Journal of Business Strategies

Identifying Challenges and Ranking Strategies for the Implementation of Industry 4.0 Technologies

DOI: 10.22070/cs.2025.20714.1441

Dariush Mohamadi Zanjirani [1*] *and Mojtaba Khodsiani* [2]

1. *Associated Prof., Faculty of Administrative & Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. (Corresponding Author)*
2. *Master of Management Department, Faculty of Administrative & Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. (Email: m.khodsiani1@gmail.com)*

*Email: d.mohamadi@ase.ui.ac.ir

Received on: 08/05/2024

Accepted on: 21/07/2024

Journal of Business Strategies Shahed University Thirtyfirst Year No.24 Autumn & Winter 2024-25

Abstract

Aim and introduction: The Fourth Industrial Revolution, commonly known as Industry 4.0, has catalyzed significant transformations in production methodologies and maintenance systems. Nonetheless, the adoption and effective utilization of these technologies in Iran's steel industry encounter various challenges. This study aims to identify and analyze the obstacles associated with the implementation of Industry 4.0 technologies at the Isfahan Mobarakeh Steel Company, particularly focusing on the maintenance and repair department.

Methodology: In contrast to previous research, which primarily provided general overviews of Industry 4.0 technologies or evaluated organizational readiness for their implementation, this study specifically investigates the challenges associated with adopting these technologies at Mobarakeh Steel Company. Furthermore, it focuses on developing strategies to mitigate these identified obstacles. The study's statistical population for this study consists of ten experts from Mobarakeh Steel Company in Isfahan and its affiliated enterprises. Due to the specialized nature of the research topic, participants were selected through purposive sampling.

This research utilizes a combination of qualitative and quantitative data analysis methods, including the fuzzy Delphi method, the Best-Worst Method (BWM), and the Quality Function Deployment (QFD) matrix. The primary objective is to identify and prioritize critical challenges associated with digital transformation and to propose effective, practical strategies for addressing these issues. The identified challenges underscore the complexity of the transition and emphasize the need for targeted interventions.

Finding: In the initial phase of this research, 31 identified challenges were systematically categorized into nine primary dimensions. These dimensions encompass: technical and technological challenges; organizational and managerial challenges; human and educational challenges; economic and political challenges; data and cybersecurity challenges; environmental challenges; supply chain challenges; cultural and social challenges; and research and development challenges.

The research findings reveal that several obstacles significantly hinder the implementation of Industry 4.0 technologies within the maintenance and repair sector. Key challenges include outdated and inefficient infrastructure, elevated costs necessitating substantial investments, a shortage of skilled labor, limitations imposed by international sanctions, complexities in supply chain management, and cybersecurity concerns. In response to this analysis, 13 strategic initiatives were refined and prioritized to address these challenges. These strategies include localizing technologies, developing a digital transformation roadmap, fostering a culture of Industry 4.0 across all organizational levels, conducting small-scale

Journal of Business Strategies

Received on: 08/05/2024

Accepted on: 21/07/2024

Journal of Business Strategies Shahed University Thirtyfirst Year No.24 Autumn & Winter 2024-25

technology pilots, utilizing artificial intelligence for process management and optimization, and establishing collaborative networks among universities, research centers, and industries. The effectiveness of these strategies in mitigating the identified challenges was evaluated using the Quality House Matrix.

Discussion and Coclusion: Infrastructure, investment, human resources, and supply chain coordination challenges are significant obstacles to the digital transformation of the steel industry. Among these, outdated and inefficient infrastructure has been identified as the most pressing issue, underscoring the necessity for a comprehensive review of existing systems and the modernization of equipment. To keep pace with digital transformation, the steel industry must develop advanced infrastructure capable of supporting emerging technologies. Additionally, international sanctions and restricted access to advanced technologies present notable barriers to implementing Industry 4.0 technologies. These challenges have substantially limited access to modern equipment and software, thereby impeding progress toward digital transformation.

