهد که توسعه قابلیت‌های مدیریت تغییر در بنگاه‌های کوچک و متوسط می‌تواند به موفقیت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط بحرانی کمک کند.

۶-۵- محدودیت‌ها و پیشنهادها برای تحقیقات آتی

این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز مواجه بوده است. اول، داده‌های این پژوهش از بنگاه‌های کوچک و متوسط ایرانی جمع‌آوری‌شده است و تعمیم‌پذیری نتایج به سایر کشورها ممکن است محدود باشد. دوم، مدل ترکیبی پیشنهادی نیازمند داده‌های زیادی برای آموزش است که ممکن است برای برخی بنگاه‌های کوچک و متوسط چالش‌برانگیز باشد. سوم، پیچیدگی مدل ترکیبی ممکن است برای برخی مدیران بنگاه‌های کوچک و متوسط که آشنایی کمتری با روش‌های پیشرفته تحلیلی دارند، دشوار باشد. برای تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌شود:

۱) مطالعات مشابه در سایر کشورها و صنایع انجام شود تا تعمیم‌پذیری نتایج بررسی شود.
۲) روش‌های ساده‌سازی مدل ترکیبی برای استفاده آسان‌تر توسط مدیران بنگاه‌های کوچک و متوسط بررسی شود.
۳) اثر متقابل بین فناوری‌های مختلف هوشمندسازی و امکان ترکیب آن‌ها بررسی شود.
۴) اثر طولانی‌مدت پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی بر عملکرد بنگاه‌های کوچک و متوسط در دوره‌های پس از بحران بررسی شود.
۵) توسعه مدل‌های یادگیری تقویتی فدرال که امکان یادگیری جمعی بین بنگاه‌های کوچک و متوسط مختلف را فراهم می‌کند، بررسی شود.

۷- نتیجه‌گیری

این پژوهش به توسعه یک مدل ترکیبی پایداری و انعطاف‌پذیری برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط تحت شرایط بحرانی پرداخته است. نوآوری اصلی این پژوهش، ترکیب تئوری گزینه‌های واقعی با الگوریتم‌های یادگیری عمیق تقویتی برای بهینه‌سازی تصمیمات پیاده‌سازی فناوری هوشمندسازی در شرایط عدم قطعیت شدید است.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که:

- معیارهای کلیدی مؤثر بر پایداری و انعطاف‌پذیری پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه، شامل ظرفیت جذب فناوری، آمادگی دیجیتال، قابلیت مقیاس‌پذیری فناوری، انطباق‌پذیری فناوری، قابلیت مدیریت تغییر و اکوسیستم همکاران هستند.
- فناوری‌های هوشمندسازی که قابلیت مقیاس‌پذیری سریع، انطباق‌پذیری بالا و کارآیی عملیاتی بالایی دارند، در شرایط بحرانی موفقیت بیشتری در پیاده‌سازی نشان می‌دهند.
- ارزش گزینه‌های واقعی (تعویق، مرحله‌ای کردن، مقیاس‌پذیری، تغییر و خروج) برای هر فناوری متفاوت است و باید در تصمیم‌گیری برای پیاده‌سازی فناوری در نظر گرفته شود.
- الگوریتم یادگیری عمیق تقویتی می‌تواند استراتژی‌های بهینه پیاده‌سازی فناوری را با توجه به شرایط محیطی و ویژگی‌های خاص هر فناوری پیشنهاد دهد.
- سیستم پشتیبان تصمیم مبتنی بر وب می‌تواند به مدیران بنگاه‌های کوچک و متوسط کمک کند تا استراتژی‌های پایدار و انعطاف‌پذیر برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در شرایط عدم قطعیت شدید تدوین نمایند.

این پژوهش همچنین اهمیت نگاه جامع به ابعاد مختلف پیاده‌سازی فناوری هوشمندسازی، شامل ابعاد فنی، سازمانی، محیطی را نشان می‌دهد. مدل ترکیبی پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای کمک به بنگاه‌های کوچک و متوسط در انتخاب و پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی مناسب در شرایط بحرانی استفاده شود. درنهایت، این پژوهش با غنی‌سازی ادبیات در زمینه پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمندسازی در بنگاه‌های کوچک و متوسط و ارائه یک رویکرد عملی برای مدیریت عدم قطعیت در تصمیمات انتخاب فناوری هوشمندسازی، می‌تواند به انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری بنگاه‌های کوچک و متوسط در مواجهه با بحران‌های آینده کمک کند.

مشارکت‌های نویسندگان

همه نویسندگان در مقاله نقش و سهم یکسان داشته‌اند.

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.

