

Meta-synthesis of Maintenance 4.0 Criteria in the Aviation Industry

Mohammad

Yazdizade Alborz



Department of Management, Faculty of Economic and Administrative Sciences, University of Qom, Qom, Iran

Karim Ebrahimi



*

Department of Management, Faculty of Economic and Administrative Sciences, University of Qom, Qom, Iran

Mohammad Hassan

Maleki



Department of Management, Faculty of Economic and Administrative Sciences, University of Qom, Qom, Iran

Abstract

This study identifies the criteria for Maintenance 4.0 in the aviation industry through a seven-stage meta-synthesis and qualitative content analysis of 94 Scopus-indexed studies published between 2020 and 2027. The coding process produced 455 open codes, 24 axial codes, and six selective categories: intelligent computational and analytical core; cyber-physical digital infrastructure; proactive maintenance and health-management strategy; intelligent maintenance operations, logistics, and automation; human-AI collaboration and workforce empowerment; and safety, trust, and regulatory governance. The findings offer an integrated roadmap for moving from traditional maintenance to Maintenance 4.0, with particular relevance to Iran's aging fleet, sanctions-related constraints, and the need to improve reliability, safety, and productivity.

Introduction

Aviation is a strategic driver of global economic development and technological progress (Korchagin et al., 2022). In Iran, aviation is recognized as a key infrastructure sector, yet the active fleet is severely

* Corresponding Author: k.ebrahimi@qom.ac.ir

How to Cite: xxxxxxx

aging: the average fleet age is estimated at 28 years, and fewer than 200 of about 330 registered passenger aircraft are operational (ISNA, 1402; Mehr, 1404). The accident rate has been reported as 13.42 compared with a global average of 3.02 (Civil Aviation Organization, 1399). Sanctions have restricted access to new aircraft, original equipment manufacturer (OEM) parts, and updated technical knowledge (Civil Aviation Organization, 1404a). Consequently, maintenance, repair, and overhaul (MRO) has shifted from a support function to a strategic competitive and survival factor (Lotfi Jalal Abadi & Hosseini, 2022). The study asks: What is the state of research on Maintenance 4.0 in aviation, and what are its criteria?

Literature Review

Maintenance has evolved from corrective and preventive strategies to condition-based maintenance (CBM) and reliability-centered maintenance (RCM) (Fayazi & Tohidi, 1403; Aghaei et al., 1394). Industry 4.0 introduced cyber-physical systems, IoT, big data, cloud computing, AI, and machine learning, enabling predictive and prescriptive maintenance (Zonta et al., 2020; Bousdekis et al., 2020). In aviation, Maintenance 4.0 integrates digital technologies with MRO processes, including augmented reality, additive manufacturing, digital twins, and AI-driven prognostics (Ceruti et al., 2019; Moenck et al., 2024; Dagal, 2026). Related studies have examined lean Maintenance 4.0 (Korchagin et al., 2022), disruption resilience (Tsakalerou et al., 2022), federated learning for data sharing (Kabashkin & Susanin, 2024), and text mining for hazard identification (Hou et al., 2026). Iranian studies have focused on classical maintenance strategies, success factors, and quantitative models (A'laii et al., 1398; Sharafat et al., 1397; Mehri & Maleki, 1404; Moradi et al., 1404). The gap is the lack of an integrated, aviation-specific framework for Maintenance 4.0.

Methodology

A seven-stage meta-synthesis was applied (Sandelowski & Barroso, as cited in Mirchi et al., 2024), combined with qualitative content analysis (Mende, 2022; Rostami & Karlsson, 2024). Scopus was searched using two keyword sets. The initial search returned 2,238 records; title, abstract, and keyword screening reduced this to 117; after applying SJR

Q1/Q2 journal criteria, English-language, research/review article, and relevance filters, 94 studies remained. Data were coded in Excel through open, axial, and selective coding, yielding 455 open codes, 24 axial codes, and six selective categories. Validity was supported through recursive analysis, theoretical pluralism, expert review, and transparent search documentation (Khoeini et al., 2024).

Results

The six selective criteria were: (1) intelligent computational and analytical core (75 references; 8 axial codes), including AI/ML/DL, reinforcement learning, generative AI, optimization, big-data analytics, and semantic knowledge technologies; (2) cyber-physical digital infrastructure (50 references; 4 axial codes), including sensors, condition monitoring, IoT, cloud/edge computing, and digital twins; (3) proactive maintenance and health-management strategy (61 references; 5 axial codes), including predictive maintenance, CBM/PHM, RUL estimation, and reliability/risk modeling; (4) intelligent maintenance operations, logistics, and automation (23 references; 3 axial codes), including dynamic scheduling, fleet routing, spare-parts logistics, and self-optimizing automation; (5) human–AI collaboration and workforce empowerment (29 references; 3 axial codes), including decision-support systems, AR/VR/metaverse training, and digital competencies; and (6) safety, trust, and regulatory governance (6 references; 1 axial code), including airworthiness assurance, risk management, regulatory compliance, transparency, and auditability.

Discussion

The findings show that Maintenance 4.0 is not merely digitalization or the isolated use of AI; it is a multilayered architecture linking data, analytics, infrastructure, operations, people, and governance. The intelligent computational core acts as the “algorithmic brain,” converting raw data into prediction, optimization, and decision advice (Zonta et al., 2020; Bousdekis et al., 2020). Cyber-physical infrastructure enables real-time data collection and digital representation of physical assets (Ceruti et al., 2019; Moenck et al., 2024). Proactive maintenance and health management connect analytics to maintenance decisions through CBM, prognostics, and

RUL estimation (Korchagin et al., 2022). Operations and logistics transform analytical outputs into scheduling, resource allocation, and spare-parts flows. Human–AI collaboration repositions technicians as cognitive partners rather than passive operators. Safety, trust, and regulatory governance are not external constraints but an internal layer of the architecture, especially in aviation. This integrated view extends prior technology-focused studies by treating Maintenance 4.0 as a system-level transformation.

Conclusion

Maintenance 4.0 in aviation is a multidimensional and interconnected phenomenon. Successful transition requires simultaneous development of analytical capabilities, cyber-physical infrastructure, predictive and health-management strategies, intelligent operations and logistics, workforce digital competencies, and regulatory governance. The proposed framework provides a basis for assessing maturity and planning digital transformation in aviation MRO. Limitations include reliance on published literature and the need for caution in generalizing to Iran's specific institutional, economic, and technological conditions. Future research should validate the framework through Delphi studies, surveys, case studies, and structural equation modeling in aviation organizations.

Keywords: Aviation industry; Maintenance 4.0; Industry 4.0; Meta-synthesis; Qualitative content analysis.

فرا ترکیب معیارهای نگهداری و تعمیرات 4.0 در صنعت هوانوردی

محمد یزدی زاده البرز  گروه مدیریت، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه قم، قم، ایران

کریم ابراهیمی  * گروه مدیریت، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه قم، قم، ایران

محمد حسن ملکی  گروه مدیریت، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه قم، قم، ایران

چکیده

اهمیت راهبردی صنعت هوانوردی به عنوان یکی از موتورهای محرکه اقتصاد جهانی و پیشران توسعه فناوری، سرمایه گذاری در آن را به یکی از معیارهای توسعه یافتگی کشورها بدل کرده است. ارتقای اقتصادی کشور از مسیر این صنعت، در گرو عملکرد بهینه، ایمنی و قابلیت اطمینان ناوگان هوایی است که متکی بر فرایندهای نگهداری و تعمیرات (نت) است. هدف پژوهش حاضر، شناسایی معیارهایی است که با ایجاد تحول در نت صنعت هوانوردی و تمسک به نت 4.0 - بنا بر اقتضات انقلاب صنعتی چهارم - هم بتواند کیفیت این صنعت را بسنجد و هم در بهبود آن نقش آفرینی کند. با توجه به غنای ادبیات این حوزه، در گام نخست با روش فرا ترکیب طی هفت مرحله، ادبیات مرتبط در مجلات معتبر نمایه شده در اسکوپوس بررسی و به 94 سند علمی نهایی دست یافته شد. سپس با تحلیل محتوای کیفی و کدگذاری سه مرحله ای، یافته ها در قالب 455 کدباز، 24 کد محوری و شش کد گزینشی در نرم افزار اکسل سازمان دهی شدند. کدهای گزینشی عبارتند از: (1) هسته هوشمند محاسباتی و تحلیلی، (2) زیرساخت دیجیتال سایبر فیزیکی، (3) راهبرد کنش گرای نت و مدیریت سلامت، (4) عملیات، لجستیک و اتوماسیون هوشمند نت، (5) همکاری انسان - هوش مصنوعی و توانمندسازی نیروی انسانی، و (6) ایمنی، اعتماد و حکمرانی مقرراتی؛ که هر یک به تناسب فراوانی اشاره در ادبیات، اهمیتی ویژه دارد. این معیارها نقشه راهی برای گذار صنعت هوانوردی از نت سنتی به نت 4.0 فراهم می آورند و می توانند در اختیار سیاست گذاران و مجریان این حوزه قرار گیرند تا بهره وری صنعت هوانوردی کشور را افزایش داده و رشد اقتصادی را جهشی اساسی بخشند.

کلیدواژه ها: صنعت هوانوردی، نگهداری و تعمیرات 4.0، صنعت 4.0، فرا ترکیب، تحلیل محتوای کیفی.

مقدمه

صنعت هوانوردی به عنوان یکی از ستون‌های اصلی اقتصاد جهانی و پیشران توسعه فناوری، نقشی بی‌بدیل در اتصال جوامع، تسهیل تجارت بین‌الملل و پیشبرد نوآوری ایفا می‌کند. این صنعت با ماهیت پیچیده و پویای خود، به طور مستقیم بر رشد اقتصادی کشورها تأثیرگذار است و به عنوان یک زیرساخت حیاتی، زمینه‌ساز توسعه سایر بخش‌ها مانند گردشگری، بازرگانی و خدمات لجستیک محسوب می‌شود (Korchagin et al., 2022). اهمیت راهبردی این صنعت در سطح جهانی به حدی است که سرمایه‌گذاری در آن، معیاری از پیشرفت فناورانه و توان رقابتی کشورها به شمار می‌آید.

در ایران نیز این صنعت از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و به عنوان یکی از محورهای کلیدی توسعه پایدار و زیرساختی کشور شناخته می‌شود. اسناد و سیاست‌های کلان ملی، بر نقش محوری حمل‌ونقل هوایی در تحقق اهداف اقتصادی، ایجاد اشتغال و افزایش تولید ناخالص داخلی تأکید دارند (سازمان هواپیمایی کشوری، ۱۴۰۴؛ اب، ۱۴۰۴). در همین راستا، ارزیابی و بهبود مستمر عملکرد شرکت‌های هواپیمایی داخلی به منظور افزایش بهره‌وری و توان رقابتی در محیط پویای این صنعت، یک ضرورت انکارناپذیر تلقی می‌گردد (Mohaghar et al., 2025).

با ظهور انقلاب صنعتی چهارم^۱، پارادایم‌های سنتی در صنایع مختلف دستخوش تحولات بنیادین شده‌اند. در این میان، حوزه نگهداری و تعمیرات نیز از این قاعده مستثنی نبوده و با جذب فناوری‌های نوین، به سمت الگوی جدیدی تحت عنوان نگهداری و تعمیرات 4.0^۲ یا نت هوشمند حرکت کرده است. این پارادایم نوین بر پایه ادغام سیستم‌های سایبری - فیزیکی^۳، اینترنت اشیا^۴، تحلیل داده‌های بزرگ^۵، هوش مصنوعی^۶ و یادگیری ماشین^۷ استوار است (Zonta et al., 2020). هدف اصلی در این رویکرد، فراتر رفتن از استراتژی‌های

1 Industry 4.0

2 Maintenance 4.0

3 Cyber-Physical Systems (CPS)

4 Internet of Things (IoT)

5 Big Data Analytics

6 Artificial Intelligence (AI)

7 Machine Learning (ML)

سنی نت واکنشی و پیشگیرانه¹ و دستیابی به سطح بالاتری از بلوغ، یعنی نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه² است (Bousdekis et al., 2020).

در تضاد با روند روبه‌رشد و نوسازی مستمر در صنعت هوانوردی جهانی، بررسی‌های آماری نشان‌دهنده یک شکاف عمیق کمی و کیفی در وضعیت ناوگان هوایی ایران است. در حالی که شرکت‌های هواپیمایی پیشرو در جهان به طور مداوم با خرید هواپیماهای جدید، میانگین سن ناوگان خود را کاهش می‌دهند تا بهره‌وری سوخت و ایمنی را افزایش دهند، میانگین سن ناوگان فعال ایران بالغ بر ۲۸ سال تخمین زده می‌شود³ که این رقم نشان‌دهنده فرسودگی قابل توجه و هزینه‌های عملیاتی بالاتر است. گزارش‌های رسمی حاکی از آن است که از مجموع حدود ۳۳۰ فروند هواپیمای مسافری ثبت‌شده، کمتر از ۲۰۰ فروند آن فعال و عملیاتی هستند (خبرگزاری دانشجویان ایران (ایسنا)، ۱۴۰۲؛ مهر، ۱۴۰۴). همچنین این آمار نه تنها فاصله ایران را با استانداردهای جهانی نشان می‌دهد، بلکه بیانگر عدم تحقق اهداف توسعه‌ای گذشته کشور نیز هست. به عنوان نمونه، در حالی که برای دستیابی به سطح قابل قبولی از توسعه تا افق ۱۴۰۴، نیاز کشور به حدود ۵۶۱ فروند هواپیمای مسافری در بخش هوانوردی عمومی پیش‌بینی شده بود (آستانه، ۱۳۹۱). علاوه بر این، بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از سامانه مرکزی رویدادهای ایمنی در خصوص تعداد حوادث جرحی و غیر جرحی کشور، طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ میلادی، همچنین نرخ محاسبه شده بر اساس میلیون پرواز انجام شده، نرخ سوانح کشور نسبت به میانگین جهانی بالاتر بوده و این موضوع نگران‌کننده است. در حال حاضر نرخ سوانح هوایی کشور ۱۳.۴۲ و میانگین نرخ سوانح جهان ۳.۰۲ اعلام شده است (سازمان هواپیمایی کشوری، ۱۳۹۹).

از سوی دیگر، تعداد کل پروازهای انجام شده شرکت‌های هواپیمایی کشور در سال ۲۰۱۹ میلادی ۲۱۷،۸۳۹ و در سال ۲۰۲۰ میلادی ۱۶۲،۵۲۸ است؛ رویدادهای به ثبت رسیده مرتبط با خطاهای سیستم‌های ناوبری هواپیما و خرابی قطعات مرتبط با سیستم GPS در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ به ترتیب ۶۹ و ۷۹ و ۸۵ رویداد است که نشان‌دهنده روند صعودی خرابی‌های هواپیما است (سازمان هواپیمایی کشوری، ۱۳۹۹). از دسامبر

1 Reactive and Preventive

2 Predictive Maintenance (PdM)

³ متوسط سن یک هواپیمای مسافری بین ۲۵ تا ۳۰ سال است (EASA, 2023).

2023 تا دسامبر 2025 تعداد 48 حادثه در گزارش سازمان هواپیمایی کشوری ذکر شده است.¹

در چنین شرایطی که با فرسودگی ناوگان، کمبود کمی هواپیما و شکاف عمیق با استانداردهای جهانی مشخص می‌شود، نقش و اهمیت استراتژیک واحدهای نگهداری و تعمیرات از یک واحد پشتیبانی به یک مزیت رقابتی و عامل بقا در صنعت هوانوردی ایران تغییر ماهیت می‌دهد. تحریم‌های بین‌المللی، با ایجاد محدودیت‌های شدید در دسترسی به هواپیماهای جدید، قطعات یدکی اصلی² و دانش فنی روزآمد، شرکت‌های هواپیمایی داخلی را با چالش‌های مضاعفی روبرو ساخته است. این فشار خارجی، ضمن افزایش هزینه‌ها و پیچیدگی‌های عملیاتی، اهمیت خودکفایی و توانمندسازی داخلی در حوزه تعمیر و نگهداری را به یک ضرورت ملی تبدیل کرده است (سازمان هواپیمایی کشوری، 1404الف). بنابراین، در اقتصادی که حمل‌ونقل هوایی به‌عنوان یکی از پیشران‌های اصلی توسعه شناخته می‌شود (سازمان هواپیمایی کشوری، 1401ج)، بهینه‌سازی فرآیندهای نت دیگر یک انتخاب نیست، بلکه تنها راهکار موجود برای تضمین ایمنی پروازها، افزایش ضریب دسترسی و قابلیت اطمینان ناوگان موجود و نهایتاً، حفظ حیات اقتصادی این صنعت راهبردی است (لطفی جلال‌آبادی و حسینی، 2022).

بنابراین، صنعت هوانوردی ایران در یک نقطه عطف قرار گرفته است. از یک سو، با چالش‌هایی بنیادین نظیر فرسودگی و کمبود ناوگان، محدودیت‌های ناشی از تحریم‌ها و فاصله معنادار با استانداردهای جهانی روبرو است که بقا و رقابت‌پذیری آن را تهدید می‌کند؛ از سوی دیگر، ظهور پارادایم نگهداری و تعمیرات 4.0 به‌عنوان یک رویکرد فناورانه، فرصتی بی‌نظیر برای غلبه بر این چالش‌ها، افزایش ایمنی و بهینه‌سازی عملکرد دارایی‌های موجود فراهم آورده است. با این وجود، گذار به این پارادایم نوین نیازمند یک نقشه راه علمی و شناخت دقیق از اولویت‌های راهبردی است تا از سرمایه‌گذاری‌های پراکنده و هدررفت منابع ارزشمند جلوگیری شود. از این رو، پژوهش حاضر در تلاش است تا با پر کردن خلأ موجود، به پرسش‌های بنیادینی پاسخ دهد؛ نخست آنکه «وضعیت پژوهش‌ها و ادبیات حوزه نگهداری و تعمیرات 4.0 در صنعت هوانوردی به چه صورت است» و دوم اینکه «معیارهای نگهداری و تعمیرات 4.0 در صنعت هوانوردی چیست؟».

1 <https://aig.cao.ir>

2 OEM

بر همین اساس، پژوهش حاضر با استفاده از روش فرا ترکیب و بررسی نظام مند مطالعات علمی مرتبط، در صدد شناسایی و سازمان دهی معیارهای نگهداری و تعمیرات 4.0 (نت 4.0) در صنعت هوانوردی است تا شکاف میان فناوری های موجود و الزامات واقعی استقرار و ارزیابی این رویکرد در محیط عملیاتی هوانوردی کاهش یابد. این رویکرد می تواند مبنایی برای ارزیابی وضعیت موجود، شناسایی اولویت های تحول دیجیتال و طراحی نقشه راه استقرار Maintenance 4.0 در صنعت هوانوردی فراهم آورد.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

نگهداری و تعمیرات

صنعت هوانوردی به عنوان یکی از پیچیده ترین و حساس ترین صنایع در سطح جهانی، در محیطی فعالیت می کند که با قوانین سخت گیرانه و استانداردهای بین المللی ایمنی احاطه شده است. در این صنعت، مفهوم نگهداری و تعمیرات فراتر از تعمیر تجهیزات پس از خرابی است و به مجموعه ای از فعالیت های فنی، اداری و نظارتی اطلاق می شود که هدف نهایی آن تضمین صلاحیت پرواز ۱ و بازگرداندن اقلام به شرایط عملیاتی استاندارد است. این فرآیند شامل سرویس، بازرسی، تعمیر، اصلاح و تعمیرات اساسی است که باید تحت دقیق ترین پروتکل های نظارتی انجام شود، زیرا کوچک ترین انحراف از استانداردها می تواند ایمنی مسافران و دارایی های سرمایه ای را به خطر اندازد (Rath et al., 2025).

نگهداری و تعمیرات، مجموعه ای از فعالیت های فنی، اداری و مدیریتی است که در طول چرخه عمر یک آیتم یا تجهیز انجام می شود تا آن را در حالتی حفظ کرده یا به حالتی بازگرداند که بتواند عملکرد مورد نیاز خود را انجام دهد (شرافت و همکاران، 1397). فلسفه نت از رویکرد صرفاً واکنشی (تعمیر پس از خرابی) به سمت رویکردی پیشگیرانه و هوشمند تغییر یافته است. هدف اصلی این سیستم، بیشینه سازی قابلیت اطمینان^۲ و دسترس پذیری^۳ تجهیزات ضمن کمینه سازی هزینه های چرخه عمر است (اعلایی و همکاران، 1398). استراتژی های نت به طور کلی به سه دسته اصلی تقسیم می شوند:

1 Airworthiness

2 Reliability

3 Availability

- نت اصلاحی یا واکنشی^۱: در این استراتژی، تا زمانی که خرابی رخ ندهد، هیچ اقدامی صورت نمی‌گیرد. این روش اگرچه در کوتاه‌مدت کم‌هزینه به نظر می‌رسد، اما منجر به خرابی‌های ناگهانی و توقفات پیش‌بینی نشده می‌شود.
- نت پیشگیرانه یا زمان‌بندی شده^۲: فعالیت‌های نت بر اساس فواصل زمانی مشخص یا میزان کارکرد (مانند ساعات پرواز) انجام می‌شوند تا احتمال خرابی کاهش یابد.
- نت مبتنی بر وضعیت^۳: در این روش، تصمیم‌گیری برای انجام تعمیرات بر اساس پایش وضعیت واقعی تجهیز و علائم خرابی صورت می‌گیرد، نه صرفاً زمان (فیاضی و توحیدی، ۱۴۰۳).

یکی از نظریه‌های بنیادین در این حوزه، نت مبتنی بر قابلیت اطمینان^۴ است. این رویکرد، فرآیندی ساختاریافته برای تعیین سیاست‌های مدیریت خرابی است تا اطمینان حاصل شود که دارایی‌ها به انجام کاری که کاربران از آن‌ها انتظار دارند، ادامه می‌دهند. تمرکز اصلی نت مبتنی بر قابلیت اطمینان بر شناسایی کارکردهای سیستم، شکست‌های عملکردی و علل ریشه‌ای خرابی‌هاست (آقایی و همکاران، ۱۳۹۴).

کاربرد اصول نت در صنعت هوانوردی به دلیل الزامات سخت‌گیرانه ایمنی و قوانین سازمان‌های بین‌المللی، تفاوت‌های ماهوی با سایر صنایع دارد. در هوانوردی، هدف اصلی تداوم صلاحیت پرواز^۵ است. هرگونه نقص فنی می‌تواند منجر به فجایع انسانی و زیان‌های مالی سنگین شود؛ بنابراین، استراتژی‌های نت در این صنعت با دقت بسیار بالایی تدوین می‌شوند. هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، تعمیرات اساسی و بازرسی بخش قابل توجهی از هزینه‌های عملیاتی شرکت‌های هواپیمایی (حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد) را تشکیل می‌دهد. چالش اصلی در نت هوانوردی، ایجاد تعادل میان ایمنی پرواز و بهره‌وری اقتصادی است. رویکردهای سنتی در هوانوردی غالباً بر بازرسی‌های دوره‌ای سخت‌گیرانه^۶ استوار بوده‌اند که اگرچه ایمنی را تضمین می‌کنند، اما ممکن است منجر به انجام تعمیرات غیرضروری و خواب طولانی‌مدت هواپیما^۷ شوند (Rath et al., 2025).

1 Corrective Maintenance (Run-to-Failure)

2 Preventive Maintenance (PM)

3 Condition-Based Maintenance (CBM)

4 Reliability-Centered Maintenance (RCM)

5 Continuing Airworthiness

6 A, B, C and D Checks

7 Aircraft on Ground (AOG)

صنعت 4.0 و نت 4.0

از سوی دیگر صنعت 4.0 با ظهور خود، تأثیرات چشمگیری را بر همه حوزه‌ها گذاشت. صنعت 4.0 شامل اتوماسیون فرآیند تبادل داده در میان سیستم‌های تولیدی، همراه با تلفیق اینترنت اشیا با محاسبات شناختی و ابری است، بنابراین به عنوان سامانه‌های سایبر فیزیکال شناخته می‌شود. صنعت 4.0 پارادایم‌ها و فناوری‌های بی‌شماری از جمله توسعه مشترک محصولات، رایانش ابری، اینترنت اشیا، برنامه‌ریزی منابع سازمانی، فناوری اطلاعات و ارتباطات، شناسایی فرکانس رادیویی و غیره را در خود جای داده است (Herman et al., 2016). از آنجا که تحقق سیستم قبلی (صنعت 3.0) بر اتوماسیون فرایندها و ماشین‌آلات منفرد متمرکز بود، می‌توان گفت صنعت 3.0 بنیان صنعت 4.0 را بنا نهاد. صنعت 4.0 شامل دیجیتالی‌سازی تقریباً تمام سامانه‌های فیزیکی همراه با ادغام آنها با یکدیگر برای تشکیل یک اکوسیستم دیجیتال در سراسر زنجیره ارزش را شامل می‌شود. به گفته زالکا و همکاران (2016)، اصطلاح صنعت 4.0 برای سه عامل استفاده می‌شود: (1) دیجیتالی‌سازی و ادغام شبکه‌ها، (2) دیجیتالی‌سازی محصولات و خدمات و (3) مدل‌های جدید بازار. این عناصر به طور متقابل به هم پیوسته‌اند (Zezulka et al., 2016). پرالس و همکاران (2018) ویژگی‌های اصلی صنعت 4.0 را مجازی‌سازی، قابلیت همکاری، اتوماسیون، انعطاف‌پذیری، در دسترس بودن در زمان واقعی، جهت‌دهی خدمات و بهره‌وری انرژی تعریف کردند (Perales et al., 2018). کاربرد فناوری‌های دیجیتال در فرایندهای تولید نیز «ساخت هوشمند»، «صنعت یکپارچه» و «اینترنت صنعتی» نامیده می‌شود (Hofmann & Rüsch, 2017). به طور کلی، فناوری‌های صنعت 4.0 از تصمیم‌گیری‌های پشتیبانی و بنابراین به طور قابل توجهی به افزایش بهره‌وری کمک می‌کنند. این صنعت، تغییر و تحول فراگیری را در صنایع، خدمات و سایر حوزه‌های کاربردی به همراه داشته است. در این تحولات، اتصال تجهیزات و دستگاه‌ها، سیستم‌ها و فرایندها به هم و به اینترنت به وسیله شبکه‌های هوشمند و به کارگیری فناوری‌های داده‌بنیان و هوش مصنوعی توانسته جغرافیای وسیعی از حوزه‌های اقتصادی، صنعتی و بازرگانی را درنوردد (رکن‌الدینی و عندلیب، 1403).

براین اساس انقلاب صنعتی چهارم، پارادایم جدیدی تحت عنوان نگهداری و تعمیرات 4.0 شکل داد. این مفهوم به معنای ادغام فناوری‌های دیجیتال پیشرفته با فرآیندهای فیزیکی

نت است که منجر به تحول از رویکردهای پیشگیرانه به رویکردهای پیش‌بینانه و تجویزی می‌شود. نت ۴۰ بر پایه سیستم‌های فیزیکی - سایبری استوار است. معماری این سیستم شامل جمع‌آوری داده‌ها از حسگرهای تعبیه‌شده، انتقال داده‌ها از طریق اینترنت اشیا، ذخیره‌سازی در رایانش ابری^۱ و تحلیل داده‌ها توسط هوش مصنوعی و یادگیری ماشین است (Ceruti et al., 2019). همچنین یکی دیگر از ارکان اصلی این فناوری در صنعت هوانوردی، دوقلوی دیجیتال است. نت ۴۰ با معیارهایی متمایز می‌شود که آن را از روش‌های سنتی جدا می‌کند؛ از جمله:

- پیش‌بینی بلادرنگ^۲: توانایی پیش‌بینی خرابی‌ها قبل از وقوع با دقت بالا با استفاده از کلان‌داده‌ها.
- خودکارسازی تصمیم‌گیری: سیستم نه تنها خرابی را پیش‌بینی می‌کند، بلکه راهکار بهینه (زمان تعمیر و قطعه موردنیاز) را نیز تجویز می‌نماید (نت تجویزی).
- یکپارچگی افقی و عمودی: اتصال کامل زنجیره تأمین قطعات یدکی با سیستم‌های عملیاتی پرواز و آشیانه‌های تعمیراتی (Korchagin et al., 2022).

پیاده‌سازی نت ۴۰ در هوانوردی مزایای چشمگیری دارد، از جمله: کاهش زمان‌های توقف هواپیما^۳، بهینه‌سازی موجودی انبار قطعات یدکی، کاهش خطای انسانی در بازرسی‌ها و افزایش بهره‌وری کلی ناوگان. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از هوش مصنوعی در نت هواپیما می‌تواند هزینه‌های تعمیرات را به میزان قابل توجهی کاهش دهد (Zonta et al., 2020). با این حال، این گذار با چالش‌هایی نیز روبروست. مسائل مربوط به امنیت سایبری^۴ (حفاظت از داده‌های حساس پرواز)، نیاز به زیرساخت‌های گران‌قیمت IT، و کمبود نیروی انسانی متخصص در زمینه تحلیل داده‌ها از موانع اصلی محسوب می‌شوند (خانی، ۱۴۰۴).

پیشینه خارجی

چروتی و همکاران (2019) در پژوهشی با عنوان «نگهداری و تعمیرات در هوانوردی در بستر صنعت ۴۰: نقش واقعیت افزوده و ساخت افزایشی» به تحلیل تأثیر انقلاب صنعتی چهارم بر فرآیندهای نگهداری، تعمیرات و اورهال هواپیما پرداختند. ایشان با استفاده از روش مرور

1 Cloud Computing
2 Real-time Prediction
3 AOG
4 Cybersecurity

ادبیات و مدل سازی مفهومی، ارکان کلیدی صنعت ۴.۰ برای حوزه هوانوردی را شناسایی کردند. خروجی اصلی این مطالعه، ارائه یک مدل یکپارچه ساز است که داده های عملیاتی را از منابع گوناگون جمع آوری کرده تا نگهداری و تعمیرات هوشمند و پیش بینانه را ممکن سازد و نهایتاً منجر به کاهش هزینه ها و افزایش زمان در دسترس بودن هواپیما شود (Ceruti et al., 2019).

زونتا و همکاران (2020) در مقاله ای با عنوان «نگهداری و تعمیرات پیش بینانه در بستر صنعت ۴.۰: یک مرور نظام مند ادبیات پژوهش» به بررسی جامع مفاهیم، مزایا و چالش های این حوزه پرداختند. ایشان با به کارگیری روش مرور نظام مند ادبیات، فناوری های کلیدی توانمندساز مانند اینترنت اشیا، کلان داده، رایانش ابری و هوش مصنوعی را به عنوان زیربنای نگهداری و تعمیرات پیش بینانه شناسایی کردند. یافته برجسته این پژوهش، ارائه یک معماری عمومی برای پیاده سازی این رویکرد و برجسته سازی موانعی نظیر امنیت داده و پیچیدگی های یکپارچه سازی سیستم ها بود (Zonta et al., 2020).

باسدکیس و همکاران (2020) در مطالعه خود تحت عنوان «نگهداری و تعمیرات پیش بینانه در انقلاب صنعتی چهارم: مزایا، فرصت های کسب و کار و پیامدهای مدیریتی» به ارائه یک تصویر کلی از تکنیک ها، کاربردها و چالش های این حوزه پرداختند. این پژوهش که مبتنی بر یک مرور ادبیات نظام مند است، تکنیک های نگهداری و تعمیرات پیش بینانه را به سه دسته داده محور، مبتنی بر مدل و ترکیبی طبقه بندی می کند. یافته اصلی این پژوهش، تشریح معماری یک سامانه نگهداری و تعمیرات پیش بینانه، از مرحله گردآوری داده تا تصمیم گیری نهایی است و نتیجه می گیرد که علی رغم پتانسیل بالا، چالش هایی در کیفیت داده و هزینه پیاده سازی همچنان باقی است (Bousdekis et al., 2020).

کورچاگین و همکاران (2022) در پژوهشی با عنوان «نگهداری و تعمیرات ناب ۴.۰: پیاده سازی در صنعت هوانوردی» یک چارچوب مفهومی برای ادغام اصول تفکر ناب با فناوری های نگهداری و تعمیرات ۴.۰ ارائه دادند. در این پژوهش، با ترکیب مبانی نظری دو حوزه، یک مدل هم افزا معرفی شد که در آن ابزارهای دیجیتال صنعت ۴.۰ به تقویت اهداف سنتی رویکرد ناب (مانند کاهش اتلاف و بهینه سازی فرآیند) کمک می کنند. دستاورد این پژوهش، ارائه راهکاری برای بهبود همزمان کارایی و اثربخشی در عملیات نگهداری و تعمیرات هوانوردی است (Korchagin et al., 2022).

تساكالرو و همكاران (2022) در مقاله‌ای با عنوان «نگهداری و تعمیرات هواپیما ۴۰۰ در عصر اختلال‌ها» به بررسی نقش و سازگاری مفاهیم جدید نگهداری و تعمیرات در مواجهه با بحران‌هایی نظیر همه‌گیری جهانی پرداختند. روش پژوهش آن‌ها اکتشافی و مبتنی بر تحلیل گزارش‌های صنعتی و مقالات علمی بود. این مطالعه نشان داد که اختلالات، پذیرش فناوری‌های دیجیتال را شتاب می‌بخشد و مفاهیمی چون تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری اهمیت حیاتی پیدا می‌کنند. یافته کلیدی، تأکید بر نقش ابزارهایی مانند دوقلو دیجیتال^۱ و همکاری از راه دور برای حفظ تداوم کسب‌وکار در عملیات تعمیر و نگهداری طی بحران‌ها بود (Tsakalerou et al., 2022).

مونک و همكاران (2024) در پژوهشی با عنوان «دوقلوهای دیجیتال در تولید هواپیما و نگهداری، تعمیر و اورهال: چالش‌ها و فرصت‌ها» یک نمای کلی از کاربرد و پتانسیل این فناوری در چرخه‌ی عمر هواپیما ارائه کردند. این مطالعه که مبتنی بر مرور پیشرفته‌ترین دستاوردها و تحلیل کاربردهای صنعتی است، تشریح می‌کند که چگونه یک دوقلو دیجیتال با ایجاد یک نسخه مجازی از دارایی فیزیکی (مانند موتور)، امکان شبیه‌سازی، نظارت و پیش‌بینی عملکرد را فراهم می‌آورد. مزایای اصلی شناسایی شده شامل بهینه‌سازی برنامه‌های تعمیر، بهبود طراحی و افزایش بهره‌وری عملیاتی در فرآیندهای نگهداری و تعمیرات است (Moenck et al., 2024).

کاباشکین و سوزانین (2024) در پژوهشی به طراحی یک اکوسیستم یکپارچه جهت اشتراک‌گذاری داده‌ها و پیاده‌سازی نگهداشت پیش‌بینانه مبتنی بر هوش مصنوعی در صنعت هوانوردی پرداختند. این مطالعه باهدف غلبه بر چالش‌های استانداردسازی اطلاعات و امتناع ذی‌نفعان از تبادل داده‌های عملیاتی انجام شد. در چارچوب معماری ارائه‌شده، جریان‌های داده‌ای ناهمگون شامل حسگرهای هواپیما، سوابق تعمیراتی و شرایط جوی تجمیع گردید و به‌واسطه مدل‌های مقیاس‌پذیر هوش مصنوعی نظیر یادگیری فدرال^۲ برای تشخیص ناهنجاری و تخمین عمر مفید باقی‌مانده پردازش شد. بررسی پنج سناریوی کاربردی نشان داد که به‌کارگیری این زیرساخت ماژولار و مبتنی بر یادگیری مشارکتی حافظ حریم خصوصی، ضمن رفع موانع امنیتی تبادل اطلاعات، دقت پیش‌بینی خرابی قطعات را به‌طور چشمگیری ارتقا می‌بخشد. نتایج این بررسی اثبات می‌کند که استقرار چنین پلتفرم‌های مجهز

1 Digital Twins

2 Federated learning

به حلقه‌های باز خورد، با تغییر رویکرد از تعمیرات واکنشی به راهبردهای پیش‌دستانه، موجب بهینه‌سازی تخصیص منابع، کاهش توقف‌های برنامه‌ریزی‌نشده و ارتقای سطح ایمنی پروازها می‌گردد (Kabashkin & Susanin, 2024).

هو و همکاران (2026) در پژوهشی به بررسی چالش‌های ناشی از ویژگی‌های پیچیده زبانی و توزیع به‌شدت نامتوازن داده‌ها در گزارش‌های نگهداری و تعمیرات هوانوردی غیرنظامی پرداختند. هدف این مطالعه توسعه روشی هوشمند برای شناسایی دقیق مخاطرات این حوزه جهت بهینه‌سازی ایمنی و کارایی بود. پژوهش‌گران الگویی مبتنی بر متن کاوی^۱ و مدل‌سازی یکپارچه انتخابی^۲ ارائه دادند که در آن، پس از پیش‌پردازش متنی، از روش فراوانی اصطلاح - معکوس فراوانی سند^۳ برای استخراج ویژگی‌ها بهره گرفته شد. در ادامه، برای رفع عدم توازن داده‌ها از نمونه‌برداری آستانه سختی نمونه^۴ و برای ترکیب مدل‌ها از یک الگوریتم همجوشی وزن‌دار تطبیقی ارتقایافته^۵ استفاده گردید. نتایج حاصل از اعمال این چارچوب بر روی داده‌های واقعی سیستم گزارش‌دهی ایمنی هوانوردی^۶ نشان داد که رویکرد پیشنهادی با ایجاد تعادل بین تنوع و دقت مدل‌های پایه، به طور قابل توجهی برتری و قابلیت تعمیم بیشتری نسبت به الگوریتم‌های موجود در شناسایی مخاطرات مهندسی دارد (Hou et al., 2026).

داگال (2026) در مقاله‌ای ضرورت گذر از رویکردهای سنتی به سمت چارچوب‌های هوشمند و مبتنی بر قابلیت اطمینان را در سیستم‌های پیچیده هوانوردی مورد بررسی قرار داد. این مطالعه با یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی در چهار استراتژی نگهداری از پیش تعیین‌شده، مبتنی بر وضعیت، پیش‌بینانه و واکنشی، یک ساختار ترکیبی توسعه داد. روش کار شامل بهره‌گیری از الگوریتم‌های نظارت‌شده و بدون نظارت یادگیری ماشین در کنار مدل‌سازی قابلیت اطمینان برای تشخیص عیوب، پیش‌آگهی و بهینه‌سازی تصمیمات بود. یافته‌های اعتبارسنجی‌شده با داده‌های حسگرها و سوابق پروازی حاکی از آن است که اجرای نگهداری پیش‌بینانه هوشمند به کاهش ۲۲ درصدی هشدارهای کاذب، ارتقای دقت

1 Text Mining

2 Selective ensemble modeling

3 Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF)

4 Instance Hardness Threshold (IHT)

5 Enhanced Adaptive Weighted Fusion Algorithm (EAWFA)

6 Aviation Safety Reporting System (ASRS)

تشخیص عیب تا ۴/۹۵ درصد و افزایش ۱۸ درصدی عمر قطعات می‌انجامد. این چارچوب داده‌محور با فراهم‌سازی امکان تطبیق‌پذیری پویا بین استراتژی‌های مختلف، نقشی تحول‌آفرین در ارتقای ایمنی و رعایت الزامات قانونی ایفا می‌کند (Dagal, 2026).

پیشینه داخلی

مهری و ملکی (1404) در پژوهشی که پیرامون تاب‌آوری صنعت هوانوردی کشور از طریق مرور پیشینه و مصاحبه با خبرگان انجام دادند، 22 عامل شناسایی کردند. در ادامه با به‌کارگیری روش دلفی فازی، عوامل پژوهش غربال شدند. 9 عامل دارای عدد دی‌فازی مطلوبی بودند و برای اولویت‌بندی نهایی انتخاب شدند. عوامل غربال شده با روش واسپاس فازی ارزیابی شدند. یافته‌ها نشان داد که عوامل تقویت و توسعه استارت‌آپ‌های فعال در صنعت هوانوردی، همکاری با شرکت‌های فناور در انتقال دانش و توسعه زیرساخت‌های فناوری اطلاعات در شرکت‌های هواپیمایی به ترتیب از بالاترین اولویت برخوردارند.

مالک‌پور و همکاران (1404) در پژوهشی که در خصوص الگوی تاب‌آوری شناختی در صنعت هوانوردی با رویکرد کیفی و بر اساس راهبرد نظریه داده‌بنیاد و از طریق مصاحبه‌های عمیق نیمه‌ساختاریافته با ۱۵ نفر از متخصصان حوزه علوم شناختی و خلبانان ارشد عملیاتی (باسابقه بیش از ۲۰۰۰ ساعت پرواز) انجام دادند به یک چارچوب مفهومی منسجم جهت واکاوی رفتارهای شناختی خلبانان در شرایط بحرانی بود که می‌تواند به‌عنوان زیربنایی تحلیلی، مبنای توسعه مداخلات کاربردی و پژوهش‌های تجربی آتی در این قلمرو قرار گیرد نائل شدند.

مرادی و همکاران (1404) پژوهشی در خصوص پیشگیری از سوانح هوایی مبتنی بر ابروندهای علمی و فناورانه آینده صنعت هوانوردی انجام دادند. پژوهشگران ابتدا پژوهش‌های مرتبط در پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی در محدوده زمانی سال 2024-2015 مورد جستجو قرار دادند. پس از غربالگری 67 پژوهش از منظر ارتباط با ابروندهای علمی و فناورانه آینده و از منظر زمینه‌های موضوعی مورد تحلیل محتوای کیفی و کمی قرار گرفت. مرور مطالعات نشان می‌دهد ابروندهای هوش مصنوعی، مهارت‌های آینده، زیرساخت‌های هوشمند و عصر داده نقش محوری در پیشگیری از سوانح هوایی در

زمینه‌های موضوعی ارزیابی و تحلیل ریسک‌های پروازی، مسیریابی و کنترل ترافیک هوایی، تحلیل سیستم ایمنی پرواز، پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوایی و بحران‌های طبیعی و تحلیل ریشه‌ای علل سوانح هوایی مورد توجه قرار دارد.

فیاضی و توحیدی (1403) در پژوهشی با عنوان «ارائه راهبردهای نگهداری و تعمیر هواپیما در رویکرد تعمیر و نگهداری بهره‌ور فراگیر» به تدوین استراتژی‌های مناسب برای ارتقای کیفیت نت در صنعت هوانوردی پرداختند. روش پژوهش در این مطالعه ترکیبی (آمیخته) بود که با استفاده از تکنیک‌های تحلیل سوات¹ و ماتریس اسپیس²، نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدهای موجود را شناسایی کردند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که راهبرد ترکیبی (تدافعی - رقابتی) مناسب‌ترین گزینه برای سازمان‌های هوایی مورد مطالعه است و پیاده‌سازی نت بهره‌ور فراگیر³ می‌تواند به شکل قابل توجهی قابلیت اطمینان ناوگان را افزایش و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد.

اعلایی و همکاران (1398) در مطالعه‌ای با عنوان «اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر موفقیت برنامه نگهداری و تعمیرات هواپیما با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره» باهدف شناسایی کلیدی‌ترین فاکتورهای اثرگذار بر کارایی سیستم‌های نت در صنایع پیچیده انجام شد. در این پژوهش از روش تحلیل سلسله‌مراتب فازی⁴ برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی معیارها استفاده گردید. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن بود که عواملی نظیر آموزش تخصصی پرسنل، دسترسی به قطعات یدکی باکیفیت و استقرار سیستم‌های نرم‌افزاری یکپارچه دارای بالاترین اولویت هستند و تمرکز مدیریت بر این حوزه‌ها می‌تواند نرخ خرابی‌های اضطراری را به حداقل برساند.

شرافت و همکاران (1397) در پژوهشی با عنوان «طراحی مکانیزم انتخاب استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات» به بررسی چالش انتخاب بهترین راهبرد نت در شرایط عدم قطعیت پرداختند. روش پژوهش شامل استفاده از تئوری داده‌بنیاد⁵ برای استخراج الگوها و سپس مدل‌سازی کمی برای انتخاب استراتژی بود. یافته‌های کلیدی این مطالعه نشان داد که هیچ تک‌استراتژی واحدی برای تمام تجهیزات بهینه نیست و سازمان‌ها باید از یک رویکرد

1 SWOT Analysis

2 SPACE Matrix

3 Total Productive Maintenance (TPM)

4 Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

5 Grounded Theory

ترکیبی هوشمند استفاده کنند که در آن استراتژی‌های پیشگیرانه، اصلاحی و پیش‌بینانه بر اساس سطح ریسک و اهمیت تجهیزات به کار گرفته شوند.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که این مطالعات هرچند ارزشمند، اما دارای شکاف‌های قابل تأمل در بستر کاربردی موردنظر این پژوهش هستند. در مطالعات خارجی تمرکز اصلی بر جنبه‌های فنی، معرفی فناوری‌های نوظهور نظیر دوقلوهای دیجیتال و هوش مصنوعی و ارائه مدل‌های مفهومی برای گذار به صنعت ۴.۰ بوده است. ازسوی دیگر، مطالعات داخلی عمدتاً بر استراتژی‌های کلاسیک نگهداری و تعمیرات، اولویت‌بندی عوامل موفقیت عمومی و یا مدل‌سازی‌های ریاضی متمرکز بوده‌اند و کمتر به صورت تخصصی به شناسایی و تحلیل معیارهای نگهداری و تعمیرات ۴.۰ در صنعت هوانوردی پرداخته‌اند.

بنابراین، فقدان پژوهشی که بتواند با گذار از مطالعات عمومی و ترجمه‌ای و خروج از رویکرد کلی‌نگر، مجموعه‌ای از معیارهای عملیاتی نت 4.0 را ارائه کند که نه تنها با استانداردهای جهانی همسو بوده، بلکه قابلیت پیاده‌سازی در شرایط خاص صنعت هوایی داخلی را نیز دارا باشد، بیش از پیش احساس می‌شود؛ بنابراین نوآوری این پژوهش، گذار از رویکردهای سنتی مدیریت نگهداری و تعمیرات به سمت یک پارادایم بازآفرینی دیجیتال^۱ با محوریت معیارهای نت ۴.۰ در صنعت هوانوردی است. تمایز کلیدی این مطالعه تمرکز بر مفهوم هوشمندسازی ناوگان موجود^۲ است. بر اساس یافته‌های مونک و همکاران (2024)، ارزش افزوده واقعی نت ۴.۰ زمانی پژوهش‌گر می‌شود که تکنولوژی‌هایی نظیر همزاد دیجیتال و تحلیل کلان‌داده، نه برای جایگزینی ناوگان، بلکه برای نصب روی سیستم‌های قدیمی و افزایش عمر مفید آن‌ها به کار گرفته شوند؛ رویکردی که دقیقاً پاسخی به چالش‌های محدودیت تأمین قطعه و نوسازی ناوگان در شرایط کنونی صنعت هوانوردی کشور است.

تحلیل شکاف نظری و نوآوری پژوهش

مرور انتقادی ادبیات نشان می‌دهد که دانش موجود درباره نگهداری و تعمیرات 4.0 در صنعت هوانوردی، علی‌رغم رشد قابل توجه، هنوز از نظر مفهومی پراکنده است. بخش قابل توجهی از مطالعات موجود، یکی از فناوری‌های توانمندساز نت 4.0، مانند هوش

¹ Digital Retrofit

² Legacy Fleet

مصنوعی، یادگیری ماشین، اینترنت اشیا، تحلیل داده‌های بزرگ یا دوقلوی دیجیتال را به صورت مستقل بررسی کرده‌اند. در این دسته از مطالعات، فناوری عمدتاً به عنوان ابزار بهبود یک فعالیت مشخص از نگهداری و تعمیرات مورد توجه قرار گرفته است. در مقابل، دسته دیگری از مطالعات با رویکرد صنعت 4.0، چارچوب‌های عمومی تحول دیجیتال را مطرح کرده‌اند که لزوماً الزامات خاص محیط هوانوردی، از جمله ایمنی، تداوم صلاحیت پروازی، قابلیت ردیابی، مسئولیت پذیری و انطباق مقرراتی را در مرکز چارچوب خود قرار نمی‌دهند. در مطالعات داخلی نیز تمرکز بیشتر بر راهبردهای کلاسیک نگهداری و تعمیرات، عوامل موفقیت عمومی و مدل‌های کمی بوده و مطالعات کمتری به طور مستقیم به ساختار مفهومی نت 4.0 در صنعت هوانوردی پرداخته‌اند.

از این منظر، شکاف موجود را می‌توان در سه سطح مرتبط با یکدیگر صورت بندی کرد. نخست، شکاف یکپارچگی مفهومی: ادبیات موجود عمدتاً مؤلفه‌های نت 4.0 را به صورت منفرد یا در قالب فناوری‌های مجزا بررسی کرده و کمتر به رابطه و هم‌نشینی آنها در قالب یک معماری منسجم پرداخته است. دوم، شکاف زمینه‌ای: چارچوب‌های عمومی صنعت 4.0 الزاماً ویژگی‌های منحصربه‌فرد صنعت هوانوردی، به ویژه حساسیت ایمنی، تداوم صلاحیت پروازی و الزامات حکمرانی و مقرراتی را در سطح کافی منعکس نمی‌کنند. سوم، شکاف سطح تحلیل: در بخشی از مطالعات، فناوری به عنوان نقطه شروع و هدف تحول در نظر گرفته شده است، در حالی که برای استقرار واقعی نت 4.0، فناوری باید با فرآیندهای عملیاتی، تصمیم‌گیری، نیروی انسانی، لجستیک و نظام حکمرانی در تعامل باشد.

براین اساس، مسئله نظری اصلی پژوهش حاضر این است که چه مجموعه‌ای از معیارها می‌تواند نت 4.0 را از یک مجموعه فناوری‌های منفرد به یک نظام یکپارچه و چندبعدی در صنعت هوانوردی تبدیل کند؟ پاسخ به این پرسش نیازمند ترکیب و بازآرایی دانش پراکنده موجود در مطالعات مختلف است؛ به گونه‌ای که روابط مفهومی میان فناوری، داده، فرآیند نگهداری، عملیات، انسان و حکمرانی آشکار شود.

پژوهش حاضر در پاسخ به این شکاف، با استفاده از فرا ترکیب و تحلیل محتوای کیفی، 94 مطالعه را بررسی و از آنها 455 کد اولیه استخراج کرده است که پس از طی فرایند کد گذاری به 24 کد محوری و شش مقوله اصلی تبدیل شده‌اند. این شش مقوله عبارت‌اند از: (1) هسته هوشمند محاسباتی و تحلیلی، (2) زیرساخت دیجیتال سایبر - فیزیکی، (3)

راهبرد کششگرای نگهداری و مدیریت سلامت، (4) عملیات، لجستیک و اتوماسیون هوشمند نگهداری و تعمیرات، (5) همکاری انسان - هوش مصنوعی و توانمندسازی نیروی انسانی، و (6) ایمنی، اعتماد و حکمرانی مقرراتی.

سهم دانش‌افزایی این پژوهش، ارائه چارچوبی یکپارچه برای تبیین نگهداری و تعمیرات نسل 4.0 در صنعت هوانوردی است. برخلاف مطالعاتی که عمدتاً بر فناوری‌های منفرد تمرکز دارند، این پژوهش شش بعد شامل هسته هوشمند محاسباتی و تحلیلی، زیرساخت سایر فیزیکی، راهبرد کنش‌گرای نگهداری، عملیات و لجستیک هوشمند، همکاری انسان - هوش مصنوعی و ایمنی و حکمرانی مقرراتی را در قالب یک نظام منسجم ترکیب می‌کند. بنابراین، نوآوری دانشی پژوهش در گذار از نگاه فناوری محور به نگاه نظام محور و نشان دادن تعامل فناوری، فرایند، انسان و الزامات ایمنی است. این چارچوب می‌تواند مبنایی برای ارزیابی بلوغ و برنامه‌ریزی تحول نگهداری هوشمند در صنعت هوانوردی قرار گیرد.

نوآوری نظری پژوهش در این چارچوب، در درجه نخست، یکپارچه‌سازی ابعادی است که در ادبیات غالباً به صورت جداگانه مطالعه شده‌اند. در این چارچوب، نسل 4.0 صرفاً معادل دیجیتالی‌سازی تجهیزات یا استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی تلقی نمی‌شود؛ بلکه یک معماری چندبعدی است که در آن قابلیت‌های محاسباتی و تحلیلی، زیرساخت سایر - فیزیکی، راهبردهای پیش‌بینانه و مدیریت سلامت، اجرای عملیاتی و لجستیکی، قابلیت‌های انسانی و الزامات ایمنی و مقرراتی به یکدیگر وابسته‌اند.

دومین جنبه نوآورانه، انتقال سطح تحلیل از «فناوری» به «نظام نگهداری و تعمیرات» است. به بیان دیگر، پرسش پژوهش صرفاً این نیست که چه فناوری‌هایی در MRO قابل استفاده‌اند، بلکه این است که برای تبدیل فناوری به قابلیت واقعی نسل 4.0 چه مجموعه‌ای از زیرساخت‌ها، فرآیندها، قابلیت‌های انسانی و سازوکارهای حکمرانی باید همزمان وجود داشته باشند. این برداشت با یافته‌های پژوهش نیز سازگار است که نشان می‌دهد ارزش نسل 4.0 زمانی ایجاد می‌شود که داده، تحلیل، تصمیم و اجرا در یک زنجیره یکپارچه قرار گیرند.

سومین جنبه نوآورانه، قراردادن ایمنی، اعتماد و حکمرانی مقرراتی در درون معماری نسل 4.0 است، نه به عنوان ملاحظات بیرونی و پسینی. این موضوع در صنعت هوانوردی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا فناوری‌های هوشمند باید در چارچوب الزامات ایمنی،

مسئولیت پذیری و کنترل ریسک مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، چارچوب استخراج شده در این پژوهش، نت 4.0 را به عنوان یک تحول صرفاً فناورانه تعریف نمی کند، بلکه آن را تحول همزمان در سطوح فناوری، فرآیند، انسان و حکمرانی در نظر می گیرد. در نتیجه، سهم نظری پژوهش حاضر را می توان در ارائه یک صورت بندی یکپارچه و چندبعدی از ساختار مفهومی نت 4.0 در صنعت هوانوردی خلاصه کرد؛ صورت بندی ای که از یک سو یافته های پراکنده ادبیات را تجمیع و سازمان دهی می کند و از سوی دیگر، زمینه را برای آزمون تجربی روابط میان این معیارها و پیامدهایی مانند قابلیت اطمینان، دسترس پذیری، ایمنی و بهره وری در پژوهش های آینده فراهم می سازد. خود مقاله نیز پیشنهاد کرده است که این چارچوب در مطالعات میدانی، پیمایشی یا مدل سازی معادلات ساختاری مورد آزمون قرار گیرد.

روش^۱

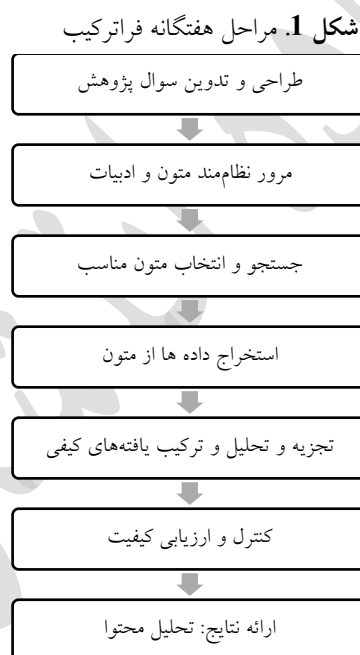
در سال های اخیر طیف وسیعی از روش های مختلف فرا ترکیب برای سنتز پژوهش های کیفی استفاده شده است (اسکندری و همکاران، 1404). فرا ترکیب کیفی یک ترکیب، تجزیه و تحلیل و تفسیر نظام مند از یافته های گروهی از مطالعات کیفی متمرکز بر یک موضوع خاص است (Frankel et al., 2025).

ترکیب پژوهش های مطالعات موردی کیفی مشتمل بر مشاهده همه متغیرها، تعاملات آنها، و تجزیه و تحلیل همه الگوهای زمینه ای موجود در مطالعات است. یک پژوهش فرا ترکیب از مطالعات موردی چندگانه شامل بررسی و ترکیب نتایج موجود از پژوهش های کیفی مطالعات موردی چندگانه در یک حوزه خاص پژوهشی است. فرا ترکیب هم می تواند منجر به فهم یک سازه یا رابطه جدید شود یا یک باز مفهوم سازی از سازه های موجود ارائه دهد (Bhardwaj & Srivastava, 2024).

مطالعات پژوهش هایی کیفی در درجه اول بر پاسخ به سؤالات چرایی و چگونگی تمرکز دارند. آنها به انسان و تجربیات انسانی مربوط می شوند و ممکن است درک درستی از پدیده های ساخته شده اجتماعی، از جمله نیازها، تجربه، رفتار، انگیزه ها، خواسته ها و انتظارات افراد ایجاد کنند. یک فرا ترکیب باید به جای توجه به تفسیر تفاوت ها و تنوع در مجموعه داده ها، بر شناسایی مضامین مشترک در سراسر مطالعات تمرکز نماید و به دنبال

فراتر رفتن از خلاصه‌ها و ارائه تفسیرهای جدید از یافته‌های مطالعات اولیه باشد (Chrastina, 2018). نتیجه فرا ترکیب ممکن است شامل تولید نظریه‌های جدید، توسعه مدل‌های مفهومی، شناسایی شکاف‌ها در پژوهش‌های، افزودن وسعت درک به دانش موجود، ارائه شواهدی برای وضعیت فعلی دانش و غیره باشد (Chrastina, 2018 and Willig & Wirth, 2018).

پژوهش فرا ترکیب نیازمند مرور و مطالعه دقیق مستندات پژوهشی معتبر با یک سازوکار اصولی و عمیق است. سندلوسکی^۱ و باروسو^۲ یک مدل هفت مرحله‌ای را برای انجام پژوهش فرا ترکیب پیشنهاد داده‌اند که این مراحل آن در شکل 1 ذکر شده است (Mirchi et al., 2024):



فرا ترکیب روشی برای تجزیه و تحلیل مطالعات کیفی است که نتایج توصیفی و تفسیری را از طریق ترکیب و مقایسه نتایج و یافته‌های مجموعه‌ای از مطالعات پژوهشی کیفی تولید می‌نماید. این روش به طور خاص برای علومی استفاده می‌شود که مطالعات انجام شده در

1 Sandelowski

2 Barroso

آن علوم غالباً مبتنی بر تجزیه و تحلیل‌های کیفی بوده و مبانی نظری خیلی گسترده را در بر نمی‌گیرد (Khoeini et al., 2024).

تحلیل محتوای کیفی به زبان ساده‌تر جمع‌آوری، دسته‌بندی، استانداردسازی و خلاصه‌سازی اطلاعات به طور نظام‌مند است به‌طوری‌که معانی پنهان برای ارائه به مخاطب آشکار شود. در تحلیل محتوای کیفی هدف اصلی پژوهش‌گر تفسیر گرابی و معنا گرابی است که پژوهش‌گر کمک می‌کند تا از اطلاعات و محتواهای گوناگونی استفاده کند (Mende, 2022). منظور از رویکرد استقرایی نیز این است که پژوهشگر با یک مدل پیش‌فرض قبلی به دنبال آن است که مقوله‌های اصلی را از دل متون خارج کند که بدین مرحله کدگذاری می‌گویند.

کدگذاری یک پروتکل خاص دارد که پژوهش‌گر با مطالعه فراوان با پروتکل آشنا می‌شود از فواید کدگذاری می‌توان به تسهیل برخورد با حجم زیادی از داده‌ها و خلاصه کردن حجم زیادی از داده‌ها در کلمات کلیدی و مفهومی اشاره کرد (Mostafaei & Hosseini, 2021).

در این پژوهش از سه مرحله کدگذاری استفاده شده است. مرحله اول کدگذاری باز است که پژوهش‌گر مسئله پژوهش را مشخص کرده سؤالات پژوهش را تدوین می‌کند و به دسته‌بندی منابع و مطالعه منابع می‌پردازد تا مفاهیم مهم را برداشت کند. مرحله دوم کدگذاری محوری است که پژوهش‌گر در این مرحله منابع پژوهش را مطالعه کرده و از دل منابع به مفاهیم جدید و اصلی می‌رسد پژوهش‌گر شروع به شناسایی عوامل کلیدی می‌کند و مفاهیم اصلی را با استفاده از کدگذاری در کنار یکدیگر قرار می‌دهد. مرحله سوم کدگذاری انتخابی است که مقوله‌های اصلی و عوامل کلیدی در قالب کدهای انتخابی تعیین می‌شود. (Rostami & Karlsson, 2024)

باتوجه به ماهیت کیفی و فراترکیبی پژوهش، اعتبار یافته‌ها در چند سطح مورد توجه قرار گرفت. در سطح نخست، کیفیت و تناسب مطالعات اولیه از طریق اعمال معیارهای مشخص ورود و خروج، شامل ارتباط مستقیم با موضوع پژوهش، نمایه‌شدن در پایگاه Scopus، نوع مقاله، زبان مقاله و کیفیت مجله بر اساس رتبه‌بندی SJR بررسی شد. در نهایت، پس از اعمال مراحل پالایش و ارزیابی، 94 مطالعه برای ورود به مرحله تحلیل و کدگذاری انتخاب شدند در سطح دوم، برای افزایش قابلیت اتکای فرایند استخراج و ترکیب یافته‌ها، محتوای

مطالعات منتخب به صورت نظام مند بررسی و اطلاعات مرتبط با فناوری‌ها، کاربردهای نگهداری و تعمیرات 4.0 و معیارهای مرتبط استخراج شد. سپس کدگذاری در سه سطح باز، محوری و انتخابی انجام گرفت؛ به گونه‌ای که 455 کد اولیه پس از بررسی و ادغام مفاهیم مشابه، در قالب 24 کد محوری و در نهایت 6 مقوله انتخابی سازمان‌دهی شدند. همچنین برای کاهش خطاهای ناشی از تفسیر و طبقه‌بندی مفاهیم، فرایند تحلیل به صورت بازگشتی انجام شد؛ به این معنا که در مراحل مختلف، کدهای استخراج‌شده، روابط میان کدها و نحوه انتساب آنها به مقوله‌های محوری و انتخابی مجدداً بررسی شد تا از سازگاری مفهومی و عدم هم‌پوشانی ناموجه میان مقوله‌ها اطمینان حاصل شود. از این رو، اعتبار یافته‌ها صرفاً بر مبنای فراوانی تکرار یک مفهوم در مطالعات منتخب تعیین نشده، بلکه انسجام مفهومی، ارتباط مستقیم با سؤال پژوهش و قابلیت قرارگیری هر کد در ساختار نهایی معیارها نیز مورد توجه قرار گرفته است. واحد تحلیل در پژوهش حاضر، «محتوای مفهومی مطالعات منتخب» در زمینه نگهداری و تعمیرات 4.0 در صنعت هوانوردی است. بنابراین، سطح تحلیل پژوهش، سطح بین‌مطالعه‌ای و مفهومی است و نه سطح سازمان، شرکت هواپیمایی، ناوگان یا مرکز تعمیر و نگهداری. در این چارچوب، یافته‌ها از طریق مقایسه و ترکیب مفاهیم، فناوری‌ها و معیارهای گزارش‌شده در مطالعات منتخب استخراج شده‌اند و هدف، شناسایی ساختار مفهومی مشترک و جامع از معیارهای نگهداری و تعمیرات 4.0 بوده است.

یافته‌ها

گام اول، طراحی و تدوین سؤال پژوهش است که در این پژوهش سؤال اصلی عبارت است از «معیارهای نگهداری و تعمیرات 4.0 در صنعت هوانوردی چیست؟» همچنین جامعه مورد مطالعه، مطالعات انجام شده در حوزه نگهداری و تعمیرات نسل 4.0 در صنعت هوانوردی و نمایه شده در پایگاه داده الکترونیکی علمی معتبر و مورد تأیید جامعه پژوهشگران دانشگاهی، یعنی اسکوپوس ۱ بوده و چارچوب زمانی پژوهش باهدف افزایش جامعیت و کیفیت پژوهش، بین سال‌های 2020 تا سال 2027 تعیین شده است.

گام دوم، مرور ادبیات به شکل نظام مند به صورت انتخاب کلیدواژه‌هایی جهت انجام عملیات جستجو در عناوین، کلیدواژه‌ها و چکیده‌ها است که در پژوهش فعلی شامل موارد زیر می‌شود:

- دسته 1: نگهداری، تعمیرات، تعمیرات اساسی، قابلیت اطمینان، هوانوردی،

هواپیما، شرکت هواپیمایی

- دسته 2: صنعت 4.0، کلان داده، پیش‌بینی کننده، دوقلوی دیجیتال، اینترنت اشیا،

هوش مصنوعی، سایبر - فیزیکی، یادگیری ماشین

گزینش کلیدواژگان مذکور، مبتنی بر ادبیات پژوهش و استفاده پژوهشگران از عبارات مختلف فوق در عناوین پژوهشی مرتبط با موضوع نگهداری و تعمیرات نسل 4.0 و صنعت هوانوردی است.

در گام سوم (جستجو و انتخاب متون مناسب و مرتبط) و در نتیجه جستجوی اولیه صورت گرفته در پایگاه داده مذکور تعداد 2،238 مقاله شناسایی شدند. این جست‌وجو با استفاده از موتور جستجوی پایگاه داده مذکور به صورت نرم افزاری و دستی انجام گرفت. در مرحله جستجوی نرم افزاری، با کمک قابلیت‌های موتورهای جستجوی پایگاه داده‌ها، کلیه کلیدواژگان در بخش عنوان، واژگان کلیدی و چکیده مقالات جستجو شدند و تعداد 2،238 نتیجه کلی به عنوان یافته‌های اولیه یادداشت گردید. سپس با استفاده از قابلیت فیلتر محدودسازی در موتور جستجو پایگاه داده جهت تفکیک مقالاتی که عین کلیدواژه‌های دسته 1 در عنوان و کلیدواژه‌های دسته 2 در چکیده و واژگان کلیدی آن‌ها وجود دارند، منابع مرتبط از نظر عنوان و چکیده شناسایی شدند و تعداد 117 مقاله در این مرحله باقی ماندند. بدین سان که در بخش عنوان به منظور بررسی مرتبط بودن عنوان مقاله، مقاله مرتبط با نگهداری و تعمیرات در صنعت هوانوردی (با بررسی وجود کلیدواژگان انتخابی در عناوین مقالات) انتخاب شدند و در بخش بررسی چکیده و کلیدواژه‌ها، تلاش شد مقالاتی که در راستای فناوری‌های نسل 4.0 و ارتباط این فناوری‌ها با نگهداری و تعمیرات در صنعت هوانوردی بودند در نظر گرفته شوند.

جدول 1. استراتژی جست‌وجو در گام سوم فراترکیب

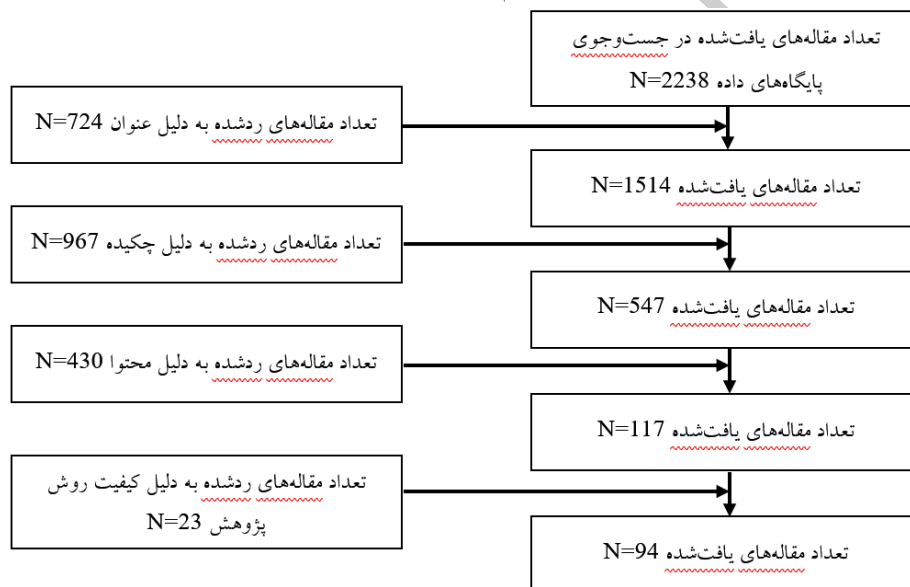
مرحله	استراتژی جست‌وجو (Query)	تعداد مقالات
1	TITLE-ABS-KEY (("maintenance" OR "repair" OR "overhaul" OR "MRO" OR "reliability") AND ("aviation" OR "aircraft" OR "airline" OR "aerospace")) AND TITLE-ABS-KEY ("Industry 4.0" OR "big data" OR "predictive" OR "digital twin" OR "IoT" OR "AI" OR "artificial intelligence" OR "cyber-physical" OR "machine learning" OR "smart") AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2028 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))	2,238
2	TITLE (("maintenance" OR "repair" OR "overhaul" OR "MRO" OR "reliability") AND ("aviation" OR "aircraft" OR "airline")) AND TITLE-ABS-KEY ("Industry 4.0" OR "big data" OR "predictive" OR "digital twin" OR "IoT" OR "AI" OR "artificial intelligence" OR "cyber-physical" OR "machine learning") AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2028 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))	117

در مرحله دستی فرایند جستجو، پژوهش‌گر با اعمال معیار اعتبار مجلات (چارک‌های علمی) مبتنی بر معیار SJR، مقالات نمایه‌شده در مجلات رده‌های Q1 و Q2 را به‌عنوان معیار ورود نهایی در نظر گرفت. علاوه بر معیارهای فوق، سایر معیارها نظیر در دسترس بودن متن چکیده، نوع مقالات شامل مقالات پژوهشی و مروری، زبان انگلیسی متون و عدم لحاظ محدودیت جغرافیایی، به‌عنوان معیارهای تعیین تناسب و صلاحیت متون منتخب مدنظر قرار داده شدند و نهایتاً 94 مقاله جهت استفاده در فرایند کدگذاری باقی ماندند. براین اساس،

فرا ترکیب معیارهای نگهداری و تعمیرات 4.0 در صنعت هوانوردی؛ یزدی زاده البرز و همکاران | 27

محتوای 94 مقاله باقی مانده در این مرحله، مطالعه و بررسی عمیق گردید. همچنین خلاصه فرایند جست و جو و انتخاب مقاله های نهایی در شکل زیر قابل مشاهده است:

شکل 2. الگوریتم انتخاب مقاله های نهایی



جدول 2. مقالات منتخب جهت انجام کدگذاری

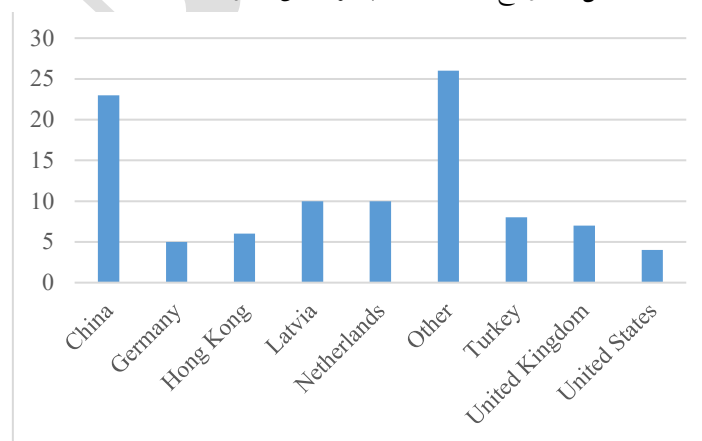
گام چهارم فرا ترکیب (استخراج اطلاعات متون) ابتدا با مطالعه دقیق چکیده ها و در صورت نیاز پالایش نهایی متن مقالات، به منظور استخراج اطلاعات مورد نظر انجام می شود. پس از بررسی مقالات و تفکیک آنها از نظر معیارهای انتخاب، فناوری های نسل 4.0 و کاربرد آنها در نگهداری و تعمیرات مرتبط با صنعت هوانوردی به عنوان کدهای ورودی استخراج شدند.

در گام پنجم (تجزیه و تحلیل و ترکیب یافته‌های کیفی) پژوهش حاضر، در بخش شناسایی معیارهای نت 4.0 در صنعت هوانوردی، با کمک نرم‌افزار اکسل تعداد 455 مولفه اولیه از مدل‌های پیشین استخراج شده و به‌عنوان کدباز منظور گردید. سپس با دسته‌بندی کدهای مشابه و به روش کدگذاری سه مرحله‌ای 24 کد محوری و 6 کد انتخابی مشتمل بر معیارهای نگهداری و تعمیرات نسل 4.0 در صنعت هوانوردی استخراج گردید.

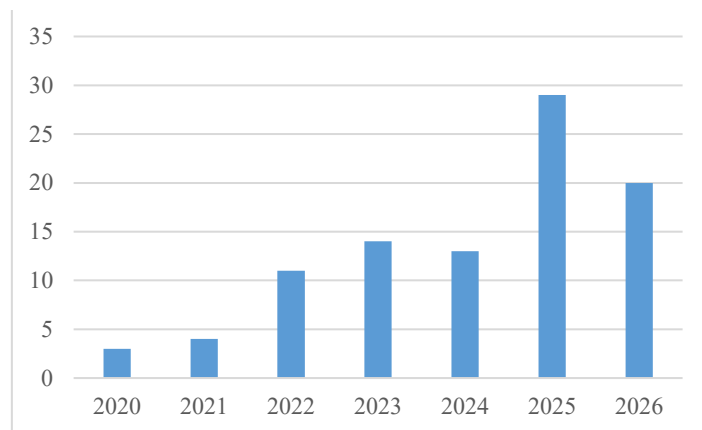
مبنای روایی پژوهش حاضر که در گروه پژوهش‌های کیفی قرار می‌گیرد، روایی نظریه‌ای بود و برای دستیابی به آن از راهکارهای مطالعه میدانی گسترده، تکثرگرایی نظری و کاربرد نظر متخصصان استفاده شد. به‌منظور اطمینان از کیفیت پژوهش در گام ششم فراترکیب، پژوهش‌گر در طی اجرای فرایند فراترکیب، چندین مرتبه به‌صورت رفت و برگشتی به گام‌های قبل بازگشته تا از انجام صحیح آن‌ها اطمینان پیدا کند. جهت حفظ شفافیت انتخاب مقالات در فرایند جستجو، باهدف دستیابی به دقت لازم در فرایند بررسی ادبیات در سرتاسر این پژوهش، تلاش شد تا گام‌های طی شده با فراهم کردن توضیحات و توصیفات روشن، مستدل و مستند برداشته شوند. علاوه بر این از آنجا که مهم‌ترین تهدید برای اعتبار هر پژوهش فراترکیب، عدم جستجوی جامع است، فرایند بررسی سیستماتیک ادبیات در این پژوهش بر اساس پایگاه داده‌های علمی معتبر بین‌المللی انجام گردید.

در ادامه، یافته‌های حاصل از اجرای فرایند فراترکیب (گام هفتم؛ ارائه نتایج) شامل فراوانی معیارهای مختلف و عوامل شناسایی شده ارائه می‌شوند.

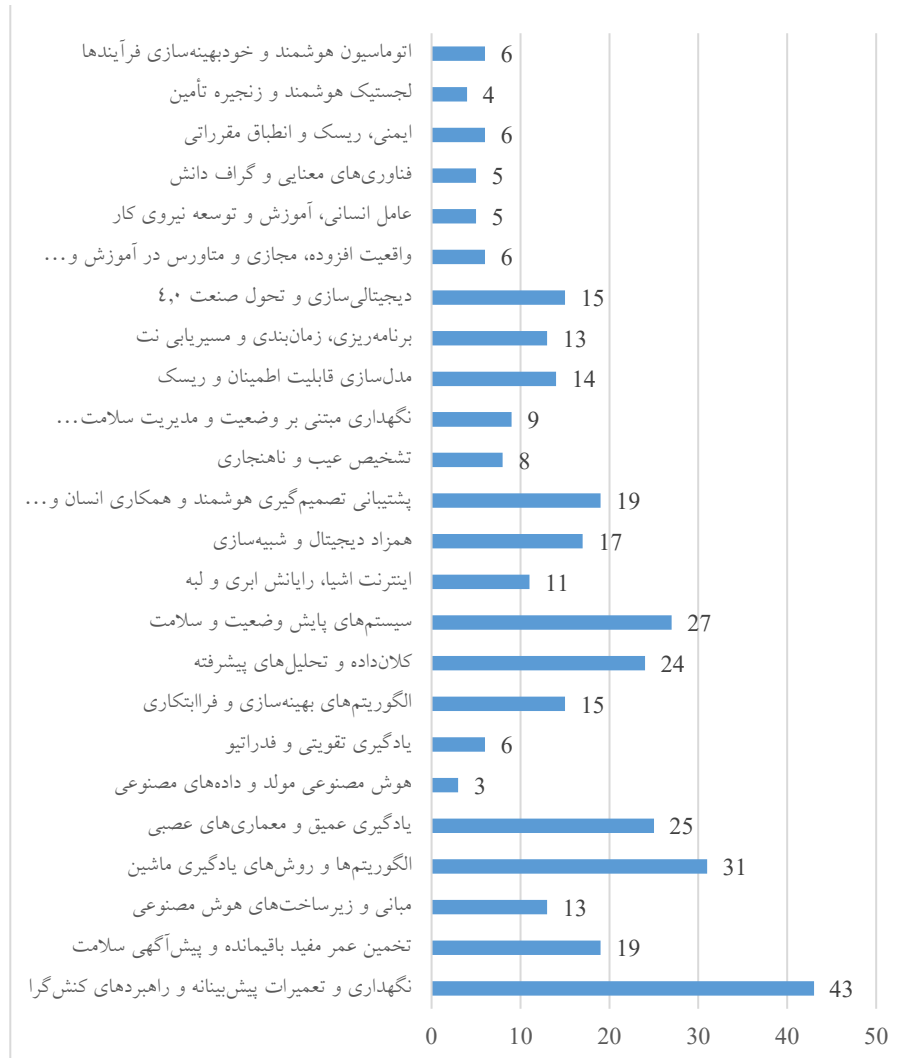
شکل 3. توزیع مقالات منتخب بر اساس کشور و سال انتشار



فرا ترکیب معیارهای نگهداری و تعمیرات 4.0 در صنعت هوانوردی؛ یزدی زاده البرز و همکاران | 29

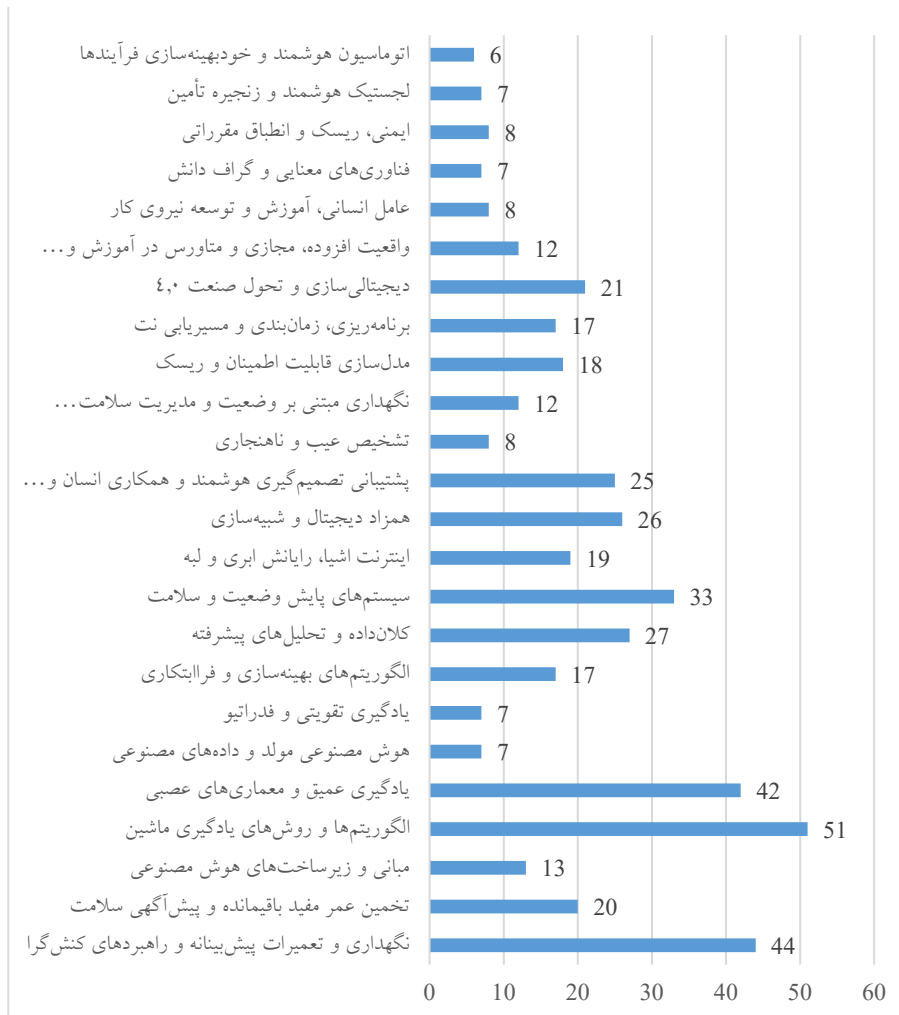


شکل 4. تعداد ارجاعات هر کد محوری



کدهای محوری با توجه به ارکان نت در صنعت هوانوردی و میزان ارتباط آنها با موضوع محوری مقاله استخراج شد؛ این کدها، که از کد اولیه و سپس کدهای گزینشی تولید شدند، سطح به سطح دارای ماهیت کلی‌تر و انتزاعی‌تر شده تا بتوانند شمول بیشتری از کدهای اولیه و کدهای گزینشی را دارا شوند.

شکل ۵. پراکندگی تعداد تخصیص کدهای باز به کدهای محوری



در پژوهش فرا ترکیب حاضر، دسته‌بندی مفاهیم ذیل هر کد انتخابی بر پایه منطق سه‌مرحله‌ای کدگذاری (باز، محوری و انتخابی) و بر اساس خوشه‌بندی معنایی - کارکردی انجام شده است و نه صرفاً شباهت واژگانی. ابتدا ۴۵۵ کد باز از متون استخراج شد؛ سپس کدهای باز هم‌مفهوم در ۲۴ کد محوری سازمان یافتند؛ و در نهایت، کدهای محوری که به یک لایه مفهومی مشترک در معماری نت ۴.۰ تعلق داشتند و نقش مکملی در تحقق آن ایفا می‌کردند، در ۶ کد انتخابی تجمیع شدند؛ بنابراین، هر کد انتخابی نماینده یک خوشه معنایی

- کارکردی است که مجموعه‌ای از مفاهیم را حول یک کارکرد کلیدی در نظام نگهداری و تعمیرات 4.0 گرد هم می‌آورد. این منطق با ماهیت فراترکیب و تحلیل محتوای کیفی مقاله همسو است؛ زیرا هدف نهایی، تقلیل داده‌های پراکنده به مقولاتی انتزاعی‌تر، ولی منسجم و قابل استفاده در قالب یک چارچوب چندلایه برای صنعت هوانوردی است. در نهایت متغیرهای استخراجی و معیارهای نگهداری و تعمیرات نسل 4.0 در صنعت هوانوردی (کدهای انتخابی) به شرح زیر است:

جدول 2. معیارهای نگهداری و تعمیرات نسل 4.0 در صنعت هوانوردی (کدهای انتخابی)

ردیف	کد انتخابی	تعداد ارجاع	تعداد کدهای محوری	مفاهیم مرتبط
1	هسته هوشمند محاسباتی و تحلیلی	75	8	مغز الگوریتمی سیستم: شامل تمام روش‌های AI/ML/DL، یادگیری تقویتی، هوش مولد، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تحلیل کلان داده و فناوری‌های دانش بنیان معنایی
2	زیرساخت دیجیتال سایر فیزیکی	50	4	بستر فیزیکی - مجازی توانمندساز: شامل سنسورها، پایش وضعیت، اینترنت اشیا، رایانش ابری/لبه، همزاد دیجیتال و چارچوب‌های کلان تحول دیجیتال صنعت ۴.۰
3	راهبرد کنش‌گرایی و مدیریت سلامت	61	5	پارادایم‌های نوین نگهداری: شامل گذار به نت پیش‌بینانه و مبتنی بر وضعیت (CBM/PHM)، پیش‌آگهی و تخمین عمر (RUL)، و مدل‌سازی قابلیت اطمینان و ریسک
4	عملیات، لجستیک و اتوماسیون هوشمند نت	23	3	اجرا و پشتیبانی فرآیندی: شامل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پویا، مسیریابی ناوگان، لجستیک قطعات یدکی و اتوماسیون خودبهبه‌شونده فرآیندهای تعمیراتی
5	همکاری انسان - هوش مصنوعی و توانمندسازی نیروی انسانی	29	3	بُعد انسانی (People): تعامل تکنسین با سیستم‌های هوشمند، سیستم‌های پشتیبان تصمیم، آموزش با فناوری‌های نوین (AR/VR/Metaverse) و توسعه شایستگی‌های دیجیتال

6	ایمنی، اعتماد و حکمرانی مقرراتی	6	1	بُعد حکمرانی و محیط نهادی: لایه مستقل تضمین ایمنی پرواز، مدیریت ریسک و انطباق با الزامات رگولاتوری، شفافیت و اعتمادپذیری سیستم‌های هوشمند
---	---------------------------------	---	---	--

برای نمونه، در ردیف ۱، کد انتخابی «هسته هوشمند محاسباتی و تحلیلی» شامل کدهای محوری مرتبط با AI/ML/DL، یادگیری تقویتی، هوش مولد، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، تحلیل کلان‌داده و فناوری‌های دانش‌بنیان معنایی است. دلیل قرار گرفتن این مفاهیم در زیرمجموعه یک کد انتخابی آن است که همگی کارکرد «مغز الگوریتمی سیستم» را ایفا می‌کنند؛ یعنی داده‌های خام را به الگو، پیش‌بینی، بهینه‌سازی و توصیه تصمیمی تبدیل می‌کنند و زیرساخت شناختی سایر کدهای انتخابی را می‌سازند. همچنین هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، یادگیری تقویتی و هوش مولد، عناصری حاشیه‌ای نیستند، بلکه زیرساخت تولید ارزش تحلیلی و عملیاتی محسوب می‌شوند. از این‌رو، جدا کردن آنها در قالب کدهای انتخابی مستقل، توجیه معرفت‌شناختی ندارد؛ زیرا همگی یک لایه واحد «پردازش - شناخت - تصمیم» را شکل می‌دهند. به همین ترتیب، سایر ردیف‌ها نیز بر اساس کارکرد لایه‌ای خود در معماری نت ۴.۰ دسته‌بندی شده‌اند.

بحث

هسته هوشمند محاسباتی و تحلیلی

این کد به‌مثابه «مغز الگوریتمی» کل نظام مفهومی عمل می‌کند و نشان می‌دهد که در هسته تحولات مورد مطالعه، صرفاً با دیجیتالی‌سازی داده‌ها مواجه نیستیم، بلکه با یک لایه پردازشی - شناختی روبه‌رو هستیم که تصمیم‌سازی را از منطق تجربی - واکنشی به سمت منطق داده‌محور، پیش‌نگر و خودتنظیم‌گر سوق می‌دهد. فراوانی بالای ارجاع‌ها در این کد حاکی از آن است که در ادبیات استخراج‌شده، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، یادگیری تقویتی و هوش مولد نه عناصر حاشیه‌ای، بلکه زیرساخت تولید ارزش تحلیلی و عملیاتی محسوب می‌شوند. از منظر فرا ترکیب، این خوشه مفهومی بیانگر آن است که «هوشمندی» در نظام مورد بررسی، بیش از آنکه یک ویژگی تزئینی یا افزوده باشد، به منزله

سازوکار مرکزی برای استخراج الگو، پیش‌بینی، بهینه‌سازی و تولید توصیه‌های تصمیمی بازنمایی شده است.

از زاویه تحلیل محتوای کیفی، این کد همچنین دلالت بر گذار از «پردازش داده» به «تولید معنا» دارد؛ یعنی سیستم‌های هوشمند فقط داده‌ها را تحلیل نمی‌کنند، بلکه از طریق فناوری‌های دانش‌بنیان معنایی، لایه‌ای از فهم عملیاتی را بر داده‌ها می‌افزایند. این امر نشان می‌دهد که در الگوی مفهومی استخراج‌شده، ارزش اصلی فناوری در توانایی آن برای تبدیل داده‌های پراکنده به بینش‌های قابل اقدام نهفته است. بنابراین، این کد را می‌توان ستون فقرات معرفت‌شناختی مدل دانست؛ ستونی که سایر کدها بر آن استوار می‌شوند و بدون آن، زیرساخت، نگهداری، عملیات و حتی حکمرانی هوشمند فاقد انسجام تحلیلی خواهند بود.

زیرساخت دیجیتال سایبر فیزیکی

این کد بیانگر لایه‌ای است که پیوند میان جهان فیزیکی و جهان دیجیتال را ممکن می‌سازد و در واقع بستر تحقق هوشمندی را از سطح مفهومی به سطح اجرایی منتقل می‌کند. حضور مؤلفه‌هایی مانند سنسورها، اینترنت اشیاء، پایش وضعیت، رایانش ابری/لبه و همزاد دیجیتال نشان می‌دهد که در یافته‌های استخراج‌شده، هوشمندسازی بدون یک معماری سایبر فیزیکی پایدار و یکپارچه قابل تحقق نیست. به بیان دیگر، داده‌های قابل تحلیل از «هیچ» تولید نمی‌شوند، بلکه در نتیجه استقرار یک شبکه حسگر، سامانه‌های ارتباطی، ظرفیت پردازش توزیع‌شده و مدل‌های بازنمایی دیجیتال از دارایی‌های فیزیکی شکل می‌گیرند.

از منظر تحلیلی، این کد نقش «زیرساخت امکان‌ساز» را دارد؛ یعنی پیش‌شرط لازم برای فعال‌شدن تمام سازوکارهای تحلیلی و پیش‌بینانه. فراتر کتب نشان می‌دهد که تحول دیجیتال در این سطح، صرفاً جایگزینی ابزارهای سنتی با فناوری‌های جدید نیست، بلکه بازطراحی رابطه میان دارایی، داده، پردازش و تصمیم است. همزاد دیجیتال در این میان اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا امکان شبیه‌سازی، آزمون سناریو و پیش‌بینی رفتار سامانه را بدون مداخله مستقیم در سیستم واقعی فراهم می‌کند. بنابراین، این کد نمایانگر حرکت از «فناوری به‌عنوان ابزار» به «فناوری به‌عنوان معماری زیست‌محیطی سیستم» است.

راهبرد کنش‌گرایی نت و مدیریت سلامت

این کد نشان می‌دهد که منطق نگهداری و مدیریت سلامت از الگوی سنتی واکنشی و دوره‌ای فاصله گرفته و به سمت رویکردهای پیش‌نگر، وضعیت‌محور و ریسک‌محور حرکت کرده است. مفاهیمی مانند نت پیش‌بینانه، نت مبتنی بر وضعیت، پیش‌آگهی، تخمین عمر باقیمانده و مدل‌سازی قابلیت اطمینان، حاکی از آن هستند که در ادبیات مورد بررسی، نگهداری دیگر یک فعالیت صرفاً تعمیراتی تلقی نمی‌شود، بلکه به مثابه یک راهبرد کلان برای مدیریت عملکرد، کاهش توقف، کنترل هزینه و افزایش تاب‌آوری سامانه فهم می‌شود. در نتیجه، «سلامت» از یک مفهوم صرفاً فنی به یک معیار مدیریتی و تصمیمی ارتقا یافته است.

از منظر فرا ترکیب، این کد را می‌توان نقطه اتصال میان تحلیل داده و مداخله عملیاتی دانست. یعنی هسته هوشمند محاسباتی، داده را تحلیل می‌کند، اما این کد آن تحلیل را به تصمیم نگهداری تبدیل می‌کند. تحلیل محتوای کیفی نیز نشان می‌دهد که پارادایم غالب در این خوشه، عبور از تعمیر بعد از خرابی به سمت پیش‌بینی خرابی پیش از وقوع است؛ تغییری که نه تنها کارایی را افزایش می‌دهد، بلکه ریسک‌های سیستمی را نیز مهار می‌کند. از این منظر، راهبرد کنش‌گرای نت نقش پل میان شناخت ماشین و حکمرانی عملکرد را بازی می‌کند.

عملیات، لجستیک و اتوماسیون هوشمند نت

این کد به لایه اجرایی و هماهنگ‌سازی نظام هوشمند اشاره دارد؛ جایی که تصمیم‌های تحلیلی باید به برنامه‌ریزی، زمان‌بندی، تخصیص منابع و عملیات واقعی تبدیل شوند. مفاهیمی مانند مسیریابی ناوگان، لجستیک قطعات یدکی، زمان‌بندی پویا و اتوماسیون خودبهبوده‌شونده نشان می‌دهد که یافته‌ها نگهداری را نه فقط به عنوان یک مسئله فنی، بلکه به عنوان یک مسئله زنجیره عملیات و پشتیبانی تعریف کرده‌اند. بدین ترتیب، ارزش هوشمندسازی صرفاً در تشخیص خرابی نیست، بلکه در توانایی آن برای کاهش اصطکاک عملیاتی و افزایش چابکی پاسخ نیز نهفته است.

از منظر تحلیلی، پایین‌تر بودن تعداد ارجاع‌ها نسبت به برخی کدهای دیگر می‌تواند نشان دهد که این حوزه در ادبیات نسبت به هسته تحلیلی و زیرساختی، توسعه محدودتری داشته یا بیشتر به عنوان مرحله تبعی و اجرایی دیده شده است. با این حال، از دیدگاه نظام‌مند، این کد اهمیت زیادی دارد، زیرا بدون اتصال تحلیل به لجستیک و اجرا، هوشمندی به سطح

توصیه باقی می ماند و به اثر عملکردی تبدیل نمی شود. بنابراین، این کد را باید حلقه تبدیل «دانش» به «عمل» دانست؛ حلقه ای که کارآمدی کل سامانه در آن آزموده می شود.

همکاری انسان - هوش مصنوعی و توانمندسازی نیروی انسانی

این کد بر این نکته تأکید دارد که هوشمندسازی یک پروژه صرفاً فناورانه نیست، بلکه فرآیندی اجتماعی - سازمانی است که به بازتعریف نقش انسان در کنار ماشین منجر می شود. مفاهیمی مانند سیستم های پشتیبان تصمیم، تعامل تکنسین با سامانه های هوشمند و آموزش مبتنی بر واقعیت افزوده/واقعیت مجازی/متاورس¹ نشان می دهد که ادبیات استخراج شده بر هم افزایی انسان و فناوری تأکید دارد، نه جایگزینی کامل انسان. در این خوانش، نیروی انسانی از مجری دستورالعمل به کنشگر مجهز به داده، تفسیر و تصمیم ارتقا می یابد و در نتیجه، شایستگی دیجیتال به یک سرمایه محوری تبدیل می شود.

از منظر تحلیلی، این کد یکی از مهم ترین ابعاد پایداری تحول هوشمند را نمایندگی می کند، زیرا موفقیت سامانه های پیشرفته به پذیرش، فهم، و قابلیت استفاده توسط انسان ها وابسته است. استفاده از فناوری های آموزشی نوین نشان می دهد که شکاف مهارتی، یکی از موانع اصلی گذار به نظام های هوشمند است و باید به صورت فعال مدیریت شود. بنابراین، این کد صرفاً به آموزش اشاره ندارد، بلکه به «بازآرایی رابطه انسان - فناوری» اشاره می کند؛ رابطه ای که در آن انسان نه حذف می شود و نه صرفاً ناظر باقی می ماند، بلکه به همکار شناختی سیستم تبدیل می شود.

ایمنی، اعتماد و حکمرانی مقرراتی

این کد یک لایه حیاتی اما کم ارجاع تر را نشان می دهد که به مشروعیت، اعتماد و کنترل نهادی فناوری های هوشمند مربوط است. مفاهیمی مانند لایه مستقل تضمین ایمنی، مدیریت ریسک، انطباق با مقررات و شفافیت، بیانگر آن اند که حتی در پیشرفته ترین معماری های هوشمند، پذیرش و ماندگاری سیستم بدون حکمرانی قابل اعتماد ممکن نیست. این یافته به ویژه از آن جهت مهم است که نشان می دهد فناوری هرچقدر هم قدرتمند باشد، در غیاب چارچوب های نظارتی و سازوکارهای پاسخ گویی، ممکن است با مقاومت نهادی یا ریسک های عملیاتی مواجه شود.

از منظر فرا ترکیب، این کد را باید به عنوان «شرط مشروعیت سیستم» تفسیر کرد. تعداد ارجاع‌های کمتر لزوماً از اهمیت پایین‌تر آن خبر نمی‌دهد، بلکه ممکن است ناشی از مغفول ماندن نسبی ابعاد نهادی در برابر ابعاد فنی در ادبیات باشد. با این حال، تحلیل کیفی نشان می‌دهد که ایمنی و اعتماد، نه لایه‌ای حاشیه‌ای، بلکه بنیان امکان‌پذیری اخلاقی و حقوقی استقرار سیستم‌های هوشمند هستند. به همین دلیل، این کد نقش تعدیل‌کننده و کنترل‌کننده دارد و تضمین می‌کند که نوآوری فناورانه در مرزهای قابل قبول سازمانی و مقرراتی حرکت کند.

در مجموع، این شش کد یک زنجیره مفهومی منسجم را تشکیل می‌دهند: از هسته تحلیلی و زیرساخت سایبر فیزیکی آغاز می‌شود، در راهبردهای نگهداری و عملیات هوشمند تجسد می‌یابد، با همکاری انسان و هوش مصنوعی به سطح سازمانی - اجتماعی می‌رسد و در نهایت با حکمرانی، ایمنی و اعتماد تثبیت می‌شود. بنابراین، یافته‌ها نشان می‌دهند که هوشمندسازی یک پروژه تک‌بعدی نیست، بلکه یک اکوسیستم چندلایه است که در آن فناوری، انسان، عملیات و حکمرانی به صورت هم‌زمان باید هم‌راستا شوند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر باهدف شناسایی و تبیین معیارهای نگهداری و تعمیرات نسل 4.0 در صنعت هوانوردی، با اتکا بر روش فرا ترکیب هفت مرحله‌ای و تحلیل محتوای کیفی، کوشید تا تصویری منسجم و چندلایه از مؤلفه‌های اثرگذار بر تحول‌نت در بستر صنعت هوانوردی ارائه دهد. در این مسیر، پس از جست‌وجوی اولیه 2238 مقاله، با اعمال غربالگری‌های متوالی، 94 مقاله برای تحلیل نهایی انتخاب شد و از خلال مطالعه عمیق آن‌ها، 455 مولفه اولیه استخراج گردید که سپس در فرایند کدگذاری سه مرحله‌ای به 24 کد محوری و 6 کد انتخابی تقلیل یافت. این روند نشان می‌دهد که نتایج پژوهش نه بر پایه برداشت‌های پراکنده، بلکه بر مبنای یک فرایند نظام‌مند تجمیع، پالایش و تفسیر دانش موجود شکل گرفته است. از همین رو، خروجی این مطالعه می‌تواند به عنوان یک چارچوب مرجع برای فهم ساختار مفهومی نت 4.0 در صنعت هوانوردی تلقی شود؛ چارچوبی که هم ابعاد فناورانه را پوشش می‌دهد و هم ابعاد انسانی، عملیاتی و نهادی را در بر می‌گیرد.

مقایسه یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نتایج این پژوهش از یک سو با جهت‌گیری کلی ادبیات موجود همسو و از سوی دیگر، از طریق ارائه یک

چارچوب یکپارچه، فراتر از برخی مطالعات پیشین است. در پژوهش حاضر، شش مقوله شامل «هسته هوشمند محاسباتی و تحلیلی»، «زیرساخت دیجیتال سایبر فیزیکی»، «راهبرد کنش‌گرایی نت و مدیریت سلامت»، «عملیات، لجستیک و اتوماسیون هوشمند نت»، «همکاری انسان-هوش مصنوعی و توانمندسازی نیروی انسانی» و «ایمنی، اعتماد و حکمرانی مقرراتی» استخراج شد. این یافته‌ها با مطالعات چروتی و همکاران (2019)، زونتا و همکاران (2020) و باس‌دیکس و همکاران (2020) که بر نقش فناوری‌های دیجیتال، هوش مصنوعی، تحلیل داده و نگهداری پیش‌بینانه تأکید داشته‌اند، همخوانی دارد. بنابراین، برجسته‌شدن هسته هوشمند محاسباتی و زیرساخت سایبر فیزیکی در پژوهش حاضر، تأییدی بر اهمیت این دو مؤلفه در ادبیات نت 4.0 است.

یافته مربوط به «راهبرد کنش‌گرایی نت و مدیریت سلامت» نیز با نتایج کورچاگین و همکاران (2022) و مطالعات مرتبط با نگهداری پیش‌بینانه همسو است. این مطالعات بر حرکت از نگهداری سنتی و واکنشی به سمت رویکردهای پیش‌بینانه، وضعیت‌محور و داده‌محور تأکید دارند. با این حال، در پژوهش حاضر این موضوع صرفاً به‌عنوان یک فناوری یا ابزار مطرح نشده، بلکه به‌عنوان بخشی از راهبرد کلی نظام نگهداری و تعمیرات مفهوم‌پردازی شده است.

در زمینه «زیرساخت دیجیتال سایبر فیزیکی» نیز یافته‌ها با مطالعات مرتبط با اینترنت اشیا، دوقلوی دیجیتال و فناوری‌های صنعت 4.0، از جمله چروتی و همکاران (2019) و خانی (1404)، همخوانی دارد. تفاوت پژوهش حاضر در آن است که این فناوری‌ها را به‌صورت منفرد بررسی نکرده، بلکه حسگرها، اینترنت اشیا، پایش وضعیت، رایانش ابری و لبه و دوقلوی دیجیتال را در قالب یک زیرساخت یکپارچه برای اتصال دارایی فیزیکی، داده، تحلیل و تصمیم‌قرار داده است.

یافته «عملیات، لجستیک و اتوماسیون هوشمند نت» نیز با مطالعاتی مانند کورچاگین و همکاران (2022) هم‌راستا است؛ با این تفاوت که بسیاری از مطالعات پیشین تمرکز بیشتری بر فناوری و تحلیل داده داشته‌اند. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ارزش واقعی نت 4.0 زمانی ایجاد می‌شود که خروجی تحلیل به برنامه‌ریزی، زمان‌بندی، تخصیص منابع، لجستیک قطعات و عملیات تعمیراتی متصل شود.

در خصوص «همکاری انسان - هوش مصنوعی و توانمندسازی نیروی انسانی» نیز یافته‌های پژوهش با چروتی و همکاران (2019) و مطالعات مرتبط با پذیرش فناوری همسو است. با این حال، پژوهش حاضر این بعد را یکی از ارکان اصلی نت 4.0 می‌داند و بر این نکته تأکید می‌کند که نیروی انسانی در نظام هوشمند حذف نمی‌شود، بلکه به عنوان همکار شناختی و تصمیم‌یار سامانه ایفای نقش می‌کند. از این رو، آموزش، شایستگی دیجیتال و توانایی تعامل با سامانه‌های هوشمند، در کنار توسعه فناوری، اهمیت اساسی دارد.

یکی از تفاوت‌های مهم یافته‌های پژوهش حاضر با بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین، برجسته شدن «ایمنی، اعتماد و حکمرانی مقرراتی» به عنوان یک مقوله مستقل است. اگرچه برخی مطالعات به امنیت، ریسک و تاب‌آوری اشاره کرده‌اند، پژوهش حاضر این مؤلفه‌ها را در قالب یک لایه مستقل از معماری نت 4.0 قرار داده است. این یافته با توجه به حساسیت صنعت هوانوردی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا فناوری‌های هوشمند علاوه بر کارآمدی باید قابل اعتماد، قابل ممیزی و منطبق با الزامات ایمنی و مقرراتی باشند.

در مجموع، مقایسه یافته‌ها نشان می‌دهد که پژوهش حاضر مؤلفه‌های اصلی مطرح شده در ادبیات، مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، تحلیل داده، دوقلوی دیجیتال، نگهداری پیش‌بینانه و توانمندسازی نیروی انسانی را تأیید می‌کند، اما با یکپارچه‌سازی آنها در کنار عملیات، لجستیک و حکمرانی، از نگاه صرفاً فناورانه فراتر می‌رود. بنابراین، ارزش افزوده اصلی پژوهش حاضر در تجمع ابعاد پراکنده ادبیات و ارائه آنها در قالب یک معماری چندبعدی و منسجم برای نت 4.0 در صنعت هوانوردی است.

یافته‌های پژوهش آشکار ساخت که نگهداری و تعمیرات نسل 4.0 صرفاً به معنای به کارگیری ابزارهای دیجیتال جدید نیست، بلکه نشانه‌گذار از یک منطق سنتی، واکنشی و مبتنی بر تجربه به یک منطق هوشمند، پیش‌نگر و داده‌محور است. در این میان، هسته هوشمند محاسباتی و تحلیلی به عنوان معیاری که بیشترین تکرار را در ادبیات داشت شناخته شد؛ معیاری که نقش مغز الگوریتمی سامانه را ایفا می‌کند و باتکیه بر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، یادگیری تقویتی، هوش مولد، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و تحلیل کلان‌داده، امکان تبدیل داده‌های خام به بینش‌های عملیاتی را فراهم می‌سازد. این نتیجه نشان می‌دهد که در نت 4.0، ارزش اصلی از «ثبت داده» به «تولید دانش قابل اقدام» منتقل شده است. در واقع، سازمان‌هایی که خواهان گذار مؤثر به این نسل از نگهداری هستند، باید

ظرفیت خود را در حوزه تحلیل پیشرفته و سامانه‌های یادگیرنده توسعه دهند؛ زیرا مزیت رقابتی آینده نه در واکنش سریع به خرابی، بلکه در توانایی پیش‌بینی، تشخیص زودهنگام، بهینه‌سازی تصمیم و پیشگیری از اختلالات نهفته است.

در سطحی دیگر، زیرساخت دیجیتال سایر فیزیکی به‌عنوان دومین عامل پرتکرار، نشان داد که هوشمندسازی بدون پیوند عمیق میان جهان فیزیکی و جهان دیجیتال امکان‌پذیر نیست. سنسورها، پایش وضعیت، اینترنت اشیا، رایانش ابری/لبه و همزاد دیجیتال، نه اجزای جانبی، بلکه بنیان‌های اجرایی یک نظام نگهداری هوشمند هستند. این زیرساخت امکان جمع‌آوری، انتقال، پردازش و بازنمایی لحظه‌ای داده‌های عملیاتی را فراهم می‌کند و در نتیجه، بستر لازم برای تحلیل بلادرنگ و تصمیم‌گیری پیش‌دستانه را می‌سازد. اهمیت این یافته از آنجا ناشی می‌شود که در صنعت هوانوردی، کوچک‌ترین تأخیر یا خطا در تشخیص وضعیت تجهیزات می‌تواند پیامدهای عملیاتی، اقتصادی و ایمنی گسترده‌ای به دنبال داشته باشد. بنابراین، تحول در نت 4.0 صرفاً وابسته به نرم‌افزار یا الگوریتم نیست، بلکه مستلزم یک معماری سایر فیزیکی پایدار، یکپارچه و مقیاس‌پذیر است که دارایی‌های واقعی را به لایه تحلیلی متصل سازد.

یافته دیگر پژوهش به راهبرد کنش‌گرای نت و مدیریت سلامت مربوط است که نشان داد منطق غالب در نگهداری و تعمیرات نسل جدید، عبور از نت واکنشی و دوره‌ای به سوی نت پیش‌بینانه، مبتنی بر وضعیت و مبتنی بر سلامت است. برجسته‌شدن مفاهیمی مانند تخمین عمر باقیمانده¹ و مدل‌سازی قابلیت اطمینان و ریسک، بیانگر آن است که سلامت تجهیز در این چارچوب نه یک وضعیت ایستا، بلکه متغیری پویا، قابل پایش و قابل مداخله است. در چنین رویکردی، نگهداری از یک فعالیت اصلاحی پس از وقوع خرابی، به یک سازوکار راهبردی برای پیش‌بینی، پیشگیری و حفظ عملکرد تبدیل می‌شود. این تحول مفهومی در صنعت هوانوردی از اهمیت مضاعف برخوردار است، زیرا این صنعت بیش از بسیاری از حوزه‌های دیگر به قابلیت اعتماد، استمرار عملکرد و کنترل ریسک وابسته است. از این منظر، نت 4.0 نه فقط کارایی فنی را افزایش می‌دهد، بلکه تاب‌آوری عملیاتی و امنیت سیستم را نیز تقویت می‌کند.

در امتداد این موضوع، عملیات، لجستیک و اتوماسیون هوشمند نت نیز به‌عنوان یکی از معیارهای پرتکرار در ادبیات آشکار ساخت که هوشمندسازی زمانی به ارزش واقعی تبدیل

می‌شود که از مرحله تحلیل به مرحله اجرا و پشتیبانی عملیاتی انتقال یابد. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پویا، مسیریابی ناوگان، لجستیک قطعات یدکی و اتوماسیون خودبهبه‌شونده فرآیندهای تعمیراتی نشان می‌دهد که در نت 4.0، زنجیره اجرا باید به اندازه لایه تحلیل، هوشمند و چابک باشد. اگر داده، تصمیم و اجرا از یکدیگر منفک باقی بمانند، ظرفیت تحلیلی سامانه به مزیت عملیاتی بدل نخواهد شد. از این رو، یکی از مهم‌ترین دلالت‌های این پژوهش آن است که موفقیت نت 4.0 در صنعت هوانوردی نیازمند یکپارچگی میان پیش‌بینی، تخصیص منابع، زمان‌بندی، لجستیک و خودکارسازی فرایندهای عملیاتی است. در غیر این صورت، حتی پیشرفته‌ترین مدل‌های تحلیلی نیز در سطح توصیه باقی خواهند ماند و اثرگذاری واقعی بر عملکرد نخواهند داشت.

از سوی دیگر، پژوهش حاضر نشان داد که همکاری انسان - هوش مصنوعی و توانمندسازی نیروی انسانی یکی از ابعاد غیرقابل اغماض نت 4.0 است. این یافته از آن جهت اهمیت دارد که نشان می‌دهد هوشمندسازی در نگهداری و تعمیرات، پروژه‌ای صرفاً فناورانه نیست، بلکه فرآیندی عمیقاً انسانی، آموزشی و سازمانی است. تعامل تکنسین با سامانه‌های هوشمند، بهره‌گیری از سیستم‌های پشتیبان تصمیم و آموزش مبتنی بر فناوری‌های نوین نظیر واقعیت افزوده و مجازی همگی نشان‌دهنده آن است که نیروی انسانی در نت 4.0 نه حذف می‌شود و نه به نقش‌های منفعل فروکاسته می‌شود، بلکه در جایگاه همکار شناختی و تصمیم‌یار سامانه قرار می‌گیرد. بر این اساس، توسعه شایستگی‌های دیجیتال، ارتقای سواد داده، و بازطراحی نقش‌های شغلی، پیش‌شرط‌های ضروری برای استقرار موفق سامانه‌های هوشمند هستند. در واقع، بدون سرمایه‌گذاری بر یادگیری سازمانی و توانمندسازی نیروی انسانی، حتی پیشرفته‌ترین فناوری‌ها نیز در عمل با مقاومت، سوءفهم یا استفاده ناکارآمد مواجه خواهند شد.

در نهایت، ایمنی، اعتماد و حکمرانی مقرراتی به‌عنوان یکی از حساس‌ترین و در عین حال کم‌ارجاع‌ترین معیارها، نشان داد که بلوغ واقعی نت 4.0 تنها در بستر یک چارچوب نهادی شفاف، پاسخ‌گو و ایمن تحقق می‌یابد. هرچند این معیار در مقایسه با سایر ابعاد از نظر تعداد ارجاع کمتر بود، اما از حیث راهبردی، اهمیت آن بسیار بالاست؛ زیرا در صنعت هوانوردی، هر فناوری هوشمند باید نه تنها کارآمد، بلکه قابل اعتماد، قابل ممیزی و منطبق با مقررات باشد. تأکید ادبیات بر لایه مستقل تضمین ایمنی، مدیریت ریسک، انطباق با الزامات

رگولاتوری و شفافیت سیستم‌های هوشمند نشان می‌دهد که پذیرش و تداوم این فناوری‌ها بدون پشتوانه حکمرانی امکان‌پذیر نیست. در حقیقت، نوآوری فناورانه زمانی مشروعیت و پایداری پیدا می‌کند که در چارچوبی از نظارت، پاسخ‌گویی و کنترل ریسک قرار گیرد. از این منظر، حکمرانی مقرراتی نه یک امر بیرونی یا الحاقی، بلکه جزئی از معماری اصلی نت 4.0 در صنعت هوانوردی است.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نت 4.0 در صنعت هوانوردی یک پدیده چندبعدی و به‌هم‌پیوسته است که در آن فناوری، داده، زیرساخت، عملیات، انسان و حکمرانی در تعامل دائمی با یکدیگر قرار دارند. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که گذار موفق به نگهداری و تعمیرات نسل چهارم، صرفاً با خرید فناوری یا توسعه یک نرم‌افزار تحلیلی پژوهش‌گر نمی‌شود، بلکه نیازمند تحول هم‌زمان در سطوح زیرساختی، الگوریتمی، سازمانی و نهادی است. صنعت هوانوردی، به دلیل حساسیت بالا نسبت به ایمنی، قابلیت اعتماد و تداوم عملکرد، زمینه‌ای ممتاز برای آزمون و توسعه این منطق نوین به شمار می‌آید. بر همین اساس، می‌توان نتیجه گرفت که نت 4.0 نه یک انتخاب اختیاری، بلکه ضرورتی راهبردی برای ارتقای بهره‌وری، کاهش ریسک، افزایش تاب‌آوری و تضمین پایداری عملیاتی است. بر اساس یافته‌های پژوهش، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران و مدیران صنعت هوانوردی، نخست توسعه زیرساخت‌های سایبر فیزیکی، اینترنت اشیا و سامانه‌های یکپارچه داده را در اولویت قرار دهند. دوم، گذار تدریجی از نگهداری واکنشی به نگهداری وضعیت‌محور و پیش‌بینانه، با استفاده از تحلیل داده و هوش مصنوعی، در دستور کار قرار گیرد. سوم، برنامه توانمندسازی نیروی انسانی و توسعه شایستگی‌های دیجیتال کارکنان هم‌زمان با استقرار فناوری‌های هوشمند اجرا شود. چهارم، چارچوب‌های مشخصی برای امنیت داده، اعتمادپذیری سامانه‌های هوشمند، ممیزی و انطباق مقرراتی تدوین گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود سازمان‌های هوانوردی، اجرای این سیاست‌ها را به‌صورت مرحله‌ای و با ارزیابی مستمر بلوغ دیجیتال، عملکرد نگهداری و پیامدهای ایمنی دنبال کنند.

از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به اتکای آن به ادبیات منتشر شده و در دسترس اشاره کرد؛ بنابراین احتمال دارد برخی مطالعات غیرنمایه‌شده، گزارش‌های صنعتی یا پژوهش‌های به‌روزتر در فرایند فراترکیب وارد نشده باشند. همچنین، تمرکز مطالعه بر صنعت هوانوردی موجب می‌شود تعمیم مستقیم نتایج به سایر صنایع نیازمند احتیاط باشد،

زیرا سطح بلوغ دیجیتال، الزامات ایمنی و ساختار حکمرانی در حوزه‌های مختلف متفاوت است. در پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌شود این چارچوب مفهومی در قالب مطالعات میدانی، پیمایشی یا مدل‌سازی معادلات ساختاری در سازمان‌های هوانوردی آزمون شود تا روابط میان معیارهای استخراج‌شده و پیامدهای عملکردی مانند ایمنی، قابلیت اطمینان، کاهش هزینه و بهره‌وری به صورت تجربی سنجیده شود. همچنین، بررسی تطبیقی نت 4.0 در صنایع حساس دیگر، استفاده از روش‌های ترکیبی، و مطالعه عمیق‌تر بر ابعاد حکمرانی، پذیرش سازمانی و آمادگی نیروی انسانی می‌تواند مسیرهای مناسبی برای توسعه دانش در این حوزه فراهم آورد. از دیگر محدودیت‌های این پژوهش، ضرورت توجه به ویژگی‌ها و شرایط خاص صنعت هوانوردی ایران در تعمیم و به کارگیری معیارهای نگهداری و تعمیرات 4.0 است. چارچوب استخراج‌شده در این پژوهش عمدتاً بر مبنای شواهد و مطالعات منتشرشده در ادبیات بین‌المللی شکل گرفته است؛ از این رو، اگرچه معیارهای شناسایی شده از پشتوانه مطالعاتی برخوردارند، اما میزان تحقق‌پذیری و اولویت آنها در محیط عملیاتی ایران ممکن است تحت تأثیر شرایط نهادی، اقتصادی، فناورانه و عملیاتی این صنعت قرار گیرد. فرسودگی و ناهمگونی ناوگان، محدودیت دسترسی به هواپیماها، قطعات یدکی و دانش فنی روزآمد ناشی از تحریم‌ها، و فاصله برخی زیرساخت‌های فناورانه با الزامات تحول دیجیتال، می‌تواند سطح آمادگی سازمان‌های هوانوردی برای استقرار فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، تحلیل کلان‌داده و نگهداری پیش‌بینانه را تحت تأثیر قرار دهد. از منظر عملیاتی نیز، تفاوت در نوع، سن و معماری فنی ناوگان، سطح بلوغ سیستم‌های اطلاعاتی، کیفیت و دسترس‌پذیری داده‌های نگهداری، قابلیت یکپارچه‌سازی سامانه‌های عملیاتی و تعمیراتی، و سطح مهارت نیروی انسانی می‌تواند موجب شود یک معیار مشخص از نگهداری و تعمیرات 4.0 در سازمان‌های مختلف، از اهمیت و امکان‌پذیری متفاوتی برخوردار باشد. افزون بر این، پیاده‌سازی راهکارهای پیشرفته نگهداری 4.0 مستلزم سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناوری اطلاعات، مدیریت و حفاظت از داده‌ها و توسعه نیروی انسانی متخصص در حوزه تحلیل داده است؛ عواملی که در ادبیات مورد بررسی نیز به عنوان برخی از چالش‌های گذار به نگهداری 4.0 مطرح شده‌اند.

بنابراین، نتایج این فرا ترکیب نباید به عنوان یک الگوی کاملاً ثابت و یکسان برای تمامی شرکت‌های هواپیمایی و مراکز تعمیر و نگهداری کشور تلقی شود؛ بلکه می‌تواند به عنوان

چارچوبی مفهومی برای شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی معیارهای نگهداری و تعمیرات 4.0 مورد استفاده قرار گیرد. تعیین میزان اهمیت نسبی و امکان‌پذیری هر یک از معیارها در صنعت هوانوردی ایران، مستلزم اعتبارسنجی میدانی و بومی‌سازی چارچوب پیشنهادی با مشارکت خبرگان، شرکت‌های هواپیمایی و مراکز تعمیر و نگهداری است. از این‌رو، انجام مطالعات دلفی، پیمایش‌های سازمانی، مطالعات موردی و مدل‌سازی‌های تجربی در پژوهش‌های آتی می‌تواند به تعیین سطح بلوغ دیجیتال، اولویت‌بندی معیارها و تبیین روابط میان آنها متناسب با شرایط واقعی صنعت هوانوردی ایران کمک کند.

تعارض منافع

نویسندگان مقاله هیچ‌گونه تعارض منافع ندارند.

ORCID

Mohammad Yazdizade Alborz		https://orcid.org/0009-0005-5222-3649
Karim Ebrahimi		https://orcid.org/0000-0002-8316-4427
Mohammad Hassan Maleki		https://orcid.org/0000-0002-3740-5402

منابع

- اسکندری، ع.، ابراهیمی، ک.، و یزدانی، ح. (۱۴۰۴). اعتبارسنجی پژوهش‌های فرا ترکیب با تأکید بر روش اعتبارسنجی کانکوال. *روش‌شناسی علوم انسانی*، ۳۱(۱۲۳)، ۵۷-۸۱.
<https://doi.org/10.30471/mssh.2025.10872.2633>
- سازمان هواپیمایی کشوری. (۱۳۹۹). گزارش بررسی تطبیقی وضعیت ایمنی هوانوردی کشور در مقایسه با جهان. سازمان هواپیمایی کشوری.
<https://caa.gov.ir/downloads/files/BzoMAXoahgsRyZD2024-01-29.pdf>
- سازمان هواپیمایی کشوری. (۱۴۰۱). صنعت هوانوردی پیش‌ران توسعه کشورهاست. سازمان هواپیمایی کشوری.
<https://caa.gov.ir/news-archive/show/VdRp2G>
- سازمان هواپیمایی کشوری. (۱۴۰۴، الف). افزایش ۱۸ درصدی ناوگان هوایی کشور. سازمان هواپیمایی کشوری.
<https://www.caa.gov.ir/news-archive/show/VyXyzP>
- سازمان هواپیمایی کشوری. (۱۴۰۴، ب). تحول صنعت هوانوردی ایران؛ فرصتی برای توسعه متوازن و سرمایه‌گذاری راهبردی. سازمان هواپیمایی کشوری.
<https://caa.gov.ir/news-archive/show/PB6kYP>
- سازمان هواپیمایی کشوری. (۱۴۰۴، ج). ضرورت توسعه صنعت هوانوردی با رویکرد جذب سرمایه‌گذار و بهره‌برداری از روش‌های نوین. سازمان هواپیمایی کشوری.
<https://www.caa.gov.ir/news-archive/show/PoynMr>
- خبرگزاری مهر. (۱۴۰۴). میانگین سنی ناوگان هوایی ایران ۲۸ سال است. در خبرگزاری مهر.
<https://www.mehrnews.com/x38Fms>
- آستانه، ح. (۱۳۹۱). صنعت هوانوردی عمومی در ایران و جهان. در مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.
- خبرگزاری دانشجویان ایران (ایسنا). (۱۴۰۲). آخرین وضعیت ناوگان هوایی در کشور. در خبرگزاری دانشجویان ایران.
<https://www.isna.ir/xdQLv9>
- لطفی جلال آبادی، م.، و حسینی، س. ج. (۲۰۲۲). مدیریت هزینه نگهداری و تعمیر در شرکت‌های هواپیمایی. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی هوانوردی*، ۲۴(۱)، ۹۷-۱۱۰.
<https://doi.org/10.22034/joae.2022.323854.1082>
- شرافت، ا.، محقر، ع.، کریمی، ف.، و داودی، س. م. (۱۳۹۷). طراحی مکانیزم انتخاب استراتژی مناسب نگهداری و تعمیرات. *مجله چشم‌انداز مدیریت صنعتی*.
<https://civilica.com/doc/1301580>
- فیاضی، ح.، و توحیدی، ا. (۱۴۰۳). ارائه راهبردهای نگهداری و تعمیر هواپیماها در رویکرد تعمیر و نگهداری بهره‌ور فراگیر. *فصلنامه مطالعات بین‌رشته‌ای دانش راهبردی*.
<https://civilica.com/doc/2233947>
- اعلایی، م.، فرهادی، ع.، و خوش چشم، س. ع. (۱۳۹۸). اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر موفقیت برنامه نگهداری و تعمیرات هواپیما با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره. *مجله مهندسی هوانوردی*.
<https://civilica.com/doc/1571590>

- رکن‌الدینی، س. ع.، و عندلیب اردکانی، د. (۱۴۰۳). تحلیل عوامل سازمانی مؤثر بر پذیرش فناوری‌های صنعت ۴.۰ در شرکت‌های کوچک و متوسط. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴(۲)، ۸۵-۱۱۲.
<https://doi.org/10.48308/jimp.14.2.85>
- آقای، ر.، آقای، ا.، و محمد حسینی ناجی زاده، ر. (۱۳۹۴). شناسایی و رتبه‌بندی معیارهای کلیدی مؤثر بر نگهداری و تعمیرات چابک با استفاده از رویکرد دلفی فازی و دیمتل فازی (مطالعه موردی: صنعت خودروسازی ایران). فصلنامه مدیریت صنعتی. <https://civilica.com/doc/1400327>
- خانی، ص. (۱۴۰۴). کاربردهای اینترنت اشیا (IoT) در صنعت هوانوردی و نقش آن در تحول به سمت تعمیر و نگهداری هوشمند. بیست و چهارمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در علوم برق، کامپیوتر و مهندسی پزشکی. <https://civilica.com/doc/2320305>
- قاسمی، م.، مقدسی، م.، ملکی، و.، و سوزی، م. (۱۳۹۸). ارایه یک سیاست بهینه تعمیر و نگهداری در صنعت هوایی. هجدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران. <https://civilica.com/doc/1015346>
- مالک‌پور، د.، نادری، ا.، محجوب، ح.، و عزتی، م. (۱۴۰۴). طراحی الگوی تاب‌آوری شناختی در صنعت هوانوردی (ابعاد، مقوله‌ها و مضامین). روانشناسی شناختی، ۱۳(۳)، ۴۹۹۸.
- مرادی، م.، احمدوند، ع.، صمدی فروشانی، م.، ضرغامی، ح.، و نصیری، ع. (۱۴۰۴). پیشگیری از سوانح هوایی مبتنی بر ابروندهای علمی و فناوریانه آینده صنعت هوانوردی: یک مرور حیطه‌ای نظام‌مند. نشریه علمی پژوهشی مهندسی هوانوردی، ۲۷(۲)، ۳۳-۴۸.
<https://doi.org/10.22034/joae.2025.499251.1263>
- مهری، و.، و ملکی، م. ح. (۱۴۰۴). ارائه چارچوبی برای تاب‌آوری صنعت هوانوردی کشور. بهبود مدیریت، ۱۹(۴)، ۶۰-۳۴.
<https://doi.org/10.22034/jmi.2025.522691.3206>
- مصطفایی، پ.، و حسینی، س. ع. (۱۴۰۰). تحلیل محتوای کیفی گزارش مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها با تأکید بر ذینفعان اجتماعی. پژوهش‌های تجربی حسابداری، ۱۱(۳)، ۷۹-۱۱۲.
<https://doi.org/10.22051/jera.2021.34649.2790>

References

- Bhardwaj, R., & Srivastava, S. (2021). Dynamic capabilities of social enterprises: A qualitative meta-synthesis and future agenda. *Journal of Social Entrepreneurship*, 15, 1–29. <https://doi.org/10.1080/19420676.2021.1972030>
- Bousdekis, A., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2020). Predictive maintenance in the fourth industrial revolution: Benefits, business opportunities, and managerial implications. *IEEE Engineering Management Review*, 48(1), 57–62. <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2958037>
- Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., & Bil, C. (2019). Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of augmented reality and additive manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 516–526. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>
- Chrastina, J. (2018). Meta-synthesis of qualitative studies: Background, methodology and applications. In *Proceedings of NORDSCI*. <https://doi.org/10.32008/NORDSCI2018/B1/V1/13>
- Frankel, K. K., Brooks, M. D., & Learned, J. E. (2025). Teachers' perspectives on the structure of reading intervention classes in secondary schools: A meta-

- synthesis of qualitative research. *Teaching and Teacher Education*, 162, 105029.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)* (pp. 3928-3937). IEEE.
- Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Khocini, S., Noruzi, A., Naghshineh, N., & Sheikhshoaei, F. (2024). Developing a model of digital transformation of university libraries based on meta-synthesis. *The Electronic Library*, 42(4), 681–699. <https://doi.org/10.1108/EL-02-2024-0046>
- Korchagin, A., Deniskin, Y., Pocebneva, I., & Vasilyeva, O. (2022). Lean Maintenance 4.0: Implementation for aviation industry. *Transportation Research Procedia*, 63, 1521–1533. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.164>
- Mende, J. (2022). Extended qualitative content analysis: Researching the United Nations and other international institutions. *Qualitative Research Journal*, 22(3), 340–353.
- Mirchi, S., Vedadi, A., & Gholamzadeh, D. (2024). Applying a meta-synthesis approach to present a blended learning model for talent development. *Journal of Medical Education*, 22(1). <https://doi.org/10.5812/jme-142760>
- Mohaghar, A., Ghasemi, R., & Shirazi, S. (2025). IoT-based smart maintenance in LARG context: A metasynthesis in the aviation industry. *Journal of Industrial Management Perspective*. <https://doi.org/10.48308/jimp.2025.237525.1596>
- Perales, D. P., Valero, F. A., & García, A. B. (2018). Industry 4.0: A classification scheme. In *Closing the Gap Between Practice and Research in Industrial Engineering* (pp. 343–350). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58409-6_38
- Rath, B., Jha, K. K., Padhy, R., & Jena, D. (2025). Maintenance in aviation enabled by Industry 4.0 technologies: Exploring the current research trends using a topic modeling approach. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 74(6), 1873–1896. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-11-2023-0625>
- Rostami, E., & Karlsson, F. (2024). Qualitative content analysis of actionable advice in information security policies: Introducing the keyword loss of specificity metric. *Information & Computer Security*, 32(4), 492–508.
- Tsakalerou, M., Nurmaganbetov, D., & Beltenov, N. (2022). Aircraft Maintenance 4.0 in an era of disruptions. *Procedia Computer Science*, 200, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.211>
- Willig, C., & Wirth, L. (2018). A meta-synthesis of studies of patients' experience of living with terminal cancer. *Health Psychology*, 37(3), 228–238. <https://doi.org/10.1037/hea0000581>
- Zezulka, F., Marcon, P., Veselý, I., & Sajdl, O. (2016). Industry 4.0 – An introduction in the phenomenon. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25), 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.002>
- Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, Article 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>

References [In Persian]

- Aghaei, R., Aghaei, A., & Mohammadhosseini Najizadeh, R. (1394). Identification and ranking of key factors affecting agile maintenance using the fuzzy Delphi and fuzzy DEMATEL approaches (Case study: Iran's automotive industry). *Industrial Management Quarterly*. <https://civilica.com/doc/1400327> [In Persian]
- A'laii, M., Farhadi, A., & Khosh Cheshm, S. A. (1398). Prioritizing factors affecting the success of aircraft maintenance programs using multi-criteria decision-making methods. *Journal of Aeronautical Engineering*. <https://civilica.com/doc/1571590> [In Persian]
- Astaneh, H. (1391). General aviation industry in Iran and the world. *Islamic Consultative Assembly Research Center*. [In Persian]
- Civil Aviation Organization. (1399). Comparative review report of the country's aviation safety status compared to the world. *Civil Aviation Organization of the Islamic Republic of Iran*. <https://caa.gov.ir/downloads/files/BzoMAXoahgsRyZD2024-01-29.pdf> [In Persian]
- Civil Aviation Organization. (1401). The aviation industry is a driver of countries' development. *Civil Aviation Organization of the Islamic Republic of Iran*. <https://caa.gov.ir/news-archive/show/VdRp2G> [In Persian]
- Civil Aviation Organization. (1404a). 18% increase in the country's air fleet. *Civil Aviation Organization of the Islamic Republic of Iran*. <https://www.caa.gov.ir/news-archive/show/VyXyzP> [In Persian]
- Civil Aviation Organization. (1404b). Transformation of Iran's aviation industry: An opportunity for balanced development and strategic investment. *Civil Aviation Organization of the Islamic Republic of Iran*. <https://caa.gov.ir/news-archive/show/PB6kYP> [In Persian]
- Civil Aviation Organization. (1404c). The necessity of developing the aviation industry through attracting investors and utilizing modern approaches. *Civil Aviation Organization of the Islamic Republic of Iran*. <https://www.caa.gov.ir/news-archive/show/PoynMr> [In Persian]
- Eskandari, A., Ebrahimi, K., & Yazdani, H. (2025). Validation of meta-synthesis research with emphasis on the ConQual validation method. *Methodology of Social Sciences and Humanities*, 31(123), 57–81. <https://doi.org/10.30471/mssh.2025.10872.2633> [In Persian]
- Fayazi, H., & Tohidi, A. (1403). Presenting maintenance strategies for aircraft based on the Total Productive Maintenance (TPM) approach. *Quarterly Journal of Interdisciplinary Strategic Knowledge Studies*. <https://civilica.com/doc/2233947> [In Persian]
- Ghasemi, M., Moghaddasi, M., Maleki, V., & Soveizi, M. (1398). Presenting an optimal maintenance policy in the aviation industry. *In Proceedings of the 18th Conference of the Aerospace Society of Iran*. <https://civilica.com/doc/1015346> [In Persian]
- Iranian Students' News Agency (ISNA). (1402). Latest status of the country's air fleet. *Iranian Students' News Agency*. <https://www.isna.ir/xdQLv9> [In Persian]
- Khani, S. (1404). Applications of the Internet of Things (IoT) in the aviation industry and its role in the transformation toward smart maintenance. *In Proceedings of the 24th National Conference on Applied Research in Electrical Engineering, Computer Engineering, and Medical Engineering*. <https://civilica.com/doc/2320305> [In Persian]

- Lotfi Jalal Abadi, M., & Hosseini, S. J. (2022). Maintenance cost management in airline companies. *Journal of Aeronautical Engineering*, 24(1), 97–110. <https://doi.org/10.22034/joae.2022.323854.1082> [In Persian]
- Malekpour, D., Naderi, A., Mahjub, H., & Ezzati, M. (2025). Development of a Cognitive Resilience Model in the Aviation Industry: Dimensions, Categories, and Themes. *Cognitive Psychology*, 13(3), e4998. [In Persian]
- Moradi, M., Ahmadvand, A., Samadi-Foroushani, M., Zarghami, H., & Nasiri, A. (2025). Mitigation of Aviation Accidents Based on Future Scientific and Technological Mega trends in the Aviation Industry: A Systematic Scoping Review. *Journal of Aeronautical Engineering*, 27(2), 33-48. <https://doi.org/10.22034/joae.2025.499251.1263> [In Persian]
- Mehri, V., & Maleki, M. H. (2025). A Framework for the Resilience of the Country's Aviation Industry. *Journal of Improvement Management*, 19(4), 34-60. <https://doi.org/10.22034/jmi.2025.522691.3206> [In Persian]
- Mehr News Agency. (1404). The average age of Iran's air fleet is 28 years. *Mehr News Agency*. <https://www.mehrnews.com/x38Fms> [In Persian]
- Mostafaei, P., & Hosseini, S. A. (2021). Qualitative content analysis of corporate social responsibility reports with emphasis on social stakeholders. *Empirical Research in Accounting*, 11(3), 79–112. <https://doi.org/10.22051/jera.2021.34649.2790> [In Persian]
- Rokneddini, S. A., & Andalib Ardakani, D. (2024). Analysis of Organizational Factors Affecting the Adoption of Industry 4.0 Technologies in Small and Medium-Sized Companies. *Journal of Industrial Management Perspective*, 14(2), 85-112. <https://doi.org/10.48308/jimp.14.2.85> [In Persian]
- Sharafat, A., Mohaghar, A., Karimi, F., & Davoudi, S. M. (1397). Designing a mechanism for selecting an appropriate maintenance strategy. *Industrial Management Perspective Journal*. <https://civilica.com/doc/1301580> [In Persian]