The technologies associated with Industry 4.0 heavily depend on modern tools and software, the production of which necessitates advanced knowledge and expertise. Consequently, the imposition of sanctions and dependence on foreign suppliers have posed significant challenges for domestic industries. This situation highlights the urgent need to localize technologies and strengthen domestic production capabilities as strategic priorities.

Additionally, the scarcity of skilled labor in emerging technologies, particularly in critical sectors such as maintenance and repair, presents a significant obstacle to the adoption of digital innovations. Given the complexity of Industry 4.0 technologies and the high levels of technical proficiency required, the lack of a specialized workforce limits organizations' ability to effectively implement these technologies. The strategies were analyzed using the Quality House Matrix, and their effectiveness in addressing the identified challenges was evaluated. The strategies identified in this research provide specific solutions to address the challenges associated with implementing Industry 4.0 technologies. Developing a strategic roadmap serves as a tool for precise and targeted guidance of digitalization processes, enabling organizations to allocate resources optimally and reduce confusion during implementation. Establishing a digital innovation ecosystem represents a crucial strategy that underscores the significance of collaboration among industries, academic institutions, and knowledge-based enterprises. Furthermore, by formulating and executing policies related to cyber defense and data security, organizations can effectively address both internal and external threats that may compromise the security of information systems and sensitive data, thereby mitigating potential risks and damages.

Keywords: Challenges, Digital Transformation, Industry 4.0 Technologies, Maintenance and Repair, Strategy.

نشریه علمی
راهبردهای
بازرگانی

(دانشور رشتار)

Journal of
Business
Strategies

مقاله پژوهشی
صفحه ۶۶-۴۹

● دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹
● پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۳۱

*Journal of
Business Strategies
Shahed University
Thirtyfirst Year
No.24
Autumn & Winter
2024-25*

**نشریه علمی
دانشگاه شاهد
سال سی و یکم – دوره ۲۱
شماره ۲۴
پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

شناسایی چالش‌ها و رتبه‌بندی راهبردهای پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴.۰ در صنعت فولاد کشور

نویسندگان: داریوش محمدی زنجیرانی [*۱] **، مجتبی خودسیانی** [۲]

۱. دانشیار دانشکده علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
(نویسنده مسئول)

۲. کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
(m.khodsiani1@gmail.com)

* Email: d.mohamadi@ase.ui.ac.ir

DOI: 10.22070/cs.2025۰.20714.1441

چکیده

انقلاب صنعتی چهارم یا صنعت ۴.۰، تحول عظیمی در روش‌های تولید و سیستم‌های نگه‌داری و تعمیرات ایجاد کرده است. پیاده‌سازی و بهره‌برداری از این فناوری‌ها در صنعت فولاد ایران با چالش‌های متعددی روبه‌روست که نیازمند تحلیل دقیق و شناسایی موانع و فرصت‌ها در راستای استفاده بهینه از این فناوری‌ها است.

پژوهش حاضر باهدف شناسایی و تحلیل چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴.۰ در شرکت فولاد مبارکه اصفهان، با تمرکز بر بخش نگه‌داری و تعمیرات انجام‌شده است. این مطالعه با بهره‌گیری از روش‌های تحلیل داده‌های کیفی و کمی، ازجمله دلفی فازی، روش بهترین-بدترین (BWM) و ماتریس خانه کیفیت (QFD)، درصدد است موانع کلیدی در مسیر تحول دیجیتال را شناسایی و اولویت‌بندی کرده و راهبردهای مؤثر و کاربردی برای غلبه بر این موانع ارائه دهد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد چالش‌هایی نظیر زیرساخت‌های قدیمی و ناکارآمد، هزینه‌های بالا و نیاز به سرمایه‌گذاری کلان، کمبود نیروی انسانی متخصص، محدودیت‌های ناشی از تحریم‌های بین‌المللی، پیچیدگی زنجیره تأمین و نگرانی‌های امنیت سایبری ازجمله موانع اصلی پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴.۰ در این بخش به شمار می‌روند. در ادامه، ۱۳ راهبرد کلیدی برای مقابله با این چالش‌ها پالایش و رتبه‌بندی شده است که ازجمله آن‌ها می‌توان به بومی‌سازی فناوری‌ها، تدوین نقشهٔ راه تحول دیجیتال، ترویج فرهنگ صنعت ۴.۰ در سطوح مختلف سازمان، اجرای پروژه‌های پایلوت در مقیاس کوچک، بهره‌گیری از هوش مصنوعی برای مدیریت و بهینه‌سازی فرایندها و ایجاد شبکه‌ای از دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و صنایع اشاره کرد. این راهبردها با استفاده از ماتریس خانه کیفیت تحلیل‌شده و میزان تأثیر هر یک بر رفع چالش‌های شناسایی‌شده، محاسبه گردیده است.

کلیدواژه‌ها: استراتژی، تحول دیجیتال، چالش‌های پیاده‌سازی صنعت ۴.۰، نگه‌داری و تعمیرات، فناوری‌های صنعت ۴.۰.

مقدمه

انقلاب صنعتی چهارم، به‌عنوان یک انقلاب فناورانه، ابعاد اقتصادی، اجتماعی و صنعتی جوامع را به‌صورت بنیادین دگرگون کرده است. این تحول با بهره‌گیری از فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا[1]، داده‌های کلان[2]، هوش مصنوعی[3]، یادگیری ماشین[4]، رایانش ابری[5] و تولید افزایشی،[6] مسیر صنایع را به‌سوی دیجیتالی شدن و هوشمندسازی سوق داده است. این تحول، تأثیر شگرفی بر زنجیره‌های تأمین، مدل‌های کسب‌وکار و تعاملات اقتصادی داشته و صنایع را به بازنگری در استراتژی‌ها و فرایندهای خود واداشته است (بهادری[7] و همکاران، ۱۳۹۹).

به‌طورکلی انقلاب صنعتی چهارم فرصت‌های گسترده‌ای برای اتصال، هوشمندسازی و دیجیتالی‌سازی در اختیار صنعت آهن و فولاد قرار داده است. صنعت فولاد، به‌عنوان یکی از بخش‌های کلیدی و زیربنایی اقتصاد جهانی و ایران، نقشی حیاتی در پذیرش و انطباق با فناوری‌های صنعت ۴.۰ دارد. با توجه به رشد اقتصاد جهانی، افزایش تقاضای فولاد و ظهور فناوری‌های نوین، می‌توان چشم‌اندازی روشن برای آینده این صنعت، به‌ویژه در عصر انقلاب صنعتی چهارم، متصور بود.

فناوری‌های صنعت ۴.۰ این امکان را فراهم می‌کنند که فرایندهای تولید فولاد به‌صورت هوشمندتر، دقیق‌تر و سریع‌تر انجام شوند؛ به‌ویژه، تحلیل داده‌های کلان و فناوری‌های پیش‌گویانه می‌توانند در مدیریت نگه‌داری و تعمیرات، کاهش خرابی تجهیزات و بهینه‌سازی مصرف انرژی نقش کلیدی ایفا کنند (بهادری و همکاران، ۱۳۹۹؛ انصاری[8] و همکاران، ۱۴۰۲). بااین‌حال، پیش از ورود به مسیر دیجیتالی شدن، ضروری است ارزیابی دقیقی از مسیر پیش‌رو و نیازهای آن صورت گیرد (رحمانی[9] و همکاران، ۱۴۰۰). هرچند جنبه‌های مختلف صنعت ۴.۰ در پژوهش‌های متعدد بررسی‌شده است، اما مطالعات مرتبط با ارزیابی چالش‌های اجرای صنعت ۴.۰ توجه کمی را به خود اختصاص داده است. در همین راستا، سؤال اصلی پژوهش حاضر این است که پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴.۰ در صنعت فولاد کشور با چه چالش‌ها و موانعی در بخش نگه‌داری و تعمیرات مواجه است و چه راهبردهایی به ترتیب اهمیت برای رفع این موانع مناسب هستند؟

مبانی نظری

دستیابی جوامع به مجموعه‌ای از فناوری‌های نوین، موجب شکل‌گیری «چهارمین انقلاب صنعتی» شده است. پژوهشگران و متخصصان به دلیل مزایای گسترده این تحول برای سازمان‌های تولیدی، توجه ویژه‌ای به صنعت ۴.۰ نشان داده‌اند. این انقلاب با ویژگی‌هایی همچون هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، بلاک‌چین، رایانش ابری، کلان داده‌ها، خودران‌ها، محاسبات کوانتومی و درنوردیدن مرزهای دیجیتالی، بیولوژیکی و دنیای فیزیکی از طریق ایجاد شبکه‌های هوشمند و یکپارچه (اتصال سیستم‌های انبارداری، منابع انسانی و رباتیک) همراه است. در سناریوی کسب‌وکار فعلی، رقابت شدید و رشد فناوری، نحوهٔ عملکرد سازمان‌ها را تغییر داده است (کشاورز، ۲۰۲۳). بر این اساس، راه فراروی صنعت ازجمله صنعت فولاد، استفاده از چنین فناوری‌هایی به‌منظور بهبود فرایندهای تولید، کسب‌وکار و صرفه‌جویی‌های مالی، افزایش بهره‌وری و ارزش افزایی در زنجیرهٔ تولید و تأمین است (خرمشاهی، ۲۰۲۱).

انقلاب صنعتی چهارم پدیده‌ای در حال وقوع است که به‌سرعت در زندگی روزمره بشر تجربه می‌شود، هرچند ابعاد و گستره کامل آن هنوز برای بسیاری آشکار نشده است. اصطلاح «صنعت ۴.۰» نخستین بار در سال ۲۰۱۱ از سوی دولت آلمان در قالب پروژه‌ای ملی مطرح شد و در همان سال در نمایشگاه هانوفر[10] به‌صورت عمومی معرفی گردید. این انقلاب به‌ویژه با گسترش «واقعیت‌های مجازی[11]» همراه است که امکان کنترل خودکار و از راه دور فرایندهای تولیدی را که در انقلاب‌های صنعتی پیشین شکل‌گرفته بودند، فراهم می‌سازد. فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، رابط‌های انسان – ماشین،

1. Internet of Things (IoT)
2. Big Data
3. Artificial intelligence (AI)
4. Machine Learning
5. Cloud Computing
6. Additive Manufacturing
7. Bahadori et al.
8. Ansari et al.
9. Rahmani et al.
10. Hannover Messe
11. Virtual Reality

رباتیک و سیستم‌های سایبری-فیزیکی[1] که ترکیب دنیای واقعی و مجازی را ممکن می‌کنند، از مهم‌ترین مؤلفه‌های این دوره از انقلاب صنعتی به شمار می‌روند. این فناوری‌ها به ماشین‌آلات و تجهیزات امکان می‌دهند تا به‌صورت خودمختار و مستقل از انسان‌ها با یکدیگر ارتباط برقرار کنند.

صنعت ٤.٠ که به‌عنوان انقلاب صنعتی چهارم نیز شناخته می‌شود، نوعی تحول دیجیتال گسترده در فرایندهای تولیدی و صنعتی است که با تکیه بر فناوری‌های نوین، به دنبال افزایش کارایی، کیفیت و انعطاف‌پذیری در تولیدات است. هدف اصلی صنعت **٤.٠** ایجاد کارخانه‌ای هوشمند است که در آن ماشین‌آلات، سیستم‌ها و فرایندهای تولید، بدون نیاز به دخالت مستقیم انسان و از طریق تعامل متقابل، به‌طور خودکار عمل می‌کنند. در این چارچوب، صنعت **٤.٠** پیوند میان فناوری‌های فیزیکی و دیجیتال را به‌گونه‌ای برقرار می‌سازد که ماشین‌ها و سیستم‌ها قادر به برقراری ارتباط، تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری خودکار باشند. در کنار اینترنت اشیاء، فناوری‌های هوش مصنوعی و رباتیک نیز نقش کلیدی در صنعت **٤.٠** ایفا می‌کنند. ربات‌ها و حسگرهای هوشمند قادرند تغییرات جزئی در فرایند تولید را شناسایی کرده و در لحظه واکنش مناسب نشان دهند. این سیستم‌های خودکار و هوشمند موجب افزایش سرعت، دقت تولید و کاهش خطاها می‌شوند (Luthra & Mangla , 2018).

صنعت **٤.٠**، تأثیرات قابل‌توجهی بر افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت در صنایع مختلف دارد. بااین‌حال، پیاده‌سازی این فناوری‌ها با چالش‌هایی همچون نبود زیرساخت‌های مناسب، پیچیدگی فنی، هزینه‌های بالا، مقاومت سازمانی، کمبود مهارت در نیروی کار، وابستگی به زنجیره تأمین بین‌المللی و افزایش خطرات سایبری مواجه است. همچنین، خلأهای قانونی و استانداردهای ناهماهنگ از دیگر موانع اساسی محسوب می‌شوند. برای غلبه بر این چالش‌ها، راهکارهایی مانند تدوین نقشهٔ راه استراتژیک، توسعهٔ مهارت‌های کارکنان، تأمین مالی پایدار، استفاده از مدل‌های مشارکت عمومی-خصوصی و بهره‌گیری از همکاری‌های بین‌المللی مورد تأکید قرارگرفته است. در مسیر استقرار و بهره‌برداری از نسل چهارم صنعت، چندین مانع اساسی وجود دارد که می‌تواند بر موفقیت این تحولات تأثیر بگذارد. این چالش‌ها شامل مسائل فنی، اقتصادی و اجتماعی هستند که در مطالعات پیشین احصا شده‌اند. در همین رابطه می‌توان به چالش‌هایی نظیر حفظ امنیت داده‌ها (محمود زاده و همکاران[2]، ۱۳۹۸)، قابلیت اطمینان و پایداری در ارتباطات ماشین به ماشین (M2M)[3] (Javaid et al, 2024)، حفظ یکپارچگی فرایندهای تولید (گودینی[4]، ۱۳۹۹)، مسائل اجتماعی و چالش‌های نیروی انسانی (Santos et al., 2017) ، سرمایه‌گذاری و نگرانی‌های مالی (Javaid et al., 2024)، نگرانی‌های حریم خصوصی و داده‌ها (Lu et al, 2017)[5]، امنیت فناوری اطلاعات و تهدیدات سایبری (Santos et al., 2017) اشاره کرد.

پیشینهٔ پژوهش

پژوهش‌های متعددی به بررسی ابعاد مختلف انقلاب صنعتی **٤.٠** پرداخته‌اند. تحقیقات اخیر با تمرکز بر چالش‌ها و راهبردهای تحول‌آفرین در صنعت **٤.٠**، افق‌های جدیدی را در حوزه‌های زنجیره تأمین و مدیریت صنعتی گشوده‌اند. گرمسیری و همکاران (١٤٠٤) در مطالعه‌ای، میزان آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی را در سازگاری با فناوری‌های صنعت **٤.٠** ارزیابی کردند. روش‌شناسی این پژوهش، شامل دو مرحلهٔ شناسایی شاخص‌های ارزیابی میزان آمادگی و خوشه‌بندی شرکت‌های پتروشیمی با استفاده از الگوریتم PSO-Kmeans بود. نتایج نشان داد که ٤٢ شرکت در خوشهٔ اول با عملکرد پایین و ٣٦ شرکت در خوشهٔ دوم با عملکرد متوسط قرار دارند. دباغ و همکاران (١٤٠٣) نیز پانزده چالش اصلی تأثیرگذار نقش فناوری‌های صنعت **٤.٠** در عملیات اخلاقی و اقتصاد دایره‌ای صنایع کوچک و متوسط را شناسایی کردند. از مهم‌ترین چالش‌ها می‌توان به کمبود آگاهی از صنعت **٤.٠**، ضعف زیرساخت‌های فناوری اطلاعات، کمبود نیروی کار ماهر، آگاهی پایین نسبت به سیاست‌های مرتبط و پشتیبانی ناکافی مدیریت اشاره کرد.

علی‌اکبری و همکاران[6](١٤٠١) با شناسایی شانزده مانع اصلی ازجمله نبود حمایت دولتی و تحریم‌ها، موانع به‌کارگیری

1. Cyber-Physical Systems
2. Mahmoudzadeh et al
3. Machine-to-Machine
4. Godini
5. Lu et al.
6. Aliakbari et al.

اینترنت اشیا در صنایع کوچک و متوسط را بررسی کردند. همچنین، عبدالعلی‌زاده و سقفی[1] (۱۴۰۰) با استفاده از روش تاپسیس و سوارای فازی، استراتژی‌های انقلاب صنعتی **۴.۰** در صنعت خودرو را اولویت‌بندی کردند. نتایج نشان داد که معیارهای فناوری، عملیات و مشتری از اهمیت بالایی برخوردارند و راهبردهایی همچون بهینه‌سازی عملیات و توسعه مدل‌های نوین کسب‌وکار در رتبه‌های برتر قرار دارند. بهادری و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی به بررسی فرصت‌ها و چالش‌های صنعت فولاد ایران در مواجهه با انقلاب صنعتی چهارم پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که کمبود زیرساخت‌های دیجیتال، فقدان نیروی کار ماهر و چالش‌های سیاست‌گذاری از اصلی‌ترین موانع پیش‌روی این صنعت در ایران به شمار می‌آیند.

انریکز رودریگز[2] (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان «**پیاده‌سازی نگه‌داری و تعمیرات دیجیتال برای کاهش زمان مدیریت ارسال قطعات یدکی در یک شرکت حفاری الماسه**» به بررسی تأثیر فناوری‌های دیجیتال بر بهبود فرایندهای نگه‌داری و لجستیک پرداخت. مقبول و همکاران[3] (۲۰۲۳) در پژوهش خود با عنوان «**فناوری‌های نوظهور صنعت ۴.۰ و اینترنت اشیا (IoT)در صنعت تولید غنا: پایداری، چالش‌های پیاده‌سازی و مزایا**» نشان دادند که چالش‌هایی نظیر نبود زیرساخت‌های دیجیتال، کمبود نیروی کار متخصص و هزینه‌های بالای پیاده‌سازی از موانع اصلی محسوب می‌شوند. پراوز[4] (۲۰۱۹) در پژوهشی به بررسی موانع و فرصت‌های مرتبط با استقرار فناوری‌های صنعت **۴.۰** در شرکت‌های کوچک و متوسط ژاپنی پرداخت. این مطالعه بیانگر آن بود که هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری، کمبود مهارت‌های فنی در نیروی کار، محدودیت‌های زیرساختی و مقاومت سازمانی در برابر تغییر، از موانع اصلی پذیرش این فناوری‌ها هستند. خان و توروفسکی[5] (۲۰۱۶) در پژوهشی با عنوان «**مروری بر چالش‌های فعلی در صنعت تولید و آمادگی برای صنعت ۴.۰**» مشکلات اساسی صنعت تولید و اقدامات لازم برای تطبیق با فناوری‌های صنعت **۴.۰** را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که نبود زیرساخت‌های دیجیتال، کمبود مهارت‌های فنی، هزینه‌های بالای فناوری‌های نوین و مقاومت در برابر تغییرات سازمانی از مهم‌ترین چالش‌ها هستند. ژو و همکاران[6] (۲۰۱۵) در مقاله‌ای با عنوان «صنعت **۴.۰**: به‌سوی فرصت‌ها و چالش‌های صنعتی آینده» ظرفیت‌ها و موانع تحول‌آفرین این صنعت را موردبررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که نیاز به زیرساخت‌های فناوری پیشرفته، هزینه‌های بالا، استانداردسازی و امنیت سایبری از موانع اصلی پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت **۴.۰** به شمار می‌روند.

پژوهش حاضر، برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً به بررسی کلی فناوری‌های صنعت **۴.۰** یا ارزیابی آمادگی سازمان‌ها پرداخته‌اند، به‌طور خاص بر شناسایی چالش‌های پیاده‌سازی این فناوری‌ها در شرکت فولاد مبارکه و اولویت‌بندی استراتژی‌های رفع این موانع متمرکز است.