مراجع

Alkhodair, M., & Alkhudhayr, H. (2025). Harnessing Industry 4.0 for SMEs: Advancing smart manufacturing and logistics for sustainable supply chains. *Sustainability, 17*(3), Article 813. https://doi.org/10.3390/su17030813

Awad, J. A., & Martín-Rojas, R. (2024). Digital transformation influence on organisational resilience through organisational learning and innovation. *Journal of Innovation and Entrepreneurship, 13*(1), Article 69. https://doi.org/10.1186/s13731-024-00405-4

Durst, S., & Henschel, T. (2021). COVID-19 as an accelerator for developing stronger businesses? Insights from Estonian small firms. *Journal of the International Council for Small Business, 2*(1), 1–29. https://doi.org/10.1080/26437015.2020.1859935

Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Cheung, C. M. K., Conboy, K., Duan, Y., Dubey, R., ... & Viglia, G. (2022). How to develop a quality research article and avoid a journal desk rejection. *International Journal of Information Management, 62*, Article 102426. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102426

Gregurec, I., Tomičić Furjan, M., & Tomičić-Pupek, K. (2021). The impact of COVID-19 on sustainable business models in SMEs. *Sustainability, 13*(3), Article 1098. https://doi.org/10.3390/su13031098

Guo, H., Yang, Z., Huang, R., & Guo, A. (2020). The digitalization and public crisis responses of small and medium enterprises: Implications from a COVID-19 survey. *Frontiers of Business Research in China, 14*, Article 19. https://doi.org/10.1186/s11782-020-00087-1

Kannan, S., & Gambetta, N. (2025). Technology-driven sustainability in small and medium-sized enterprises: A systematic literature review. *Journal of Small Business Strategy, 35*(1), 129-157. https://doi.org/10.53703/001c.126636

Kaňovská, L., & Bumberová, V. (2021). The differences in the propensity of providing smart services by SMEs from the electrical engineering industry with regard to their cooperation and innovation flexibility. *Sustainability, 13*(9), Article 5008. https://doi.org/10.3390/su13095008

Khurana, I., Dutta, D. K., & Ghura, A. S. (2022). SMEs and digital transformation during a crisis: The emergence of resilience as a second-order dynamic capability in an entrepreneurial ecosystem. *Journal of Business Research, 150*, 623–641. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.06.048

Klein, V. B., & Todesco, J. L. (2021). COVID-19 crisis and SMEs responses: The role of digital transformation. *Knowledge and Process Management, 28*(2), 117–133. https://doi.org/10.1002/kpm.1660

Matarazzo, M., Penco, L., Profumo, G., & Quaglia, R. (2021). Digital transformation and customer value creation in Made in Italy SMEs: A dynamic capabilities perspective. *Journal of Business Research, 123*, 642–656. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.10.033

Melo, I. C., Queiroz, G. A., Junior, P. N. A., de Sousa, T. B., Yushimito, W. F., & Pereira, J. (2023). Sustainable digital transformation in small and medium enterprises (SMEs): A review on performance. *Heliyon, 9*(3), Article e13908. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13908

Mick, M. M. A. P., Kovaleski, J. L., & Chiroli, D. M. D. G. (2024). Sustainable digital transformation roadmaps for SMEs: A systematic literature review. *Sustainability, 16*(19), Article 8551. https://doi.org/10.3390/su16198551

Őri, D., Szabó, I., Kő, A., & Kovács, T. (2024). Digitalizing in crisis: The role of organizational resilience in SMEs' digitalization. *Journal of Enterprise Information Management, 37*(4), 1185–1205. https://doi.org/10.1108/JEIM-03-2023-0141

Petropoulou, A., Angelaki, E., Rompogiannakis, I., Passas, I., & Garefalakis, A. (2024). Digital transformation in SMEs: Pre- and post-COVID-19 era—A comparative bibliometric analysis. *Sustainability, 16*(23), Article 10536. https://doi.org/10.3390/su162310536

Sagala, G. H., & Őri, D. (2025). Exploring digital transformation strategy to achieve SMEs resilience and antifragility: A systematic literature review. *Journal of Small Business & Entrepreneurship, 37*(3), 495–524. https://doi.org/10.1080/08276331.2024.2392080

Valenza, G., & Damiano, R. (2025). Enacting resilience in small and medium enterprises

following the sustainability path: A systematic literature review. *Strategic Change, 34*(2), 237–252. https://doi.org/10.1002/jsc.2608

Zamani, S. Z. (2022). Small and medium enterprises (SMEs) facing an evolving technological era: A systematic literature review on the adoption of technologies in SMEs. *European Journal of Innovation Management, 25*(6), 735–757. https://doi.org/10.1108/EJIM-07-2021-0360

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی