Business Intelligence Management Studies
Vol. 15, No.55, Spring 2026; P 261-305
ims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/ims.2025.86393.2633

ATU PRESS

Original Research
Received: 09 July 2025 Revised: 25 October 2025 Accepted: 12 November 2025
eISSN: 2821-0816
ISSN: 2821-0964

# Designing a Conceptual Model for Railway Industry Maturity Assessment in the Era of the Fourth Industrial Revolution: A Meta-Synthesis Study

**Samaneh Moradi** — Ph.D. Student Department of Industrial Management, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

**Mehrdad Hosseini Shakib** * — Associate Professor, Department of Industrial Management, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.

**Ali Badizadeh** — Assistant Professor,Department of Industrial Management, Qa.C., Islamic Azad University, Qazvin, Iran

## Abstract

In the era of the Fourth Industrial Revolution, digitalization and implementation of emerging technologies are considered as the main drivers of transformation in various industries. The railway transportation industry is no exception to this rule and requires precise criteria to assess its maturity level and readiness in adopting and implementing Industry 4.0 related technologies. The main objective of this research is to identify and present a conceptual model for railway transportation industry maturity assessment based on fourth-generation industrial technologies. This study was conducted using Sandelowski and Barroso's seven-stage meta-synthesis method and systematic review of 87 scientific articles published between 2016 and 2025. The article screening process was based on precise evaluation criteria including language, temporal scope, study conditions, research population, and article types. The research results led to the development of a conceptual

* Corresponding Author: Mehrdad.shakib@kiau.ac.ir

**How to Cite:** Moradi, S., Hosseini Shakib, M., Badizadeh, A. (2026). Designing a Conceptual Model for Railway Industry Maturity Assessment in the Era of the Fourth Industrial Revolution: A Meta-Synthesis Study, *Journal of Business Intelligence Management Studies*, 15(55), 261-305. DOI: 10.22054/ims.2025.86393.2633

model comprising 5 main dimensions, 21 indicators, and 84 operational codes, which include: Industry 4.0 technologies in railway transportation, digitalization challenges and barriers, cybersecurity and digital risks, practical applications and performance improvement, and sustainability and environment. The scientific validity of the results was confirmed with a Kappa coefficient of 0.89 and content validity of 0.83. This model provides a comprehensive framework for evaluating and measuring the maturity level of organizations active in railway transportation and can be used as an effective tool for identifying strengths and weaknesses, and developing improvement strategies in the digitalization path.

## 1. Introduction

In the era of the Fourth Industrial Revolution, digitalization and implementation of emerging technologies are considered as the main drivers of transformation in various industries. The railway transportation industry is no exception to this rule and requires precise criteria to assess its maturity level and readiness for related technologies. This study aims to identify and present a comprehensive maturity assessment model for the railway transportation industry based on fourth-generation industrial technologies through systematic review of 87 scientific articles published between 2016 and 2025.

## 2. Literature Review

The literature review reveals that the Fourth Industrial Revolution represents a fundamental paradigm shift in industrial operations, management, and service delivery. This revolution, centered on technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), big data analytics, cloud computing, and cyber-physical systems, has caused profound transformations in organizational structures worldwide.

1-. Industry 4.0 Technologies in Railway Transportation

Recent studies demonstrate significant applications of Industry 4.0 technologies in railway systems. Laiton-Bonadiez et al. (2022) conducted a systematic review of Industry 4.0 technologies applied to rail transportation, emphasizing the central role of these technologies in industry transformation. Singh et al. (2022) examined IoT applications for sustainable railway transportation, showing that this

technology plays a crucial role in equipment condition monitoring, energy management, and passenger experience improvement.

2-. Challenges and Implementation Barriers

Research indicates that despite extensive opportunities, implementing Industry 4.0 technologies in the railway industry faces multiple challenges. Carranza et al. (2023) analyzed railway industry challenges, emphasizing the importance of understanding the future railway industry through technology integration and digitalization. Key barriers include legacy system integration, substantial initial costs, organizational resistance to change, and digital skills shortages.

3- Cybersecurity and Risk Management

The increasing digitalization of railway systems has created new challenges in cybersecurity. López-Aguilar et al. (2022) conducted a systematic review of information security and privacy in railway transportation, emphasizing the increase in security threats concurrent with digitalization. The critical nature of railway infrastructure makes them attractive targets for cyber-attacks, revealing the necessity for developing advanced security solutions.

## 3. Methodology

This research employed a qualitative approach using Sandelowski and Barroso's seven-stage meta-synthesis method. The study population consisted of 87 scientific articles published between 2016 and 2025, selected from reputable international databases including Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, and ScienceDirect, as well as domestic databases such as SID, Magiran, Civilica, and Noormags.

## 4. Results

The results led to the development of a comprehensive maturity assessment model comprising five main dimensions, 21 indicators, and 84 operational codes.

-. Dimension 1: Industry 4.0 Technologies in Railway Transportation

This dimension encompasses four key indicators: IoT advancement degree in railway infrastructure, AI maturity level in railway operations, big data analytics sophistication in operational decision-making, and digital twin technology evolution. These indicators cover essential technological foundations including smart sensors embedded in rails, real-time equipment monitoring systems, automatic fault

detection algorithms, predictive maintenance systems, traffic analysis, and digital simulation of train performance.

-. Dimension 2: Digitalization Challenges and Barriers

This dimension addresses four critical indicators: overcoming technical and organizational barriers, sustainable financing for innovation projects, human resource empowerment in digital domains, and standardization and scalability maturity. Key operational codes include legacy system integration, organizational resistance to change, substantial initial implementation costs, staff training needs for advanced technologies, and lack of unified industry standards.

-. Dimension 3: Cybersecurity and Digital Risks

Given the critical nature of railway infrastructure, this dimension includes four essential indicators: indigenous security protocol maturity, operational readiness against cyber threats, sensitive information protection and management maturity, and business continuity and crisis management readiness. Operational codes encompass internal encryption systems, multi-stage access control protocols, rapid incident response teams, attack simulation exercises, and offline backup systems.

-. Dimension 4: Practical Applications and Performance Improvement

This dimension focuses on tangible and measurable results of digitalization through four indicators: operational process optimization maturity, asset management intelligence level, passenger experience and service enhancement advancement, and advanced control and monitoring system evolution. Key codes include data-driven predictive maintenance, route and scheduling optimization, smart fleet and resource management, and automatic train control systems.

-. Dimension 5: Sustainability and Environment

This dimension addresses growing environmental concerns through four indicators: energy consumption reduction and fuel optimization maturity, renewable energy development advancement, pollution and environmental impact management maturity, and sustainability standards compliance level. Operational codes include brake energy recovery technologies, speed profile optimization, solar panel installation at stations, and advanced noise pollution reduction systems.

## 5. Discussion

The validation of results was ensured through multiple methods. Content validity was reviewed by five experts (two railway industry experts and three university professors specializing in Industry 4.0) with at least 10 years of experience. The average content validity ratio was calculated as 0.83, exceeding the threshold of 0.75. Convergent validity assessment through comparison with international standards showed 89% alignment. Inter-rater reliability achieved a Cohen's Kappa coefficient of 0.86, while temporal reliability demonstrated a Pearson correlation coefficient of 0.92.

## 6. Conclusion

The model's distinctive features include scientific comprehensiveness based on systematic literature review, practical applicability for implementation in operational environments, flexibility for adaptation to various conditions, subject comprehensiveness covering all important aspects of digital transformation, and evidence-based foundation from reputable research findings.

For researchers, future directions include developing quantitative measurement tools for each indicator, conducting case studies for practical model testing, and examining adaptability to different cultural and economic conditions. For railway managers, recommendations include using the model for organizational assessment, developing long-term plans based on dimension prioritization, and investing in digital skills development. For policymakers, suggestions encompass developing national digitalization standards, creating supportive investment mechanisms, and establishing appropriate cybersecurity legal frameworks.

The successful implementation of this model requires integrated cooperation among all stakeholders including managers, technical experts, human resources, technology suppliers, and regulatory bodies. Only through a comprehensive and participatory approach can the full potential of this model be utilized to enhance railway transportation industry maturity.

***Keywords*****:** Maturity assessment conceptual model, railway industry, fourth industrial revolution, meta-synthesis, emerging technologies.

مقاله پژوهشی تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱ ISSN: 2821-0964 eISSN: 2821-0816

مطالعات مدیریت کسب و کار هوشمند
سال پانزدهم، شماره ۵۵، بهار ۱۴۰۵، ص ۲۶۱ تا ۳۰۵
ims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/ims.2025.86393.2633

# طراحی الگوی مفهومی ارزیابی بلوغ صنعت ریلی در عصر انقلاب صنعتی چهارم: یک مطالعه فراترکیب

**سمانه مرادی** دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

**مهرداد حسینی شکیب** * دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

**علی بدیع زاده** استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

## چکیده

در عصر انقلاب صنعتی چهارم، هوشمندسازی و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین به‌عنوان محرک‌های اصلی تحول در صنایع مختلف محسوب می‌شوند. صنعت حمل‌ونقل ریلی نیز از این قاعده مستثنی نبوده و نیازمند تعیین معیارهای دقیق برای ارزیابی میزان بلوغ و آمادگی خود در پذیرش و پیاده‌سازی فناوری‌های مرتبط با صنعت ۴,۰ است. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی و ارائه الگوی مفهومی ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی مبتنی بر فناوری‌های نسل چهارم صنعت است. این مطالعه با استفاده از روش فراترکیب هفت مرحله‌ای سندلوسکی و باروسو و بررسی نظام‌مند ۸۷ مقاله علمی منتشرشده در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۵ انجام شده است. فرآیند غربالگری مقالات بر اساس معیارهای ارزیابی دقیق شامل زبان، قلمرو زمانی، شرایط مطالعاتی، جامعه پژوهش و نوع مقالات صورت گرفت. نتایج پژوهش منجر به تدوین الگوی مفهومی شامل ۵ بعد اصلی، ۲۱ شاخص و ۸۴ کد عملیاتی شد که عبارت‌اند از: فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حمل‌ونقل ریلی، چالش‌ها و موانع هوشمندسازی، امنیت سایبری و ریسک‌های دیجیتالی، کاربردهای عملی و بهبود عملکرد و پایداری و محیط‌زیست. اعتبار علمی نتایج با ضریب کاپای ۰/۸۹ و روایی محتوایی ۰/۸۳ تأیید شد. این الگو،

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مدیریت صنعتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین است.

* نویسنده مسئول : Mehrdad.shakib@kiau.ac.ir

چارچوب جامعی برای ارزیابی و سنجش میزان بلوغ سازمان‌های فعال در حوزه حمل‌ونقل ریلی ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای شناسایی نقاط قوت و ضعف و تدوین راهکارهای بهبود در مسیر هوشمندسازی مورداستفاده قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** الگوی مفهومی ارزیابی بلوغ، صنعت ریلی، انقلاب صنعتی چهارم، فراترکیب، فناوری‌های نوین.

## مقدمه

انقلاب صنعتی چهارم به‌عنوان تحولی بنیادین در نحوه تولید، مدیریت و ارائه خدمات، صنایع مختلف را با چالش‌ها و فرصت‌های بی‌سابقه‌ای مواجه ساخته است (Gerhátová et al., 2021). این انقلاب که بر محوریت فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، تحلیل کلان‌داده، رایانش ابری و سیستم‌های سایبر-فیزیکی استوار است، موجب دگرگونی عمیق در ساختار عملیاتی و راهبردی سازمان‌ها شده است (Laiton-Bonadiez et al., 2022).

صنعت حمل‌ونقل ریلی به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی جوامع مدرن، نقش محوری در توسعه اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی کشورها ایفا می‌کند (Singh et al., 2022). این صنعت در سال‌های اخیر شاهد تحولات گسترده‌ای در حوزه فناوری‌های دیجیتال بوده است که منجر به بهبود عملکرد عملیاتی، افزایش ایمنی، کاهش هزینه‌ها و ارتقای کیفیت خدمات شده است (Kljaić et al., 2023).

تجربه کشورهای پیشرو نشان داده است که موفقیت در هوشمندسازی صنعت ریلی نیازمند رویکردی نظام‌مند و مرحله‌ای است (Gerhátová et al., 2021). به‌عنوان‌مثال، در کشورهای اروپایی، پیاده‌سازی سیستم مدیریت ترافیک ریلی اروپایی (ERTMS) و استانداردهای صنعت ۴,۰ در بیش از دو دهه و با سرمایه‌گذاری چندمیلیارد یورویی صورت گرفته است (Harrod, 2025). این تجربیات نشان می‌دهد که بدون ابزارهای ارزیابی بلوغ مناسب، سازمان‌ها قادر به تعیین موقعیت فعلی خود، شناسایی اولویت‌های سرمایه‌گذاری و طراحی مسیر بهینه پیشرفت نخواهند بود. در همین راستا، مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که عدم توجه به ارزیابی بلوغ، یکی از دلایل اصلی شکست پروژه‌های دیجیتالی در صنعت ریلی است (Carranza et al., 2023). به‌علاوه، در اقتصادهای درحال‌توسعه، شکاف بین وضعیت موجود و اهداف هوشمندسازی به‌مراتب گسترده‌تر است که ضرورت توسعه ابزارهای ارزیابی متناسب با شرایط این کشورها را دوچندان می‌کند (Awodele et al., 2024). بااین‌حال، پیاده‌سازی موفق این فناوری‌ها

مستلزم درک عمیق از وضعیت فعلی سازمان‌ها و تعیین میزان آمادگی آن‌ها برای پذیرش تغییرات است.

مفهوم بلوغ سازمانی در زمینه فناوری‌های صنعت ۴,۰ به توانایی یک سازمان در پیاده‌سازی، یکپارچه‌سازی و بهره‌برداری مؤثر از فناوری‌های نوین اشاره دارد (Bortolini et al., 2022). ارزیابی بلوغ به سازمان‌ها کمک می‌کند تا موقعیت فعلی خود را شناخته، نقاط قوت و ضعف را شناسایی کرده و برنامه‌ای منطقی برای دستیابی به سطوح بالاتر تکامل تدوین نمایند (Franz, 2023).

در حوزه حمل‌ونقل ریلی، تحقیقات متعددی به بررسی جنبه‌های مختلف پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴,۰ پرداخته‌اند. مطالعه طراز منفرد و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی اثرات پیاده‌سازی اینترنت اشیا بر صنعت حمل‌ونقل ریلی بار پرداخت و رویکردهای آینده‌پژوهانه در این حوزه را مورد تحلیل قرار داد. همچنین، پژوهش بهلولی و همکاران (۱۴۰۱) الگویی برای سنجش بلوغ مدیریت دانایی مشتری در صنعت حمل‌ونقل ریلی ارائه کرد که اهمیت توسعه ابزارهای ارزیابی تخصصی در این حوزه را نشان می‌دهد.

مطالعات بین‌المللی نیز بر ضرورت توسعه چارچوب‌های جامع ارزیابی بلوغ تأکید کرده‌اند. گندی و همکاران[1] (۲۰۲۲) در مرور نظام‌مند خود بر حمل‌ونقل ریلی پایدار، بر اهمیت یکپارچه‌سازی معیارهای فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی در ارزیابی عملکرد این صنعت تأکید کردند. آوودله و همکاران[2] (۲۰۲۴) نیز در بررسی آمادگی پذیرش فناوری‌های ریلی ۴,۰ در اقتصادهای درحال‌توسعه، بر وجود شکاف‌های قابل‌توجه در ابزارهای ارزیابی موجود اشاره کردند.

باوجود تلاش‌های انجام‌شده، هنوز الگوی جامع و یکپارچه‌ای برای ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی در عصر انقلاب صنعتی چهارم ارائه نشده است. اکثر مطالعات موجود بر جنبه‌های خاصی از این موضوع متمرکز بوده و رویکرد کل‌نگرانه‌ای ندارند (Zunder et al., 2023). همچنین، تفاوت‌های فرهنگی، اقتصادی و زیرساختی بین

1. Gandhi et al.
2. Awodele et al.

کشورها، نیاز به توسعه الگوهایی را آشکار می‌سازد که قابلیت انطباق با شرایط متنوع را داشته باشند.

شکاف موجود در ادبیات موضوعی، ضرورت انجام پژوهشی جامع و نظام‌مند را آشکار می‌سازد که بتواند با بهره‌گیری از یافته‌های پراکنده مطالعات مختلف، الگویی یکپارچه و کاربردی ارائه دهد. در این راستا، روش فراترکیب به‌عنوان رویکردی مناسب برای تلفیق و ترکیب یافته‌های کیفی مطالعات مختلف محسوب می‌شود که امکان دستیابی به درک عمیق‌تر و جامع‌تر از موضوع پژوهش را فراهم می‌آورد.

بر این اساس، سؤال اصلی پژوهش حاضر عبارت است از: الگوی مفهومی ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی مبتنی بر نسل چهارم صنعت چگونه است؟ هدف اصلی این مطالعه، شناسایی و ارائه یک الگوی جامع ارزیابی بلوغ برای صنعت حمل‌ونقل ریلی مبتنی بر فناوری‌های نسل چهارم صنعت است که بتواند ابعاد، شاخص‌ها و کدهای مختلف بلوغ دیجیتال را در این صنعت تعیین کند.

## پیشینه پژوهش

### انقلاب صنعتی چهارم و صنعت ریلی

انقلاب صنعتی چهارم به‌عنوان مرحله جدیدی از تکامل صنعتی، بر اساس همگرایی فناوری‌های دیجیتال، فیزیکی و بیولوژیکی تعریف می‌شود (Möller et al., 2022). این انقلاب که به صنعت ۴,۰ نیز معروف است، مشخصه‌های بارزی نظیر اتوماسیون هوشمند، تصمیم‌گیری خودکار، یکپارچه‌سازی عمودی و افقی و شخصی‌سازی انبوه دارد (Holubčík et al., 2021).

در زمینه حمل‌ونقل ریلی، پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴,۰ تحولات بنیادینی را به همراه آورده است. گائو و همکاران[1] (۲۰۲۲) در بررسی کاربرد ارزیابی غیرمخرب نسل چهارم در صنعت ریلی، بر تأثیرات عمیق این فناوری‌ها بر بهبود ایمنی، کاهش هزینه‌ها و

1. Gao et al.

افـزایش قابلیـت اطمینـان تأکیـد کردنـد. همچنـین، هـارود[1] (۲۰۲۵) در تحلیـل هوشـمندی سیگنال‌های ریلی، نشان داد که پیاده‌سازی سیسـتم‌های مـدیریت ترافیـک ریلـی اروپـایی و کنترل مثبت قطار، علی‌رغم انتظارات بالا، با چالش‌های عملی قابل‌توجهی مواجه است.

## مفهوم بلوغ سازمانی در عصر دیجیتال

مفهوم بلوغ سازمانی به توانایی یک سازمان در مدیریت مؤثر فرآینـدها، منـابع و فناوری‌هـا بـرای دسـتیابی بـه اهـداف اسـتراتژیک اشـاره دارد (Brezavšček & Baggia, 2025). در زمینه فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات، مدل‌های بلوغ ابزارهای ارزشـمندی بـرای ارزیـابی وضعیت فعلی سازمان‌ها و تعیین مسیر بهبود محسوب می‌شوند.

مدل‌های بلوغ دیجیتال در صنایع مختلف با رویکردهـای متنـوعی توسـعه یافته‌انـد. در صنعت تولید، مدل‌هایی نظیر IMPULS و SIMMI 4.0 برای ارزیابی آمـادگی کارخانـه‌ها به‌کارگرفته شده‌اند (Bortolini et al., 2022). در حوزه لجستیک، مدل‌های بلـوغ زنجیـره تأمین هوشمند بر یکپارچگی فناوری‌های نوین در فرآیندهای توزیع تمرکز دارند (Sun et al., 2022). بااین‌حال، صـنعت ریلـی بـه دلیـل ویژگی‌هـای منحصـربه‌فرد خـود نظیـر عمـر طـولانی دارایی‌هـا، الزامـات ایمنـی بحرانـی و پیچیـدگی زیرسـاختی، نیازمنـد مـدل‌های تخصصی است (Möller et al., 2022). بررسی ادبیات نشـان می‌دهـد کـه مـدل‌های بلـوغ موجود در حوزه ریلی عمدتاً بر یک یا دو بعد محدود (ماننـد فنـاوری یـا عملیـات) تمرکـز داشته و رویکرد جامع و چندبعدی ندارند. برای مثال، مدل‌های ارزیابی بلـوغ اینترنـت اشـیا در ریلی (Singh et al., 2022) صرفاً به لایه فناوری می‌پردازند و ابعاد سـازمانی، امنیتـی و زیست‌محیطی را نادیده می‌گیرند. این شکاف، نیاز به یک الگـوی جـامع کـه تمـامی ابعـاد مؤثر بر بلـوغ دیجیتـال صـنعت ریلـی را پوشـش دهـد، آشـکار می‌سـازد (Zunder et al., 2023).

تیشابالالا و امپفو[2] (۲۰۲۳) در بررسی فرصت‌های ارائه‌شده توسط انقلاب صـنعتی ۴٫۰

1. Harrod
2. Tshabalala & Mpofu

برای احیای بخش ریلی، بر اهمیت توسعه چارچوب‌های ارزیابی بلوغ متناسب با ویژگی‌های خاص این صنعت تأکید کردند. آن‌ها نشان دادند که عوامل منحصربه‌فرد صنعت ریلی نظیر ایمنی بحرانی، طول عمر بالای تجهیزات و پیچیدگی زیرساختی، نیازمند رویکردهای خاص در ارزیابی بلوغ هستند.

## فناوری‌های کلیدی صنعت ٤,٠ در حوزه ریلی

اینترنت اشیا به‌عنوان یکی از محرک‌های اصلی تحول دیجیتال در صنعت ریلی، امکان اتصال و تبادل اطلاعات بین تجهیزات مختلف را فراهم می‌آورد (Zhong et al., 2021). سینگ و همکاران[1] (۲۰۲۲) در مرور جامع خود بر کاربردهای اینترنت اشیا برای حمل‌ونقل ریلی پایدار، نشان دادند که این فناوری در حوزه‌هایی نظیر نظارت بر وضعیت تجهیزات، مدیریت انرژی و بهبود تجربه مسافران نقش محوری دارد. مطالعات عملی نیز کارایی این سیستم‌ها را تأیید کرده‌اند. منگ و همکاران[2] (۲۰۲۳) سیستم اینترنت اشیا مبتنی بر تلفن هوشمند برای نظارت بر ارتعاش و صدای حمل‌ونقل ریلی توسعه دادند که قابلیت‌های قابل‌توجهی در تشخیص زودهنگام مشکلات نشان داد. همچنین، دوان و لئو[3] (۲۰۲۴) بر نقش مواد کامپوزیت هوشمند و اینترنت اشیا در انقلاب نظارت بر سلامت ریلی در زمان واقعی تأکید کردند.

هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین توانایی‌های بی‌سابقه‌ای در تحلیل داده‌های پیچیده و پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها ارائه می‌دهند (زمانی و همکاران، ۱۴۰۲). در صنعت ریلی، این فناوری‌ها در حوزه‌هایی نظیر نگهداری پیشگیرانه، بهینه‌سازی مسیر و تشخیص خرابی کاربردهای گسترده‌ای دارند. بوستوس و همکاران[4] (۲۰۲۱) روش‌شناسی جامعی برای یکپارچه‌سازی قطارهای پرسرعت در نگهداری ۴,۰ ارائه دادند که بر محوریت تکنیک‌های یادگیری ماشین استوار بود. نتایج نشان داد که این رویکرد می‌تواند

1. Singh et al.
2. Meng et al.
3. Duan & Liu
4. Bustos et al.

به‌طور قابل‌توجهی کارایی عملیات نگهداری را بهبود بخشد و هزینه‌های مرتبط را کاهش دهد.

حجم عظیم داده‌های تولیدشده در سیستم‌های ریلی مدرن، فرصت‌های بی‌نظیری برای استخراج بینش‌های ارزشمند فراهم می‌آورد (Dong et al., 2022). تحلیل کلان‌داده امکان بهینه‌سازی عملیات، بهبود تصمیم‌گیری و کشف الگوهای پنهان را به سازمان‌ها ارائه می‌دهد. چادوری و الزاراد[1] (۲۰۲۳) در مرور کاربردهای متن‌کاوی در بخش زیرساخت‌های حمل‌ونقل، بر پتانسیل بالای این تکنیک‌ها در استخراج اطلاعات مفید از منابع متنی غیرساختاریافته تأکید کردند. آن‌ها نشان دادند که متن‌کاوی می‌تواند در تحلیل گزارش‌های نگهداری، ارزیابی رضایت مسافران و پیش‌بینی مشکلات عملیاتی کاربردهای مؤثری داشته باشد.

## چالش‌ها و موانع هوشمندی

علی‌رغم فرصت‌های گسترده، پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴,۰ در صنعت ریلی با چالش‌های متعددی مواجه است. کارانزا و همکاران[2] (۲۰۲۳) در تحلیل چالش‌های صنعت ریلی، بر اهمیت درک صنعت ریلی آینده از طریق ادغام فناوری و هوشمندی تأکید کردند و موانع اصلی را شناسایی نمودند.

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، یکپارچه‌سازی سیستم‌های قدیمی با فناوری‌های نوین است (Montero, 2020). بسیاری از زیرساخت‌های ریلی دهه‌ها عمر دارند و انطباق آن‌ها با استانداردهای دیجیتال مدرن مستلزم سرمایه‌گذاری‌های سنگین و برنامه‌ریزی دقیق است.

مطالعات میدانی نشان داده‌اند که در بسیاری از سازمان‌های ریلی، سیستم‌های سیگنالینگ و کنترل با عمر بیش از ۳۰ سال هنوز در حال بهره‌برداری هستند که با معماری‌های دیجیتال مدرن ناسازگاری اساسی دارند (Holubčík et al., 2021). این وضعیت منجر به دوگانگی دیجیتالی می‌شود: از یک‌سو نیاز به حفظ عملیات با

1. Chowdhury & Alzarrad
2. Carranza et al.

زیرساخت‌های قدیمی و از سوی دیگر فشار برای پذیرش فناوری‌های نوین (Montero, 2020). افزون بر این، پیچیدگی‌های نظارتی و استانداردسازی نیز چالش‌های مهمی محسوب می‌شوند. در بسیاری از کشورها، استانداردهای ملی ریلی با استانداردهای بین‌المللی صنعت ۴,۰ همخوانی ندارند که این امر مانع از اتصال‌پذیری و قابلیت همکاری سیستم‌ها می‌شود (Hatta et al., 2024). علاوه بر موانع فنی، عوامل انسانی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. تحقیقات نشان می‌دهد که در صنعت ریلی، میانگین سنی نیروی کار بالاست و بسیاری از کارکنان با فناوری‌های دیجیتال آشنایی محدودی دارند (Ogunmodede & Zincume, 2024). این وضعیت نیازمند برنامه‌های جامع آموزش و توانمندسازی است که خود هزینه و زمان قابل‌توجهی می‌طلبد.

## امنیت سایبری و مدیریت ریسک

هوشمندی روزافزون سیستم‌های ریلی، چالش‌های جدیدی در حوزه امنیت سایبری ایجاد کرده است (López-Aguilar et al., 2022). حیاتی بودن زیرساخت‌های ریلی، آن‌ها را به اهداف جذابی برای حملات سایبری تبدیل کرده است که ضرورت توسعه راهکارهای امنیتی پیشرفته را آشکار می‌سازد.

ورونکو[1] (۲۰۲۴) در بررسی امنیت سیستم‌های اینترنت اشیا در حمل‌ونقل ریلی، بر پیچیدگی‌های امنیتی ناشی از اتصال گسترده دستگاه‌ها و سیستم‌ها تأکید کرد. وی نشان داد که نیاز به رویکردهای چندلایه و یکپارچه امنیتی برای حفاظت مؤثر از این سیستم‌ها ضروری است.

## پایداری و مسئولیت‌های زیست‌محیطی

یکی از محرک‌های مهم هوشمندسازی در صنعت ریلی، نیاز به بهبود عملکرد زیست‌محیطی و دستیابی به اهداف پایداری است (Sun et al., 2022). فناوری‌های صنعت ۴,۰ فرصت‌های قابل‌توجهی برای کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی مسیرها و کاهش

1. Voronko

انتشار آلاینده‌ها فراهم می‌آورند.

عباس‌نژاد و همکاران[1] (۲۰۲۴) در مرور نظام‌مند خود بر یکپارچه‌سازی فناوری‌های صنعت ۴٫۰ در بهبود پایداری پروژه‌های ساخت حمل‌ونقل، نشان دادند که این فناوری‌ها پتانسیل قابل‌توجهی برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی دارند. همچنین، کول[2] (۲۰۲۵) بر نقش تولید سبز در عصر فناوری هوشمند تأکید کرد و راهکارهای جامعی برای پیاده‌سازی شیوه‌های پایدار ارائه داد.

## روش

این پژوهش با رویکرد کیفی و استفاده از روش فراترکیب هفت مرحله‌ای سندلوسکی و باروسو[3] (۲۰۰۷) انجام شده است. این روش، یک رویکرد نظام‌مند برای تلفیق تفسیری یافته‌های کیفی است که بر تحلیل عمیق و تفسیر بافت‌محور داده‌ها تأکید دارد. این روش شامل هفت مرحله است: ۱) تنظیم پرسش پژوهش؛ ۲) جستجوی نظام‌مند و انتخاب مطالعات؛ ۳) ارزیابی کیفیت مطالعات؛ ۴) استخراج داده‌ها و کدگذاری؛ ۵) تحلیل و تلفیق یافته‌ها با رویکرد تفسیری؛ ۶) کنترل کیفیت و اعتبارسنجی؛ ۷) ارائه یافته‌ها به‌صورت یک روایت یکپارچه. برخلاف متاآنالیز یا فراخلاصه که بر شمارش و جمع‌بندی کمی تمرکز دارند، فراترکیب به دنبال ایجاد تفسیری نوین و عمیق‌تر از مفاهیم موجود در مطالعات است.

انتخاب این روش برای پژوهش حاضر به دلایل متعددی صورت گرفت. نخست، ماهیت چندوجهی و پیچیده موضوع ارزیابی بلوغ صنعت ریلی در عصر انقلاب صنعتی چهارم، نیازمند بررسی جامع و نظام‌مند ادبیات موجود بود. دوم، پراکندگی یافته‌های مرتبط در مطالعات مختلف و عدم وجود الگوی یکپارچه‌ای در این حوزه، ضرورت تلفیق و ترکیب این یافته‌ها را آشکار می‌ساخت. سوم، فراترکیب امکان استخراج مفاهیم و

1. Abbasnejad et al.
2. Koul
3. Sandelowski & Barroso

الگوهای عمق‌تر از آنچه در مطالعات منفرد قابل‌دستیابی است را فراهم می‌آورد.

جامعه موردمطالعه در این پژوهش، مقالات علمی منتشرشده در حوزه بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی و فناوری‌های مرتبط با انقلاب صنعتی چهارم در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۵ است. انتخاب این بازه زمانی به دلیل تحولات گسترده در فناوری‌های مرتبط با نسل چهارم صنعت و افزایش توجه به هوشمندسازی صنایع صورت گرفت. در این دوره، فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و تحلیل کلان‌داده به‌طور چشمگیری در صنعت ریلی مورداستفاده قرار گرفته‌اند.

برای دستیابی به مقالات مرتبط، از مجموعه‌ای از کلیدواژه‌های تخصصی استفاده شد که شامل مدل ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی، نسل چهارم صنعت در حمل‌ونقل ریلی، متن‌کاوی در صنعت ریلی، حمل‌ونقل ریلی پایدار، تحلیل داده‌های بزرگ در حمل‌ونقل ریلی، اینترنت اشیا در صنعت ریلی، هوش مصنوعی در مدیریت ریلی، چالش‌های هوشمندسازی صنعت ریلی، مدیریت هوشمند شبکه‌های ریلی، تحلیل پایداری در حمل‌ونقل ریلی و سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی هوشمند بود.

جستجوی مقالات در پایگاه‌های داده علمی معتبر بین‌المللی و همچنین پایگاه‌های داده داخلی انجام شد. فرآیند غربالگری مقالات با به‌کارگیری معیارهای ارزیابی دقیق و نظام‌مند صورت گرفت که شامل بررسی دقیق عناوین، محتوای مقالات، چکیده‌ها و سایر ویژگی‌های تخصصی بود.

از مجموع ۳۴۲ مقاله یافت‌شده در جستجوی اولیه، ابتدا ۸۹ مقاله تکراری حذف شدند. سپس ۲۵۳ مقاله باقی‌مانده بر اساس عنوان و چکیده غربال‌شده و ۱۴۶ مقاله نامرتبط حذف گردید. در مرحله بعد، ۱۰۷ مقاله به‌صورت متن کامل بررسی شد که از این میان ۲۰ مقاله به دلیل عدم دسترسی به متن کامل یا کیفیت پایین روش‌شناسی (بر اساس ابزار CASP) حذف شدند. درنهایت، ۸۷ مقاله واجد شرایط برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. دو پژوهشگر به‌صورت مستقل فرآیند غربالگری را انجام دادند و اختلافات از طریق مشورت با نفر سوم (خبره صنعت ریلی) حل شد.

پس از استخراج الگوی اولیه از فراترکیب، برای اعتبارسنجی و بهبود الگوی مفهومی، از نظرات ۵ خبره استفاده شد که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. این خبرگان به روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شدند و معیارهای ورود شامل: ۱) حداقل ۱۰ سال تجربه کاری در صنعت حمل‌ونقل ریلی، ۲) آشنایی با فناوری‌های صنعت ۴,۰، ۳) سابقه مدیریتی یا تحقیقاتی در حوزه هوشمندسازی ریلی، بود. نقش خبرگان محدود به بازبینی، اعتبارسنجی محتوایی و اصلاحات نهایی الگو بود (نه کشف شاخص‌های جدید). جلسات مشورتی نیمه‌ساختاریافته به‌صورت حضوری و آنلاین برگزار شد و بازخوردها ثبت و در الگوی مفهومی اعمال گردید. تمامی ابعاد و شاخص‌های حاصل از فراترکیب مطالعات کتابخانه‌ای استخراج شدند و تنها ۳ کد عملیاتی بر اساس پیشنهاد خبرگان برای انطباق با شرایط محلی اصلاح شدند.

**جدول ۱: مشخصات خبرگان شرکت‌کننده**

| ردیف | تخصص | سابقه کاری | سمت فعلی |
|---|---|---|---|
| ۱ | مهندسی صنایع | ۱۵ سال | مدیر برنامه‌ریزی استراتژیک راه‌آهن |
| ۲ | مهندسی فناوری اطلاعات | ۱۲ سال | مشاور ارشد هوشمندسازی صنعت ریلی |
| ۳ | مدیریت فناوری | ۱۸ سال | رئیس اداره نوآوری و فناوری شرکت راه‌آهن |
| ۴ | مهندسی عمران–ریل | ۱۴ سال | مدیر فنی پروژه‌های صنعت ۴,۰ در متروی تهران |
| ۵ | مهندسی سیستم‌های هوشمند | ۱۱ سال | عضو هیئت‌علمی و محقق صنعت ریلی |

## یافته‌های پژوهش

مراحل اجرای فراترکیب در ادامه تشریح شده است.

### - گام اول

سؤال اصلی پژوهش بدین‌صورت تعیین شد: الگوی مفهومی ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی مبتنی بر نسل چهارم صنعت چگونه است؟ هدف اصلی شناسایی و ارائه یک الگوی جامع ارزیابی بلوغ برای صنعت حمل‌ونقل ریلی مبتنی بر فناوری‌های نسل

چهارم صنعت بود که باید ابعاد، شاخص‌ها و کدهای مختلف بلوغ دیجیتال را در صنعت ریلی تعیین کند.

جستجو در پایگاه‌های داده Scopus، Web of Science، IEEE Xplore، ScienceDirect (منابع بین‌المللی) و سید، مگیران، سیویلیکا، نورمگز (منابع داخلی) در بازه زمانی ۱ ژانویه ۲۰۱۶ تا ۳۰ آوریل ۲۰۲۵ انجام شد. زبان‌های جستجو، انگلیسی و فارسی و تاریخ اجرای جستجو، فروردین تا اردیبهشت ۱۴۰۴ بوده است. رشته جستجو به شرح زیر بوده است:

("railway" OR "rail transport") AND ("Industry 4.0" OR "digital transformation" OR "maturity model" OR "IoT" OR "artificial intelligence") AND ("assessment" OR "evaluation")

برای منابع فارسی، «صنعت ریلی» و «انقلاب صنعتی چهارم» و «بلوغ» و «ارزیابی» مورد جستجو قرار گرفت.

معیارهای ورود و خروج مقالات به‌گونه‌ای تعریف شدند که اطمینان از کیفیت و ارتباط مستقیم منابع با موضوع پژوهش حاصل گردد. مقالات موردبررسی باید در نشریات علمی دارای داوری همتا منتشر شده بودند و به زبان انگلیسی یا فارسی نگارش یافته بودند. بازه زمانی انتشار مقالات از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۵ در نظر گرفته شد تا از به‌روزترین یافته‌های پژوهشی بهره‌برداری گردد. تمرکز اصلی بر مطالعاتی بود که به موضوعات مدل‌های بلوغ دیجیتال، فناوری‌های صنعت ۴,۰ و صنعت حمل‌ونقل ریلی پرداخته بودند. انواع مطالعات پذیرفته‌شده شامل پژوهش‌های تجربی، مرورهای نظام‌مند و موردکاوی‌ها بود. از سوی دیگر، مقالات کنفرانسی بدون داوری کامل، گزارش‌های فنی و اسناد خاکستری، مطالعات خارج از حوزه موضوعی مانند حمل‌ونقل هوایی یا دریایی، مقالاتی که متن کامل آن‌ها در دسترس نبود و همچنین مطالعات تکراری یا دارای همپوشانی کامل محتوایی از فرآیند غربالگری حذف شدند. در نهایت، ۸۷ مقاله علمی مرتبط با موضوع پژوهش انتخاب شد که به فرآیند تحلیل وارد شد.

- **گام دوم**

در این مرحله، تمامی مقالات انتخاب‌شده موردبررسی دقیق قرار گرفتند. فرآیند تحلیل شامل بررسی محتوای مقالات، شناسایی مفاهیم کلیدی، کلمات کلیدی پرتکرار و الگوهای متنی بود. این تحلیل منجر به شناسایی پنج حوزه اصلی شد که در جدول ۲ ارائه شده است.

**جدول ۲.** حوزه‌های اصلی شناسایی‌شده از بررسی متون

| ردیف | حوزه اصلی | تعداد مفاهیم شناسایی‌شده | توضیحات |
|---|---|---|---|
| ۱ | فناوری‌های صنعت ۴٫۰ در حمل‌ونقل ریلی | ۹ مفهوم | شامل IoT، AI، تحلیل کلان‌داده، همزاد دیجیتال |
| ۲ | چالش‌ها و موانع هوشمندسازی | ۱۲ مفهوم | موانع فنی، مالی، سازمانی و انسانی |
| ۳ | امنیت سایبری و ریسک‌های دیجیتالی | ۸ مفهوم | حفاظت زیرساخت‌ها، مدیریت تهدیدات |
| ۴ | کاربردهای عملی و بهبود عملکرد | ۱۱ مفهوم | نگهداری پیشگیرانه، بهینه‌سازی عملیات |
| ۵ | پایداری و محیط‌زیست | ۱۲ مفهوم | کاهش انتشار کربن، انرژی‌های تجدیدپذیر |

(منبع: یافته‌های پژوهش حاضر)

- **گام سوم**

برای ارزیابی کیفیت مفاهیم استخراج‌شده، معیارهای مختلفی مانند فراوانی تکرار، ارتباط با موضوع اصلی، قابلیت اندازه‌گیری و جامعیت پوشش مورد ارزیابی قرار گرفت. الگوریتم انتخاب مفاهیم نهایی طراحی شد که شامل بررسی محتوا، ارزیابی ارتباط موضوعی، تعیین اولویت‌بندی و انتخاب نهایی بود. سیستم امتیازبندی برای مفاهیم بر اساس معیارهای عالی (۵۰-۴۱)، خیلی خوب (۴۰-۳۱)، خوب (۳۰-۲۱)، متوسط (۲۰-۱۱) و ضعیف (۱۰-۰) تعریف شد. مفاهیمی که امتیازی کمتر از ۲۰ داشتند، حذف‌شده و پس از گزینش و پالایش، مفاهیم اصلی برای ادامه روش فراترکیب انتخاب شدند.

در این مرحله، علاوه‌بر امتیازبندی اولیه که برای غربالگری مفاهیم پرتکرار و مرتبط

استفاده شد، تحلیل کیفی عمیقی بر روی بافت، زمینه نظری و غنای تفسیری هر مفهوم انجام گرفت. مفاهیمی که امتیاز عددی پایین‌تری داشتند، اما از اهمیت نظری یا کاربردی بالایی برخوردار بودند، مجدداً موردبازنگری قرارگرفته و بر اساس قضاوت پژوهشگران و مشورت با سه خبره صنعت ریلی، در تحلیل نهایی حفظ شدند. این رویکرد ترکیبی از غربالگری کمی و تفسیر کیفی، با اصول فراترکیب مبنی بر حفظ غنای بافتی و عمق مفهومی همسو است.

### - گام چهارم

اطلاعات نهایی انتخاب‌شده بر اساس هر حوزه شامل عنوان حوزه، مفاهیم کلیدی، فراوانی تکرار و ارتباط با سایر حوزه‌ها طبقه‌بندی گردید. عوامل موردنظر استخراج‌شده از مطالعه متون به‌عنوان کد در نظر گرفته شدند. در حوزه فناوری‌های صنعت ۴,۰، مفاهیمی نظیر اینترنت اشیا در راه‌آهن، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، تحلیل کلان‌داده، رایانش ابری، همزاد دیجیتال، اتوماسیون هوشمند، سیستم‌های سایبر-فیزیکی، رباتیک پیشرفته و واقعیت افزوده و مجازی شناسایی شدند.

در حوزه چالش‌ها و موانع هوشمندسازی، مفاهیمی شامل یکپارچه‌سازی سیستم‌های قدیمی، هزینه‌های بالای پیاده‌سازی، مقاومت در برابر تغییر، کمبود مهارت‌های دیجیتال، پیچیدگی فنی، مدیریت تغییر سازمانی، چالش‌های استانداردسازی، هزینه‌های نگهداری، مقیاس‌پذیری سیستم‌ها، چالش‌های قانونی و نظارتی، محدودیت‌های زیرساختی و ریسک‌های سرمایه‌گذاری استخراج گردیدند.

### - گام پنجم

پس از استخراج مفاهیم اولیه، فرآیند کدگذاری سه مرحله‌ای اجرا گردید که خلاصه آن در جدول ۳ ارائه شده است. ماتریس ارتباط بین حوزه‌های اولیه و ابعاد نهایی در

| مرحله کدگذاری | ورودی | فرآیند | خروجی | تعداد |
|---|---|---|---|---|
| کدگذاری باز | حوزه‌های شناسایی‌شده | شناسایی مفاهیم کلیدی | مفاهیم اولیه | ۵۲ مفهوم |

| مرحله کدگذاری | ورودی | فرآیند | خروجی | تعداد |
|---|---|---|---|---|
| کدگذاری محوری | مفاهیم اولیه | دسته‌بندی و تجمیع | شاخص‌های اندازه‌گیری | ۲۱ شاخص |
| کدگذاری انتخابی | شاخص‌ها | طبقه‌بندی کلان | ابعاد اصلی | ۵ بعد |

(منبع: یافته‌های پژوهش حاضر)

جدول ۴ ارائه شده است.

**جدول ۳.** خلاصه فرآیند کدگذاری سه مرحله‌ای

| مرحله کدگذاری | ورودی | فرآیند | خروجی | تعداد |
|---|---|---|---|---|
| کدگذاری باز | حوزه‌های شناسایی‌شده | شناسایی مفاهیم کلیدی | مفاهیم اولیه | ۵۲ مفهوم |
| کدگذاری محوری | مفاهیم اولیه | دسته‌بندی و تجمیع | شاخص‌های اندازه‌گیری | ۲۱ شاخص |
| کدگذاری انتخابی | شاخص‌ها | طبقه‌بندی کلان | ابعاد اصلی | ۵ بعد |

(منبع: یافته‌های پژوهش حاضر)

**جدول ٤. ماتریس تطبیق حوزه‌های اولیه با ابعاد نهایی**

| حوزه‌های اولیه | بعد نهایی | درصد پوشش | تطبیق |
|---|---|---|---|
| فناوری‌های صنعت ۴,۰ | فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حمل‌ونقل ریلی | ٪۹۵ | مستقیم |
| چالش‌ها و موانع | چالش‌ها و موانع هوشمندسازی | ٪۱۰۰ | مستقیم |
| امنیت سایبری | امنیت سایبری و ریسک‌های دیجیتالی | ٪۹۰ | مستقیم |
| کاربردهای عملی | کاربردهای عملی و بهبود عملکرد | ٪۸۵ | تطبیق با تعدیل |
| پایداری محیط‌زیست | پایداری و محیط‌زیست | ٪۱۰۰ | مستقیم |
| **میانگین کلی** | **تمامی ابعاد** | **٪۹٤** | - |

(منبع: یافته‌های پژوهش حاضر)

فراتر از طبقه‌بندی‌های عددی، تحلیل تفسیری مفاهیم استخراجی نشان داد که تحول دیجیتال در صنعت ریلی نه‌تنها از منظر فناوری، بلکه از جنبه‌های سازمانی، انسانی، امنیتی و زیست‌محیطی نیز تعریف می‌شود. برای مثال، مفهوم «مقاومت سازمانی» که در بسیاری از مطالعات به‌عنوان مانع اصلی پیاده‌سازی فناوری مطرح شد، در تحلیل عمیق‌تر نشان داد که ریشه در عدم آموزش کافی، نگرانی از امنیت شغلی و فقدان مشارکت کارکنان در

تصمیم‌گیری دارد. همچنین، یکپارچه‌سازی سیستم‌های قدیمی نه صرفاً یک چالش فنی، بلکه یک موضوع استراتژیک با ابعاد مالی، قانونی و سازمانی است.

- **گام ششم**

برای تضمین کیفیت و اعتبار یافته‌ها، روش‌های زیر به‌کار گرفته شد:

- ارزیابی کیفیت مطالعات: از ابزار CASP برای ارزیابی کیفیت روش‌شناسی مقالات کیفی استفاده شد. مطالعاتی که نمره کمتر از ۷ از ۱۰ کسب کردند، حذف شدند.
- مثلث‌سازی پژوهشگران: دو پژوهشگر به‌طور مستقل کدگذاری اولیه را انجام دادند. ضریب توافق کاپای کوهن برابر ۰/۸۶ محاسبه شد که نشان‌دهنده پایایی بالاست. اختلافات از طریق بحث و مشورت با نفر سوم حل شد.
- بازبینی توسط خبرگان: الگوی اولیه توسط ۵ خبره با حداقل ۱۰ سال تجربه در صنعت ریلی و آشنایی با فناوری‌های دیجیتال بازبینی شد. بازخوردهای آن‌ها منجر به اصلاح و بهبود برخی شاخص‌ها و کدها شد.
- روایی محتوایی: از ضریب نسبت روایی محتوا (CVR) استفاده شد که مقدار آن ۰/۸۳ محاسبه شد (بالاتر از حد قابل‌قبول ۰/۷۵ برای ۵ خبره).
- پایایی زمانی: کدگذاری ۲۰٪ از مقالات پس از ۳ هفته مجدداً انجام شد. ضریب همبستگی پیرسون برابر ۰/۹۲ بود که نشان‌دهنده ثبات کدگذاری در طول زمان است.

ضریب کاپای کلی الگوی مفهومی ۰/۸۹ محاسبه شد که نشان‌دهنده پایایی مناسب است. نتایج اعتبارسنجی در جدول ۵ خلاصه شده است.

**جدول ۵**. نتایج اعتبارسنجی الگوی مفهومی

| نوع اعتبارسنجی | روش ارزیابی | نتیجه | معیار پذیرش | وضعیت |
|---|---|---|---|---|
| روایی محتوایی | ارزیابی توسط ۵ خبره | CVR = ۰/۸۳ | > ۰/۷۵ | تأیید |
| روایی همگرا | مقایسه با استانداردهای بین‌المللی | ۸۹٪ همسویی | > ۷۵٪ | تأیید |
| پایایی بین ارزیابان | ضریب کاپای کوهن | κ = ۰/۸۶ | > ۰/۷۰ | تأیید |
| پایایی زمانی | همبستگی پیرسون | r = ۰/۹۲ | > ۰/۸۰ | تأیید |

| نوع اعتبارسنجی | روش ارزیابی | نتیجه | معیار پذیرش | وضعیت |
|---|---|---|---|---|
| پایایی کلی | ضریب کاپا | ۰/۸۹ = K | ۰/۸۰ < | تأیید |

(منبع: یافته‌های پژوهش حاضر)

## - گام هفتم

با پایان مراحل فراترکیب، الگوی نهایی ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی مبتنی بر نسل چهارم صنعت تدوین شد که شامل ۵ بعد اصلی، ۲۱ شاخص و ۸۴ کد عملیاتی است. این الگو پس از مشورت با خبرگان نهایی شد و آمادگی لازم برای ارائه و کاربرد عملی را یافت.

نتایج حاصل از فراترکیب منجر به تدوین الگوی مفهومی جامع و چندبعدی ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی شد که خلاصه آن در جدول ۶ ارائه شده است.

**جدول ٦. الگوی مفهومی نهایی ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی**

| بعد | شاخص | کدهای عملیاتی (نمونه) |
|---|---|---|
| فناوری‌های صنعت ۴,۰ | درجه پیشرفتگی اینترنت اشیا | حسگرهای هوشمند در ریل‌ها، سیستم‌های مانیتورینگ لحظه‌ای |
| | میزان بلوغ هوش مصنوعی | الگوریتم‌های تشخیص خرابی خودکار، پیش‌بینی نقص تجهیزات |
| | سطح بلوغ تحلیل کلان‌داده | تحلیل ترافیک مسافری، بهینه‌سازی جدول حرکت قطارها |
| | درجه تکامل همزاد دیجیتال | شبیه‌سازی دیجیتال عملکرد، مدل‌سازی سه‌بعدی زیرساخت‌ها |
| چالش‌ها و موانع | غلبه بر موانع فنی و سازمانی | یکپارچه‌سازی سیستم‌های قدیمی، مقاومت سازمانی |
| | تأمین مالی پایدار | هزینه‌های سنگین اولیه، ریسک‌های بازگشت سرمایه |
| | توانمندسازی منابع انسانی | آموزش کارکنان، کمبود متخصصان هوش مصنوعی |
| | استانداردسازی و مقیاس‌گذاری | عدم وجود استانداردهای واحد، چالش‌های توسعه |
| امنیت سایبری | بلوغ پروتکل‌های امنیتی | رمزنگاری داخلی، کنترل دسترسی چندمرحله‌ای |
| | آمادگی عملیاتی در برابر تهدیدات | تیم‌های پاسخ سریع، مانورهای شبیه‌سازی حملات |
| | حفاظت اطلاعات حساس | طبقه‌بندی اطلاعات حیاتی، رمزنگاری داده‌ها |
| | تداوم عملیات و مدیریت بحران | سیستم‌های پشتیبان، فرآیندهای بازیابی سریع |
| کاربردهای عملی | بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی | نگهداری پیشگیرانه، بهینه‌سازی مسیریابی |
| | هوشمندی مدیریت دارایی | پایش لحظه‌ای تجهیزات، مدیریت چرخه عمر |

| بعد | شاخص | کدهای عملیاتی (نمونه) |
|---|---|---|
| | ارتقای تجربه مسافران | سیستم‌های اطلاع‌رسانی پیشرفته، بلیت هوشمند |
| | سیستم‌های کنترل پیشرفته | کنترل اتوماتیک قطارها، مدیریت هوشمند سوزن‌بندی |
| پایداری و محیط‌زیست | کاهش مصرف انرژی | بازیابی انرژی ترمز، بهینه‌سازی پروفایل سرعت |
| | توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر | پنل‌های خورشیدی، انرژی بادی، سیستم‌های ذخیره |
| | مدیریت آلودگی | کنترل آلودگی صوتی، مسیریابی سازگار با اکوسیستم |
| | انطباق با استانداردهای پایداری | رعایت استانداردهای بین‌المللی، گواهینامه‌های سبز |

(منبع: یافته‌های پژوهش حاضر)

بعد فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حمل‌ونقل ریلی که بنیادی‌ترین جنبه تحول دیجیتال در صنعت ریلی محسوب می‌شود، شامل چهار شاخص اصلی است. شاخص درجه پیشرفتگی اینترنت اشیا در زیرساخت‌های ریلی بر اهمیت حسگرهای هوشمند تعبیه‌شده در ریل‌ها، سیستم‌های مانیتورینگ لحظه‌ای تجهیزات، شبکه‌های ارتباطی اختصاصی ریلی و پلتفرم‌های مدیریت یکپارچه اتصالات تأکید دارد (Zhong et al., 2021). میزان بلوغ هوش مصنوعی در عملیات ریلی به‌عنوان دومین شاخص، الگوریتم‌های تشخیص خرابی خودکار، سیستم‌های پیش‌بینی نقص تجهیزات، برنامه‌ریزی مسیر با هوش مصنوعی و بهینه‌سازی انرژی با یادگیری ماشین را در بر می‌گیرد (Ale et al., 2024). این شاخص نشان‌دهنده قابلیت سازمان در بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته هوش مصنوعی برای بهبود عملیات ریلی است. سطح بلوغ تحلیل کلان‌داده در تصمیم‌گیری عملیاتی شامل تحلیل ترافیک مسافری، بهینه‌سازی جدول حرکت قطارها، پیش‌بینی تقاضای حمل‌ونقل و سیستم‌های پشتیبان تصمیم هوشمند است (Dong et al., 2022). این شاخص نشان‌دهنده توانایی سازمان در استفاده مؤثر از حجم عظیم داده‌های تولیدشده برای بهبود تصمیم‌گیری‌ها است. درجه تکامل فناوری همزاد دیجیتال به‌عنوان چهارمین شاخص، شبیه‌سازی دیجیتال عملکرد قطارها، مدل‌سازی سه‌بعدی زیرساخت‌ها، پیش‌بینی رفتار سیستم تحت شرایط متفاوت و بهینه‌سازی طراحی ایستگاه‌ها را شامل می‌شود (Errandonea et al., 2021). این فناوری امکان آزمایش و بهینه‌سازی سیستم‌ها در محیط مجازی قبل از پیاده‌سازی فیزیکی را فراهم می‌آورد.

بعد چالش‌ها و موانع هوشمندسازی که یکی از حیاتی‌ترین جنبه‌های موفقیت در تحول دیجیتال محسوب می‌شود، شامل چهار شاخص کلیدی است. سطح غلبه بر موانع فنی و سازمانی پیاده‌سازی شامل یکپارچه‌سازی سیستم‌های قدیمی با فناوری‌های نوین، چالش‌های هماهنگی بین بخش‌های مختلف، پیچیدگی‌های فنی پروژه‌های دیجیتال و مقاومت سازمانی در برابر تغییرات است (Montero, 2020). میزان تأمین مالی پایدار پروژه‌های نوآوری بر اهمیت هزینه‌های سنگین اولیه پیاده‌سازی، چالش‌های تأمین مالی پروژه‌های نوآوری، ریسک‌های بازگشت سرمایه فناوری‌های جدید و عدم تناسب بودجه با نیازهای دیجیتال تأکید دارد (Awodele et al., 2024). این شاخص نشان‌دهنده اهمیت برنامه‌ریزی مالی دقیق در موفقیت پروژه‌های دیجیتالی است. درجه توانمندسازی منابع انسانی در حوزه دیجیتال شامل نیاز به آموزش کارکنان برای فناوری‌های پیشرفته، کمبود متخصصان هوش مصنوعی در صنعت ریلی، عدم آشنایی با سیستم‌های پیچیده دیجیتال و نیاز به بازآموزی نیروی انسانی موجود است (Ogunmodede & Zincume, 2024). این شاخص بر اهمیت سرمایه‌گذاری در توسعه منابع انسانی تأکید دارد. سطح بلوغ استانداردسازی و قابلیت مقیاس‌گذاری شامل عدم وجود استانداردهای واحد صنعتی، چالش‌های توسعه سیستم‌ها در مقیاس وسیع، مشکلات سازگاری فناوری‌های مختلف و پیچیدگی‌های نظارتی و قانونی است (Hatta et al., 2024). این شاخص بر اهمیت توسعه چارچوب‌های استاندارد برای تسهیل پیاده‌سازی گسترده فناوری‌ها تأکید دارد.

بعد امنیت سایبری و ریسک‌های دیجیتالی، با توجه به حیاتی بودن زیرساخت‌های ریلی، اهمیت ویژه‌ای در الگوی مفهومی پیشنهادی دارد و شامل چهار شاخص است. میزان بلوغ پروتکل‌های امنیتی بومی شامل پیاده‌سازی سیستم‌های رمزنگاری داخلی، پروتکل‌های کنترل دسترسی چندمرحله‌ای، مکانیزم‌های احراز هویت پیشرفته و استانداردهای امنیتی متناسب با زیرساخت کشور است (López-Aguilar et al., 2022). درجه آمادگی عملیاتی در برابر تهدیدات سایبری بر تشکیل تیم‌های پاسخ سریع به حوادث، برگزاری مانورهای شبیه‌سازی حملات، استقرار سیستم‌های هشدار زودهنگام نفوذ و ایجاد

زیرساخت‌های عملیاتی ایزوله تأکید دارد (Voronko, 2024). این شاخص نشان‌دهنده قابلیت سازمان در واکنش سریع و مؤثر به تهدیدات امنیتی است. سطح بلوغ حفاظت و مدیریت اطلاعات حساس شامل طبقه‌بندی و کنترل دسترسی به اطلاعات حیاتی، رمزنگاری داده‌های در حال انتقال و ذخیره، مدیریت حریم خصوصی اطلاعات مسافران و سیستم‌های پایش مداوم امنیت است. میزان آمادگی تداوم عملیات و مدیریت بحران نیز شامل سیستم‌های پشتیبان خارج از شبکه، فرآیندهای بازیابی سریع اطلاعات، برنامه‌های عملیاتی اضطراری مستقل و پروتکل‌های واکنش به بحران‌های دیجیتال است.

بعد کاربردهای عملی و بهبود عملکرد که بر جنبه‌های کاربردی و نتایج ملموس هوشمندسازی تمرکز دارد، شامل چهار شاخص کلیدی است. درجه بلوغ بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی شامل نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر داده، بهینه‌سازی مسیریابی و زمان‌بندی حرکت، مدیریت هوشمند ناوگان و منابع و کنترل خودکار سیستم‌های حیاتی است (Bustos et al., 2021). سطح هوشمندی مدیریت دارایی بر پایش وضعیت تجهیزات به‌صورت لحظه‌ای، سیستم‌های تشخیص و هشدار خرابی، مدیریت چرخه عمر دارایی‌ها و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تعمیرات تأکید دارد (Bianchi et al., 2025). این شاخص نشان‌دهنده قابلیت سازمان در مدیریت مؤثر دارایی‌های فیزیکی از طریق فناوری‌های هوشمند است. میزان پیشرفتگی در ارتقای تجربه مسافران و خدمات شامل سیستم‌های اطلاع‌رسانی پیشرفته، پلتفرم‌های رزرو و بلیت هوشمند، خدمات شخصی‌سازی‌شده برای مسافران و سیستم‌های مدیریت ترافیک انسانی است. درجه تکامل سیستم‌های کنترل و نظارت پیشرفته نیز شامل کنترل اتوماتیک حرکت قطارها، سیستم‌های هوشمند مدیریت سوزن‌بندی، کنترل خودکار سیگنال‌ها و علائم و سیستم‌های نظارت جامع عملیات است (Harrod, 2025).

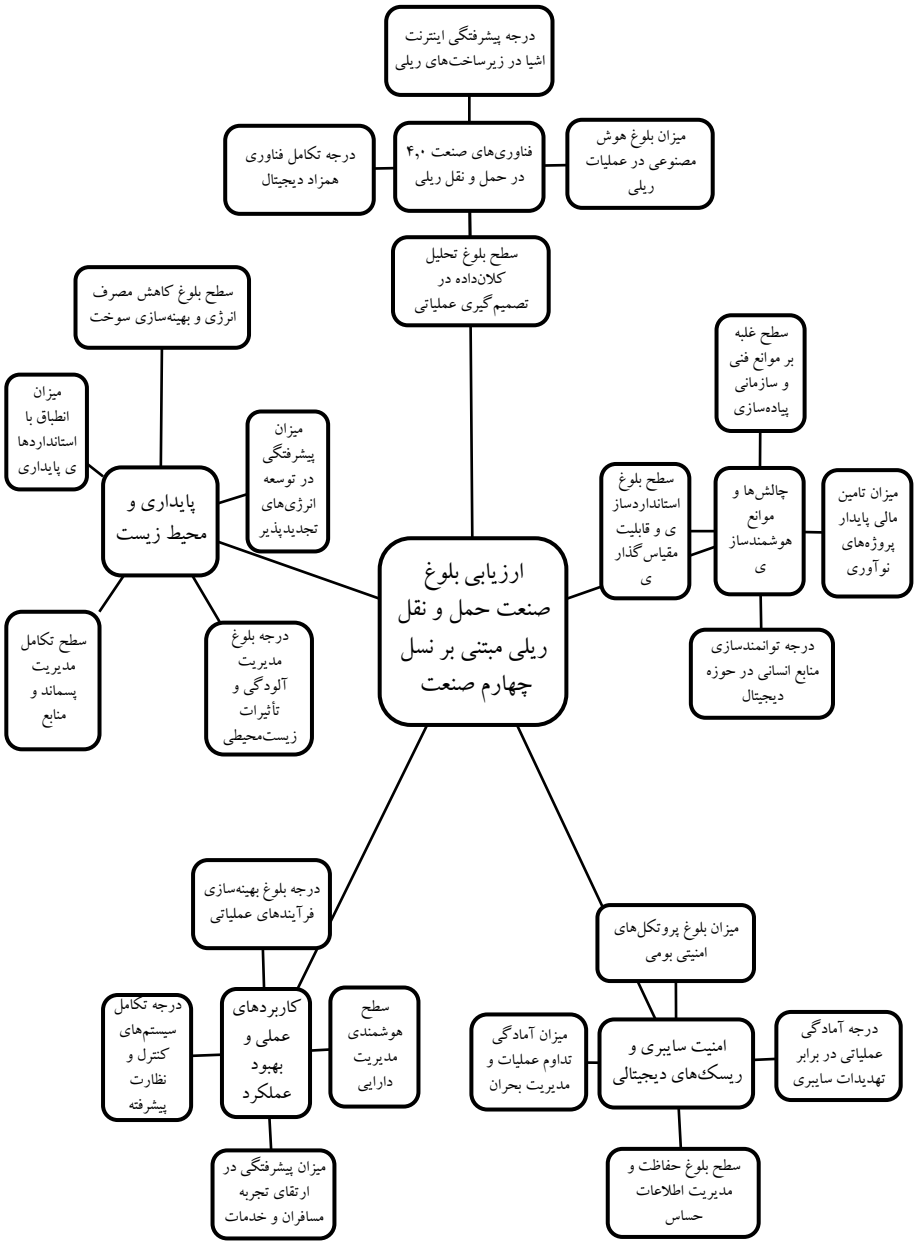
بعد پایداری و محیط‌زیست، با توجه به اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی، نقش مهمی در ارزیابی بلوغ دارد و شامل چهار شاخص است. سطح بلوغ کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی سوخت شامل فناوری‌های بازیابی انرژی ترمز، بهینه‌سازی پروفایل سرعت

قطارها، سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند و کاهش اتلاف انرژی در تجهیزات است (Kljaić et al., 2023). میزان پیشرفتگی در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر بر نصب پنل‌های خورشیدی در ایستگاه‌ها، استفاده از انرژی بادی در مسیرهای باز، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و فناوری‌های هیبریدی تولید برق تأکید دارد (Koul, 2025). این شاخص نشان‌دهنده تعهد سازمان به استفاده از منابع انرژی پایدار است. درجه بلوغ مدیریت آلودگی و تأثیرات زیست‌محیطی شامل سیستم‌های کاهش آلودگی صوتی پیشرفته، فناوری‌های کنترل ارتعاش، مسیریابی سازگار با اکوسیستم و استفاده از مواد سبز در ساخت‌وساز است. سطح تکامل مدیریت پسماند و منابع نیز شامل جداسازی و بازیافت خودکار ضایعات، بازیابی و استفاده مجدد از آب، مدیریت ضایعات الکترونیکی تجهیزات و بازیافت قطعات و مواد مصرفی است. میزان انطباق با استانداردهای پایداری به‌عنوان چهارمین شاخص این بعد، شامل رعایت استانداردهای بین‌المللی محیط‌زیست، اخذ گواهینامه‌های سبز، تطبیق با قوانین ملی محیط‌زیست و گزارش‌دهی شفاف عملکرد زیست‌محیطی است (Sun et al., 2022). این شاخص نشان‌دهنده تعهد سازمان به پاسخگویی در قبال عملکرد زیست‌محیطی و انطباق با الزامات قانونی است.

الگوی مفهومی ارائه‌شده دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی است که آن را از سایر الگوهای موجود متمایز می‌سازد. جامعیت علمی این الگوی مفهومی از طریق استوار بودن بر مرور نظام‌مند ادبیات معتبر بین‌المللی و داخلی تضمین شده است. کاربردی‌بودن الگو نیز در قابلیت پیاده‌سازی و اندازه‌گیری در محیط‌های عملی نمایان است که امکان استفاده عملی توسط سازمان‌های مختلف را فراهم می‌آورد. انعطاف‌پذیری الگو در تطبیق‌پذیری با شرایط مختلف سازمانی و ملی مشهود است، به‌طوری‌که می‌تواند با توجه به ویژگی‌های خاص هر سازمان یا کشور تطبیق یابد. جامعیت موضوعی نیز از طریق پوشش تمامی ابعاد مهم تحول دیجیتال در صنعت حمل‌ونقل ریلی حاصل شده است که شامل جنبه‌های فنی، سازمانی، امنیتی، عملکردی و زیست‌محیطی می‌شود. مبتنی بر شواهد بودن الگوی مفهومی نیز از طریق استخراج از یافته‌های تحقیقات معتبر و روش‌های علمی مدون تضمین شده

است که اعتبار علمی و قابلیت اتکای نتایج را افزایش می‌دهد. این ویژگی‌ها درمجموع، الگویی جامع و کاربردی را برای ارزیابی بلوغ صنعت ریلی در عصر انقلاب صنعتی چهارم ارائه می‌دهند. الگوی مفهومی نهایی در شکل ۱ ارائه شده است.

**شکل ۱. الگوی مفهومی جهت ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی مبتنی بر نسل چهارم صنعت (منبع: یافته‌های پژوهش حاضر)**



الگوی مفهومی ارائه‌شده در این پژوهش باوجود جامعیت نظری، نیازمند تبیین چگونگی کاربست عملی در سازمان‌های ریلی است. بر این اساس، یک چارچوب عملیاتی پنج‌مرحله‌ای برای استفاده از این الگو پیشنهاد می‌شود که مبتنی بر بهترین شیوه‌های مدیریت پروژه‌های دیجیتالی در صنعت ریلی است.

- **مرحله اول: ارزیابی جامع وضعیت موجود**

در این مرحله، سازمان باید با تشکیل تیمی میان‌رشته‌ای متشکل از کارشناسان فنی، مدیران فناوری اطلاعات، مسئولان عملیات، متخصصان امنیت سایبری و نمایندگان بخش‌های مختلف، به ارزیابی سیستماتیک هر یک از ۲۱ شاخص شناسایی‌شده بپردازد. این ارزیابی باید هم از طریق مستندسازی وضعیت موجود فناوری‌ها و زیرساخت‌ها و هم از طریق مصاحبه با کارشناسان و مدیران در سطوح مختلف انجام شود. برای هر شاخص، سازمان باید پاسخ سؤالات کلیدی مشخصی را ارائه دهد. به‌عنوان نمونه، برای شاخص «درجه پیشرفتگی اینترنت اشیا در زیرساخت‌های ریلی»، سؤالات عبارت‌اند از: آیا حسگرهای هوشمند در ریل‌ها، قطارها و تجهیزات حیاتی نصب شده‌اند؟ چند درصد از دارایی‌های فیزیکی تحت پایش لحظه‌ای قرار دارند؟ آیا شبکه ارتباطی اختصاصی و پایدار برای انتقال داده‌های اینترنت اشیا وجود دارد؟ آیا پلتفرم یکپارچه برای مدیریت و تحلیل داده‌های اینترنت اشیا پیاده‌سازی شده است؟ پاسخ‌ها باید بر اساس داده‌های عینی و قابل اندازه‌گیری باشد. نتیجه این مرحله، یک نقشه وضعیت بلوغ است که موقعیت سازمان را در هر یک از پنج بعد و ۲۱ شاخص به‌صورت بصری نمایش می‌دهد.

- **مرحله دوم: تحلیل شکاف‌ها و اولویت‌بندی استراتژیک**

پس از ارزیابی وضعیت موجود، سازمان باید شکاف‌های موجود بین وضعیت فعلی و وضعیت مطلوب را تحلیل کند. این تحلیل باید به دو بعد اثرگذاری و امکان‌پذیری توجه داشته باشد. اثرگذاری به معنای میزان تأثیر بهبود یک شاخص بر عملکرد کلی سازمان، ایمنی، کاهش هزینه‌ها و رضایت مسافران است. امکان‌پذیری به منابع مالی، فنی، انسانی و

زمـان موردنیـاز بـرای بهبـود آن شـاخص اشـاره دارد. بـا اسـتفاده از مـاتریس اثـر-امکـان، شاخص‌ها به چهار دسته تقسیم می‌شوند: اولویـت اول (اثـر بـالا و امکـان بـالا) کـه بایـد در کوتاه‌مدت (۶-۱۲ ماه) پیاده‌سازی شوند؛ اولویت دوم (اثر بالا و امکان پـایین) کـه نیازمنـد برنامه‌ریزی بلندمـدت و تـأمین منـابع هسـتند؛ اولویـت سـوم (اثـر پـایین و امکـان بـالا) کـه می‌توانند به‌عنوان پروژه‌های زودبازده در نظر گرفته شوند؛ و اولویـت چهـارم (اثـر پـایین و امکان پایین) که در حال حاضر توجیه اقتصادی ندارنـد (Sun et al., 2022). بـه‌عنوان‌مثال، پیاده‌سـازی سیسـتم‌های نگهـداری پیشـگیرانه مبتنـی بـر هـوش مصـنوعی معمـولاً در دسـته اولویت اول قرار می‌گیرد، زیـرا هـم اثرگـذاری بـالایی در کـاهش هزینـه‌های نگهـداری و افزایش قابلیت اطمینان دارد و هـم بـا اسـتفاده از راهکارهـای نرم‌افـزاری موجـود در بـازار، امکان‌پذیری آن بالاست (Bustos et al., 2021). در مقابل، ایجـاد همـزاد دیجیتـال کامـل برای کل شبکه ریلی، اگرچه اثرگذاری بالایی دارد، اما به دلیل پیچیدگی فنی و هزینه بـالا، در دسته اولویت دوم قرار می‌گیرد (Errandonea et al., 2021).

- **مرحله سوم: طراحی برنامه عملیاتی مرحله‌ای**

برای هر یک از شاخص‌های اولویت‌دار، سازمان باید برنامه عملیاتی مشخصی طراحی کنـد که شامل اهداف کمی، اقدامات مشخص، مسئولان اجرایی، جدول زمانی، بودجه موردنیـاز و شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) باشد (Kljaić et al., 2023). به‌عنوان نمونـه، بـرای شاخص «میزان بلوغ هوش مصنوعی در عملیات ریلی»، یک برنامه عملیاتی می‌توانـد شـامل موارد زیر باشد: هدف کمی - پیاده‌سازی سیستم تشخیص خرابی خودکار در ۱۰۰ کیلومتر از پرترافیک‌ترین خطوط ریلی؛ اقدامات مشخص شامل نصب شبکه حسـگرهای ارتعـاش و دما در ۳ ماه اول، خرید و تنظیم نرم‌افزار تحلیل داده و یادگیری ماشـین در ماه‌هـای ۴ تـا ۶، جمع‌آوری داده‌های تاریخی و آموزش الگوریتم‌ها در ماه‌های ۷ تا ۹، آزمایش و راه‌اندازی آزمایشی در ماه‌های ۱۰ تا ۱۲؛ مسئول اجرایی - مدیر فناوری اطلاعـات بـا همکـاری مـدیر عملیات و نگهداری؛ بودجه - ۵۰۰ میلیون تومان برای سخت‌افزار، ۳۰۰ میلیون تومان بـرای نرم‌افزار، ۲۰۰ میلیون تومان برای مشاوره و آموزش؛ شـاخص‌های کلیـدی عملکـرد شـامل

کاهش ۳۰٪ زمان توقف ناخواسته قطارها، کاهش ۲۵٪ هزینه‌های نگهداری اضطراری، افزایش ۱۵٪ دقت تشخیص نقص تجهیزات. این رویکرد مرحله‌ای و مبتنی بر KPI، امکان پایش مستمر پیشرفت و اصلاح برنامه در صورت نیاز را فراهم می‌آورد.

- **مرحله چهارم: اجرا با رویکرد پایلوت**

توصیه می‌شود سازمان‌ها پیاده‌سازی را با پروژه‌های پایلوت کوچک‌مقیاس آغاز کنند تا ریسک‌های احتمالی را کاهش دهند و از تجربه کسب‌شده برای گسترش استفاده کنند (Gerhátová et al., 2021). به‌عنوان‌مثال، اگر هدف پیاده‌سازی سیستم اینترنت اشیا در کل شبکه است، می‌توان ابتدا آن را در یک خط یا یک ایستگاه پرترافیک پیاده‌سازی کرد. در طول مرحله پایلوت، سازمان باید به‌طور منظم داده‌های عملکرد را جمع‌آوری کرده، چالش‌ها و مشکلات را شناسایی کند و راهکارهای بهبود را اعمال نماید (Zhong et al., 2021). این رویکرد تکراری امکان یادگیری سازمانی و کاهش هزینه‌های اشتباهات را فراهم می‌کند. همچنین، در این مرحله باید به مدیریت تغییر سازمانی توجه ویژه شود. تجربه نشان داده که یکی از دلایل اصلی شکست پروژه‌های دیجیتالی، مقاومت نیروی انسانی و عدم پذیرش فناوری‌های جدید است (Carranza et al., 2023). بنابراین، باید برنامه‌های آموزشی جامع برای کارکنان، جلسات توجیهی برای مدیران و مکانیزم‌های انگیزشی برای تشویق پذیرش فناوری‌های نوین طراحی شود.

- **مرحله پنجم: ارزیابی مجدد و بهبود مستمر**

پس از اتمام هر چرخه پیاده‌سازی (معمولاً ۱۲ ماه)، سازمان باید ارزیابی بلوغ را مجدداً تکرار کند تا میزان پیشرفت را اندازه‌گیری کرده و برنامه سال بعد را بر اساس یافته‌های جدید تنظیم نماید (Brezavšček & Baggia, 2025). این ارزیابی مجدد باید شامل مقایسه KPI های واقعی با اهداف تعیین‌شده، شناسایی درس‌های آموخته‌شده و تحلیل بازده سرمایه‌گذاری پروژه‌های انجام‌شده باشد. همچنین، سازمان باید عملکرد خود را با استانداردهای بین‌المللی و سازمان‌های ریلی پیشرو مقایسه کند (بنچ‌مارکینگ) تا

فرصت‌های بهبود بیشتر را شناسایی نماید (Zunder et al., 2023). نتایج این ارزیابی‌ها باید در گزارش‌های مدیریتی ارائه‌شده و در تصمیم‌گیری‌های استراتژیک سازمان مورداستفاده قرار گیرد.

برای روشن‌تر شدن کاربست این چارچوب، فرض کنید یک شرکت راه‌آهن منطقه‌ای با شبکه‌ای به طول ۵۰۰ کیلومتر و ۱۵ ایستگاه تصمیم به ارتقای بلوغ دیجیتال خود گرفته است. پس از انجام ارزیابی اولیه بر اساس الگوی پیشنهادی، مشخص می‌شود که سازمان در بعد «فناوری‌های صنعت ۴٫۰» نمره پایینی دارد (۲۰ از ۱۰۰) و تنها ۵٪ تجهیزات تحت پایش دیجیتال قرار دارند. در بعد «چالش‌ها و موانع»، کمبود نیروی متخصص و هزینه‌های بالای اولیه به‌عنوان موانع اصلی شناسایی می‌شوند. بر اساس ماتریس اولویت‌بندی، شرکت تصمیم می‌گیرد در سال اول روی سه شاخص تمرکز کند: ۱) پیاده‌سازی سیستم نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر اینترنت اشیا و هوش مصنوعی در خط اصلی به طول ۱۰۰ کیلومتر؛ ۲) راه‌اندازی پلتفرم بلیت هوشمند و اطلاع‌رسانی مسافران در ۵ ایستگاه پرتردد؛ ۳) ایجاد تیم امنیت سایبری و پیاده‌سازی پروتکل‌های امنیتی پایه. برای شاخص اول، شرکت با سرمایه‌گذاری ۱ میلیارد تومان، ۲۰۰ حسگر نصب می‌کند، یک پلتفرم تحلیل داده راه‌اندازی می‌نماید و ۱۰ نفر از کارکنان را آموزش می‌دهد. پس از ۱۲ ماه، ارزیابی مجدد نشان می‌دهد که زمان توقف قطارها ۳۵٪ کاهش‌یافته، هزینه‌های نگهداری ۲۸٪ کاهش داشته و رضایت مسافران ۱۸٪ افزایش یافته است. بر اساس این موفقیت، شرکت برنامه گسترش این سیستم به کل شبکه را در سال دوم تدوین می‌کند. این مثال نشان می‌دهد که الگوی پیشنهادی نه‌تنها یک چارچوب نظری، بلکه ابزاری عملی برای هدایت تحول دیجیتال است که می‌تواند به نتایج ملموس و قابل‌اندازه‌گیری منجر شود.

## بحث و تفسیر یافته‌ها

نتایج حاصل از این پژوهش، الگوی جامعی برای ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی در عصر انقلاب صنعتی چهارم ارائه می‌دهد که با مطالعات پیشین همسویی قابل‌توجهی دارد و

درعین‌حال، نوآوری‌هایی را نیز به همراه دارد. تحلیل عمیق‌تر هر یک از ابعاد شناسایی‌شده، بینش‌های مهمی در مورد وضعیت فعلی و آینده این صنعت فراهم می‌آورد. اهمیت بعد فناوری‌های صنعت ۴,۰ در الگوی مفهومی پیشنهادی با یافته‌های لیتون-بنادیز و همکاران[1] (۲۰۲۲) همسو است که در مرور نظام‌مند خود بر کاربردهای فناوری‌های صنعت ۴,۰ در صنعت حمل‌ونقل ریلی، بر نقش محوری این فناوری‌ها در تحول این صنعت تأکید کردند. تمرکز بر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، تحلیل کلان‌داده و همزاد دیجیتال در الگوی مفهومی حاضر، انطباق قابل‌توجهی با اولویت‌های شناسایی‌شده در ادبیات بین‌المللی دارد. دیتلمایر و همکاران[2] (۲۰۲۲) در بررسی کاربرد اینترنت اشیا برای حمل‌ونقل ریلی، بر اهمیت یکپارچه‌سازی سیستم‌ها و ایجاد پلتفرم‌های مدیریت یکپارچه تأکید کردند که با شاخص درجه پیشرفتگی اینترنت اشیا در زیرساخت‌های ریلی در الگوی مفهومی حاضر همخوانی دارد. همچنین، تأکید بر الگوریتم‌های تشخیص خرابی خودکار و سیستم‌های پیش‌بینی نقص تجهیزات با یافته‌های بیانچی و همکاران[3] (۲۰۲۵) در مورد تکنیک‌های نوین نظارت بر زیرساخت‌های ریلی انطباق دارد.

شناسایی چالش‌ها و موانع هوشمندسازی به‌عنوان یکی از ابعاد اصلی الگوی مفهومی، اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا بسیاری از پروژه‌های دیجیتالی به دلیل عدم توجه کافی به این موانع با شکست مواجه می‌شوند. کارانزا و همکاران[4] (۲۰۲۳) در تحلیل چالش‌های صنعت ریلی، بر پیچیدگی‌های ویژه این صنعت در پذیرش فناوری‌های نوین اشاره کردند که با شاخص‌های شناسایی‌شده در این بعد همسویی دارد. یکپارچه‌سازی سیستم‌های قدیمی با فناوری‌های نوین که به‌عنوان یکی از کدهای مهم در این بعد شناسایی‌شده، با یافته‌های مونترو[5] (۲۰۲۰) در مورد دوگانگی هوشمندسازی در صنعت ریلی انطباق دارد. وی نشان داد که تعادل بین حفظ زیرساخت‌های موجود و پیاده‌سازی فناوری‌های نوین، یکی از

1. Laiton-Bonadiez et al.
2. Dietlmeier et al.
3. Bianchi et al.
4. Carranza et al.
5. Montero

پیچیده‌ترین چالش‌های این صنعت است. کمبود مهارت‌های دیجیتال که در شاخص توانمندسازی منابع انسانی مورد تأکید قرارگرفته، با مطالعه اوگانموده و زینکوم[1] (۲۰۲۴) در مورد توسعه مهارت‌های ریلی برای انقلاب صنعتی چهارم در کشورهای درحال‌توسعه همخوانی دارد. آن‌ها نشان دادند که شکاف مهارت‌ها یکی از مهم‌ترین موانع موفقیت پروژه‌های دیجیتال در این کشورها است.

اهمیت بعد امنیت سایبری در الگوی مفهومی پیشنهادی با تحقیقات لوپزآگیلار و همکاران[2] (۲۰۲۲) همسو است که در مرور نظام‌مند امنیت اطلاعات و حریم خصوصی در حمل‌ونقل ریلی، بر افزایش تهدیدات امنیتی هم‌زمان با هوشمندسازی تأکید کردند. شناسایی چهار شاخص در این بعد نشان‌دهنده درک جامع از ابعاد مختلف امنیت سایبری در محیط‌های ریلی است. تأکید بر پروتکل‌های امنیتی بومی در الگوی مفهومی حاضر، نکته مهمی است که در بسیاری از مطالعات مشابه کمتر موردتوجه قرار گرفته است. این تأکید با ویژگی‌های خاص زیرساخت‌های حیاتی هر کشور و نیاز به توسعه راهکارهای امنیتی متناسب با شرایط محلی ارتباط دارد. ورونکو (۲۰۲۴) نیز بر اهمیت توسعه رویکردهای امنیتی خاص برای محیط‌های ریلی تأکید کرد. آمادگی عملیاتی در برابر تهدیدات سایبری که به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی شناسایی‌شده، با یافته‌های جابلونسکی[3] (۲۰۲۲) در مورد روندهای نوین افزایش سطح ایمنی حمل‌ونقل ریلی همخوانی دارد. وی بر اهمیت آمادگی سازمانی برای مقابله با تهدیدات نوظهور تأکید کرد.

بعد کاربردهای عملی و بهبود عملکرد که بر نتایج ملموس و قابل‌اندازه‌گیری هوشمندسازی تمرکز دارد، اهمیت ویژه‌ای در اثبات ارزش سرمایه‌گذاری‌های انجام شده دارد. بوستوس و همکاران (۲۰۲۱) در ارائه روش‌شناسی یکپارچه‌سازی قطارهای پرسرعت در نگهداری ۴,۰، نشان دادند که بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی می‌تواند منجر به بهبود

1. Ogunmodede & Zincume
2. López-Aguilar et al.
3. Jabłoński

قابل‌توجه کارایی و کاهش هزینه‌ها شود. تأکید بر نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر داده در شاخص بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی، با روند کلی صنعت به سمت نگهداری هوشمند همسو است. این رویکرد که در مطالعات متعددی ازجمله بیانچی و همکاران (۲۰۲۵) مورد تأکید قرارگرفته، پتانسیل قابل‌توجهی برای کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش قابلیت اطمینان دارد. شاخص ارتقای تجربه مسافران و خدمات نیز جنبه مهمی از هوشمندسازی را پوشش می‌دهد که در بسیاری از مدل‌های بلوغ کمتر موردتوجه قرار گرفته است. این شاخص بر اهمیت مشتری‌محوری در تحولات دیجیتال تأکید دارد که با یافته‌های بهلولی و همکاران (۱۴۰۱) در مورد بلوغ مدیریت دانایی مشتری در صنعت ریلی همخوانی دارد.

ادغام مسائل زیست‌محیطی و پایداری در الگوی مفهومی بلوغ، نشان‌دهنده درک جامع از نیازهای معاصر صنعت ریلی است. این رویکرد با تحقیقات گندی و همکاران (۲۰۲۲) در مورد حمل‌ونقل ریلی پایدار همسو است که بر ضرورت یکپارچه‌سازی معیارهای زیست‌محیطی در ارزیابی عملکرد تأکید کردند. سان و همکاران[1] (۲۰۲۲) در بررسی کاربردهای فناوری‌های صنعت ۴,۰ در لجستیک پایدار، نشان دادند که این فناوری‌ها پتانسیل قابل‌توجهی برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی دارند. شاخص‌های شناسایی‌شده در بعد پایداری الگوی مفهومی حاضر، این پتانسیل‌ها را به‌صورت عملی و قابل‌اندازه‌گیری ارائه می‌دهند. تأکید بر انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش مصرف انرژی در این بعد، با یافته‌های کلجایک و همکاران[2] (۲۰۲۳) در مورد چالش‌ها و فناوری‌های نوظهور برای افزایش کارایی انرژی، ایمنی و پایداری حمل‌ونقل ریلی انطباق دارد. این تأکید نشان‌دهنده اهمیت روزافزون مسائل انرژی در صنعت ریلی است.

الگوی مفهومی ارائه‌شده در این پژوهش، چندین نوآوری مهم نسبت به الگوها و مدل‌های موجود دارد. نخست، جامعیت رویکرد که تمامی ابعاد مهم تحول دیجیتال را در بر می‌گیرد، آن را از مطالعاتی که بر جنبه‌های خاصی تمرکز دارند متمایز می‌سازد. دوم، تعادل بین جنبه‌های فنی و غیرفنی که نشان‌دهنده درک عمیق از پیچیدگی‌های واقعی

1. Sun et al.
2. Kljaić et al.

پیاده‌سازی است. سوم، تأکید ویژه بر چالش‌ها و موانع که در بسیاری از مدل‌های بلوغ کمتر موردتوجه قرار می‌گیرد، اما در عمل یکی از مهم‌ترین عوامل موفقیت محسوب می‌شود. چهارم، ادغام مسائل امنیت سایبری به‌عنوان یک بعد مستقل که اهمیت ویژه این موضوع در محیط‌های حیاتی را نشان می‌دهد. پنجم، توجه به مسائل پایداری و محیط‌زیست که نشان‌دهنده درک از نیازهای معاصر و آینده صنعت است. این نوآوری‌ها درمجموع، الگویی جامع و عملی ارائه می‌دهند که قابلیت کاربرد در شرایط مختلف را دارد.

علی‌رغم مزایای الگوی مفهومی پیشنهادی، پیاده‌سازی آن با چالش‌هایی مواجه است که باید موردتوجه قرار گیرد. پیچیدگی الگوی مفهومی که شامل ۲۱ شاخص و ۸۴ کد عملیاتی است، ممکن است برای برخی سازمان‌ها دشوار باشد. همچنین، نیاز به تخصص‌های متنوع برای ارزیابی تمامی ابعاد، چالش دیگری محسوب می‌شود. تفاوت‌های فرهنگی و زیرساختی بین کشورها ممکن است نیازمند تطبیق شاخص‌ها و کدها باشد. همچنین، تغییرات سریع فناوری‌ها نیاز به به‌روزرسانی مداوم الگوی مفهومی را ایجاب می‌کند. این محدودیت‌ها بر اهمیت انعطاف‌پذیری و قابلیت تطبیق الگو تأکید می‌کنند.

## نتیجه‌گیری

این پژوهش باهدف شناسایی و ارائه الگوی جامع ارزیابی بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی در عصر انقلاب صنعتی چهارم انجام شد. استفاده از روش فراترکیب هفت مرحله‌ای سندلوسکی و باروسو و بررسی نظام‌مند ۸۷ مقاله علمی، امکان دستیابی به الگویی جامع و مبتنی بر شواهد را فراهم آورد.

الگوی مفهومی ارائه‌شده در این پژوهش، یک چارچوب نظری-کیفی است که ابعاد، شاخص‌ها و کدهای عملیاتی مؤثر بر بلوغ دیجیتال صنعت ریلی را شناسایی و سازمان‌دهی می‌کند. برخلاف مدل‌های کمی که دارای سطوح بلوغ مشخص، آستانه‌های عددی و الگوریتم‌های محاسباتی هستند، این الگو بیشتر به‌عنوان نقشه راه مفهومی عمل می‌کند که می‌تواند پایه و اساس توسعه ابزارهای ارزیابی کمی در مطالعات آتی باشد. این

رویکرد با ماهیت روش فراترکیب که تولید بینش‌های تفسیری و یکپارچه‌سازی مفاهیم است، همسو می‌باشد.

الگوی مفهومی نهایی شامل پنج بعد اصلی است که عبارت‌اند از فناوری‌های صنعت ۴,۰ در حمل‌ونقل ریلی، چالش‌ها و موانع هوشمندسازی، امنیت سایبری و ریسک‌های دیجیتالی، کاربردهای عملی و بهبود عملکرد و پایداری و محیط‌زیست. هر یک از این ابعاد شامل شاخص‌ها و کدهای عملیاتی متعددی هستند که درمجموع چارچوب جامعی برای ارزیابی وضعیت فعلی و تعیین مسیر بهبود ارائه می‌دهند.

جامعیت علمی، کاربردی‌بودن، انعطاف‌پذیری، جامعیت موضوعی و مبتنی بر شواهد بودن، از ویژگی‌های برجسته این الگوی مفهومی محسوب می‌شوند که آن را برای استفاده عملی توسط سازمان‌های مختلف مناسب می‌سازد. اعتبارسنجی نتایج نیز از طریق روش‌های متعدد انجام شد که نشان‌دهنده کیفیت مناسب و قابلیت اتکای الگو است.

این الگوی مفهومی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی وضعیت موجود، شناسایی نقاط قوت و ضعف و تدوین راهکارهای بهبود در مسیر هوشمندسازی صنعت حمل‌ونقل ریلی مورداستفاده قرار گیرد. همچنین، می‌تواند در تدوین استراتژی‌های توسعه، تخصیص منابع و اولویت‌بندی پروژه‌ها نقش مؤثری ایفا کند.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهایی برای محققان، مدیران و سیاست‌گذاران ارائه می‌شود. برای محققان، توسعه ابزارهای اندازه‌گیری کمی برای هر یک از شاخص‌های الگوی مفهومی، انجام مطالعات موردی برای آزمون عملی الگو در سازمان‌های مختلف، بررسی تطبیق‌پذیری الگوی مفهومی با شرایط فرهنگی و اقتصادی متفاوت و توسعه چارچوب‌های پیاده‌سازی مرحله‌ای برای هر یک از ابعاد الگو پیشنهاد می‌شود. همچنین، تحقیق در مورد روش‌های یکپارچه‌سازی این الگوی مفهومی با استانداردهای بین‌المللی موجود، مطالعه بر روی تأثیر عوامل فرهنگی و سازمانی بر موفقیت پیاده‌سازی الگو و توسعه مدل‌های پیش‌بینی برای تعیین مسیر بهینه ارتقای بلوغ نیز ازجمله مسیرهای تحقیقاتی آتی محسوب می‌شوند.

برای مدیران سازمان‌های ریلی، استفاده از این الگوی مفهومی برای ارزیابی وضعیت فعلی سازمان و شناسایی نقاط قوت و ضعف، تدوین برنامه‌های بلندمدت بر اساس اولویت‌بندی ابعاد و شاخص‌های مختلف، سرمایه‌گذاری در توسعه مهارت‌های دیجیتال نیروی انسانی و ایجاد تیم‌های میان‌رشته‌ای برای پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴,۰ پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این، توجه ویژه به مسائل امنیت سایبری در تمامی مراحل هوشمندسازی، ایجاد شراکت‌های استراتژیک با شرکت‌های فناوری برای دسترسی به دانش و تجربه روز و تدوین برنامه‌های مدیریت تغییر برای کاهش مقاومت‌های سازمانی نیز ازجمله پیشنهادهای عملی برای مدیران است.

برای سیاست‌گذاران و تنظیم‌گران، تدوین استانداردهای ملی برای هوشمندسازی صنعت ریلی بر اساس ابعاد و شاخص‌های شناسایی‌شده، ایجاد مکانیزم‌های حمایتی برای تسهیل سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، توسعه چارچوب‌های قانونی مناسب برای حفاظت از امنیت سایبری زیرساخت‌های حیاتی و تدوین برنامه‌های آموزشی ملی برای توسعه مهارت‌های موردنیاز پیشنهاد می‌شود. همچنین، ایجاد شبکه‌های همکاری بین‌المللی برای تبادل تجربیات و بهترین شیوه‌ها، تدوین سیاست‌های تشویقی برای سازمان‌هایی که در مسیر هوشمندسازی پیشرو هستند و ایجاد مراکز تحقیق و توسعه تخصصی در حوزه فناوری‌های ریلی نیز ازجمله پیشنهادهای سیاستی مهم محسوب می‌شوند.

الگوی مفهومی ارائه‌شده در این پژوهش، ابعاد، شاخص‌ها و کدهای عملیاتی ارزیابی بلوغ صنعت ریلی را شناسایی کرد، اما به دلیل محدودیت‌های ذاتی روش فراترکیب، سطوح بلوغ مشخص مانند اولیه، درحال‌توسعه، بالغ و بهینه‌شده تعریف نشد. همچنین، شاخص‌های کمی دقیق، آستانه‌های عملکرد و معیارهای بنچ‌مارک برای هر سطح بلوغ نیازمند مطالعات تکمیلی مبتنی بر روش‌هایی چون دلفی فازی یا مدل‌سازی ساختاری تفسیری بود. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آتی، سطوح بلوغ پنج‌گانه برای هر شاخص با مشارکت خبرگان صنعت تعریف شود و وزن‌دهی شاخص‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند ANP یا DEMATEL انجام گیرد. علاوه بر

این، الگوی مفهومی در سازمان‌های واقعی پیاده‌سازی و اعتبارسنجی شود و ابزار نرم‌افزاری خودارزیابی بلوغ برای تسهیل ارزیابی سازمان‌ها توسعه یابد.

درنهایت، موفقیت در پیاده‌سازی این الگوی مفهومی مستلزم همکاری و هماهنگی بین تمامی ذی‌نفعان ازجمله مدیران، کارشناسان فنی، نیروی انسانی، تأمین‌کنندگان فناوری و نهادهای نظارتی است. تنها از طریق رویکردی یکپارچه و مشارکتی می‌توان از پتانسیل کامل این الگو در ارتقای بلوغ صنعت حمل‌ونقل ریلی بهره‌برداری کرد و به اهداف تعیین‌شده در عصر انقلاب صنعتی چهارم دست یافت.

## سپاسگزاری

این پژوهش فارغ از حمایت مادی و معنوی نهادها انجام شده است.

## تعارض منافع

این پژوهش فاقد تعارض منافع است.

**ORCID**
Samaneh Moradi **https://orcid.org/0009-0006-9062-5419**
Mehrdad Hosseini Shakib **http://orcid.org/0000-0003-1243-2559**
Ali Badizadeh **http://orcid.org/0000-0003-3141-5391**

## منابع


۱. بهلولی، نادر، اسماعیلی، محمود، رمضانی، مجتبی و سنگی‌نورپور، عباسقلی. (۱۴۰۱). تدوین و طراحی الگویی برای سنجش بلوغ مدیریت دانایی مشتری در صنعت حمل‌ونقل ریلی (شرکت راه آهن ج.ا.ا). *مطالعات مدیریت راهبردی دفاع ملی*، *۶*(۲۲)، ۱۹۷-۲۳۲. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.74672588.1401.6.22.7.6

۲. زمانی، آرزو، خمسه، عباس و ایرانبان‌فرد، سیدجواد. (۱۴۰۲). انتقال تکنولوژی در عصر صنعت ۵,۰: مدل یکپارچه هوش مصنوعی و مؤلفه‌های انسانی. *مدیریت نوآوری*، *۱۲*(۴)، ۱۱۱-۱۴۰. doi: 10.22034/imj.2024.450323.2803

۳. طراز منفرد، نورالدین، شایان، علی و رجب‌زاده قطری، علی. (۱۴۰۲). بررسی اثر پیاده‌سازی اینترنت اشیاء بر صنعت حمل‌ونقل ریلی بار با رویکرد آینده‌پژوهی. *فصلنامه فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران*، *۱۵*(۵۵)، ۱-۱۰. https://doi.org/20.1001.1.27170411.1402.15.55.10.1


## References


4. Abbasnejad, B., Soltani, S., Karamoozian, A., & Gu, N. (2024). A systematic literature review on the integration of Industry 4.0 technologies in sustainability improvement of transportation construction projects: state-of-the-art and future directions. *Smart and Sustainable Built Environment*. https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2023-0335
5. Ale, F., Daniyan, I., Aderoba, O., & Adediran, A. A. (2024, April). An Artificial Intelligence-based Integrated Framework for Lean and Smart Manufacturing: A Case Study of the Rail Industry. In *2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)* (pp. 1-10). IEEE. https://doi.org/10.1109/SEB4SDG60871.2024.10629752
6. Awodele, I. A., Mewomo, M. C., Municio, A. M. G., Chan, A. P., Darko, A., Taiwo, R., ... & Awodele, O. A. (2024). Awareness, adoption readiness and challenges of railway 4.0 technologies in a developing economy. *Heliyon*, *10*(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25934
7. Bianchi, G., Fanelli, C., Freddi, F., Giuliani, F., & La Placa, A. (2025). Systematic review railway infrastructure monitoring: From classic techniques to predictive maintenance. *Advances in Mechanical Engineering*, *17*(1), 16878132241285631. https://doi.org/10.1177/16878132241285631

8. Bortolini, M., Calabrese, F., Galizia, F. G., Mora, C., & Ventura, V. (2022). Industry 4.0 technologies: a cross-sector industry-based analysis. In *Sustainable Design and Manufacturing: Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing (KES-SDM 2021)* (pp. 140-148). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6128-0_14
9. Brezavšček, A., & Baggia, A. (2025). Recent Trends in Information and Cyber Security Maturity Assessment: A Systematic Literature Review. *Systems*, *13*(1), 52. https://doi.org/10.3390/systems13010052
10. Bustos, A., Rubio, H., Soriano-Heras, E., & Castejon, C. (2021). Methodology for the integration of a high-speed train in maintenance 4.0. *Journal of Computational Design and Engineering*, *8*(6), 1605-1621. https://doi.org/10.1093/jcde/qwab064
11. Carranza, G., Amorrortu, O., & de la Rua, O. (2023). Analysis of the Challenges Faced by the Rail Sector: Understanding the Rail Industry of the Future through the Incorporation of Technology and Digitisation. *Open Journal of Business and Management*, *11*(4), 1558-1576. https://doi.org/10.4236/ojbm.2023.114086
12. Chowdhury, S.; Alzarrad, A. (2023). Applications of Text Mining in the Transportation Infrastructure Sector: A Review. *Information*, *14*, 201. https://doi.org/10.3390/info14040201
13. Dietlmeier, S. F., Floetgen, R. J., Bock, J., & Urmetzer, F. (2022, December). IoT for Rail Transportation: The Case of Railigent. In *2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)* (pp. 3806-3813). IEEE. https://doi.org/10.1109/BigData55660.2022.10020620.
14. Dong, K., Romanov, I., McLellan, C., & Esen, A. (2022). Recent text-based research and applications in railways: A critical review and future trends. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *116*(2022), 105435.
15. Duan, L., & Liu, J. (2024). Smart composite materials and IoT: Revolutionizing real-time railway health monitoring. *MRS Communications*, 1-17. https://doi.org/10.1557/s43579-024-00667-9
16. Errandonea, I., Goya, J., Alvarado, U., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2021, November). IoT approach for intelligent data acquisition for enabling digital twins in the railway sector. In *2021 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC)* (pp. 164-168). IEEE. https://doi.org/10.1109/ISCSIC54682.2021.00039
17. Franz, M. L. C. (2023). *Industry 4.0 in the context of passenger railway companies*. http://hdl.handle.net/10183/263262

18.Gandhi, N., Kant, R., & Thakkar, J. (2022). A systematic scientometric review of sustainable rail freight transportation. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(47), 70746-70771. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22811-5

19.Gao, X., Zhang, Y., & Peng, J. (2022). NDE 4.0 in railway industry. In *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0* (pp. 951-977). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73206-6_13

20.Gerhátová, Z., Zitrický, V., & Klapita, V. (2021). Industry 4.0 implementation options in railway transport. *Transportation Research Procedia*, *53*, 23-30. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.003

21.Harrod, S. S. (2025). Railway Signal Digitalization with the European Rail Traffic Management System and Positive Train Control: Industry 4.0 Expectations and Reality. *Transportation Research Record*, 03611981241265841. https://doi.org/10.1177/03611981241265841

22.Hatta, I. W., Samudra, A. A., & Satispi, E. (2024). Challenges and opportunities for improving management and regulation of the rail transport sector in Indonesia: Perspective from the industry 4.0 concept. *Journal of Law and Sustainable Development*, *12*(2), e3037-e3037. https://doi.org/10.55908/sdgs.v12i2.3037

23.Holubčík, M., Koman, G., & Soviar, J. (2021). Industry 4.0 in logistics operations. *Transportation Research Procedia*, *53*, 282-288. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.040

24.Jabłoński, M. (2022). Emerging Modern Trends and Technologies Increasing the Level of Rail Transport Safety. *Digital Safety in Railway Transport—Aspects of Management and Technology*, 77-97. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96133-6_8

25.Kljaić, Z., Pavković, D., Cipek, M., Trstenjak, M., Mlinarić, T. J., & Nikšić, M. (2023). An Overview of Current Challenges and Emerging Technologies to Facilitate Increased Energy Efficiency, Safety, and Sustainability of Railway Transport. *Future Internet*, *15*(11), 347. https://doi.org/10.3390/fi15110347

26.Koul, P. (2025). Green manufacturing in the age of smart technology: A comprehensive review of sustainable practices and digital innovations. *Journal of Materials and Manufacturing*, *4*(1), 1-20. https://doi.org/10.5281/zenodo.14586656

27.Laiton-Bonadiez, C., Branch-Bedoya, J. W., Zapata-Cortes, J., Paipa-Sanabria, E., & Arango-Serna, M. (2022). Industry 4.0 Technologies Applied to the Rail Transportation Industry: A Systematic Review. Sensors, 22(7), 2491. https://doi.org/10.3390/s22072491

28.López-Aguilar, P., Batista, E., Martínez-Ballesté, A., & Solanas, A. (2022). Information security and privacy in railway transportation: A

systematic review. Sensors, 22(20), 7698. https://doi.org/10.3390/s22207698

29. Meng, Q., Lu, P., & Zhu, S. (2023). A smartphone-enabled IoT system for vibration and noise monitoring of rail transit. *IEEE Internet of Things Journal*, *10*(10), 8907-8917. https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3233051
30. Möller, D., Iffländer, L., Nord, M., Krause, P., Leppla, B., Mühl, K., & Czerkewski, P. (2022). Emerging Technologies in the Era of Digital Transformation: State of the Art in the Railway Sector. In *ICINCO* (pp. 721-728). https://doi.org/10.5220/0011141900003271
31. Montero, J. (2020). The digitalization dilemma in the railway industry. In *Handbook on Railway Regulation* (pp. 379-396). Edward Elgar Publishing. https://doi.org/10.4337/9781789901788.00028
32. Ogunmodede, O., & Zincume, P. N. (2024, June). Railway Skill Development for the Fourth Industrial Revolution: A Systematic Review of Developing Countries. In *2024 IEEE International Conference on Engineering, Technology, and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-7). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC61926.2024.10794310
33. Sandelowski, M., & Barroso, J. (2007). *Handbook for Synthesizing Qualitative Research*. New York: Springer Publishing Company. https://doi.org/10.4236/crcm.2022.118046
34. Singh, P., Elmi, Z., Meriga, V. K., Pasha, J., & Dulebenets, M. A. (2022). Internet of Things for sustainable railway transportation: Past, present, and future. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, *4*, 100065. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100065
35. Sun, X., Yu, H., Solvang, W.D. *et al*. The application of Industry 4.0 technologies in sustainable logistics: a systematic literature review (2012–2020) to explore future research opportunities. *Environ Sci Pollut Res 29*, 9560–9591 (2022). https://doi.org/10.1007/s11356-021-17693-y
36. Tshabalala, S., & Mpofu, K. (2023, March). Opportunities presented by industrial 4.0 revolution to revitalize the railway sector: a review. In *Smart, Sustainable Manufacturing in an Ever-Changing World: Proceedings of International Conference on Competitive Manufacturing (COMA'22)* (pp. 243-250). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15602-1_19
37. Voronko, I. (2024). The security of IoT systems in railway transport. *Transport systems and technologies*, (43), 90-99. https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-7

38. Zhong, G., Xiong, K., Zhong, Z., & Ai, B. (2021). Internet of things for high-speed railways. *Intelligent and Converged Networks*, *2*(2), 115-132. https://doi.org/10.23919/ICN.2021.0005
39. Zunder, T. H., Katschnig, C., Chen, M., & Martino, A. (2023). Recommendations for a transition to 'Railway 4.0 for Europe'. *Transportation Research Procedia*, *72*, 852-859. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.477

**References [In Persian]**

1. Bohlooli, N., Esmaeili, M., Ramazani, M., & Sangi noor pour, A. (2022). Designing a model to measure the maturity of customer knowledge management in the rail transportation industry (I.I. R. Railway Company). *Interdisciplinary Studies on Strategic Knowledge*, *6*(22), 197-232. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.74672588.1401.6.22.7.6
2. Taraz Monfared, N., Shayan, A., & Rajabzadeh ghotri, A. (2022). The effect of Internet of Things (IOT) implementation on the Rail Freight Industry; A futures study approach. *Journal of Information and Communication Technology*, *55*(15), 191-207. https://dorl.net/dor/20.1001.1.27170411.1402.15.55.10.1
3. Zamany, A., Khamseh, A., & Iranbanfard, S. (2023). Technology Transfer in the Industry 5.0 Era: An Integrated Model of Artificial Intelligence and Human Factors. *Innovation Management Journal*, *12*(4), 111-140. doi: 10.22034/imj.2024.450323.2803

**استناد به این مقاله:** مرادی، سمانه.، حسینی شکیب، مهرداد.، بدیع زاده، علی. (۱۴۰۵). طراحی الگوی مفهومی ارزیابی بلوغ صنعت ریلی در عصر انقلاب صنعتی چهارم: یک مطالعه فراترکیب، *مطالعات مدیریت کسب وکار هوشمند*، ۱۵(۵۵)، ۲۶۱-۳۰۵. DOI: 10.22054/ims.2025.86393.2633

Journal of Business Intelligence Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License..