روش‌شناسی پژوهش

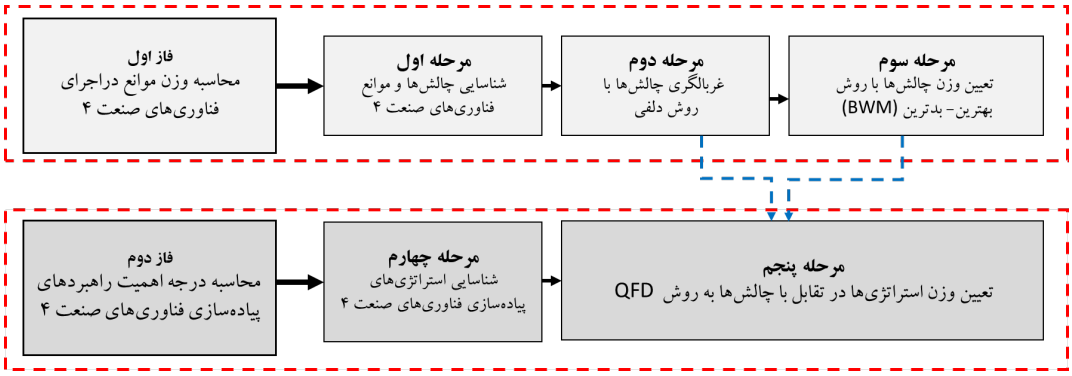
به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش و پاسخ به سؤالات آن، یک چارچوب منظم و منطقی برای اجرای مراحل مختلف پژوهش تدوین‌شده است. این چارچوب در شکل ۱ ارائه‌شده است.

در ابتدا، برای شناسایی چالش‌ها و راهبردهای موجود، از روش مرور نظام‌مند ادبیات، اجماع نظرات کارشناسان و متخصصان صنعت فولاد و روش دلفی فازی استفاده شد. در مرحله بعد، از روش بهترین–بدترین (BWM) برای تعیین درجهٔ اهمیت و رتبه‌بندی موانع شناسایی‌شده بهره گرفته شد. درنهایت، با استفاده از تکنیک خانه کیفیت (HOQ)، راهبردهای مقابله با چالش‌های شناسایی‌شده وزن‌دهی و اولویت‌بندی شدند تا بهترین راهکارهای اجرایی برای رفع موانع پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت **۴.۰** در صنعت فولاد پیشنهاد شود.

جامعهٔ آماری این پژوهش شامل ۱۰ نفر از مدیران و کارشناسان منتخب در بخش تعمیرات و نگه‌داری شرکت فولاد مبارکه اصفهان و شرکت‌های وابسته به آن است. این افراد در پروژه تحول دیجیتال این شرکت –که به‌عنوان تنها پروژه تحول دیجیتال

1. Abdolalizadeh Ardebili & Saghafi
2. Enriquez Rodriguez
3. Maqbool
4. Prause
5. Khan & Turowski
6. Zhou

کشور شناخته می‌شود- مسئولیت‌های مستقیمی در زمینهٔ پذیرش فناوری‌های نسل چهارم بر عهده داشتند. با توجه به ماهیت تخصصی موضوع و اهمیت قضاوت اعضای گروه خبره، این افراد از طریق نمونه‌گیری هدفمند انتخاب‌شده‌اند. جنبه نوآورانه این پژوهش در استفاده ترکیبی از روش‌های نوین مانند دلفی فازی، تکنیک بهترین بدترین (BWM) و خلنه کیفیت (QFD) برای شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌ها و راهبردها در راستای کاهش موانع و تسهیل فرایند تحول دیجیتال در صنعت فولاد است. این روش‌ها به‌طور خاص به تحلیل چالش‌ها و فرصت‌ها در صنعت فولاد پرداخته و فرایندهای صنعتی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را با بهره‌گیری از مدل‌های فازی و تصمیم‌گیری پیچیده بهینه می‌سازند.



شکل ۱. مراحل انجام پژوهش

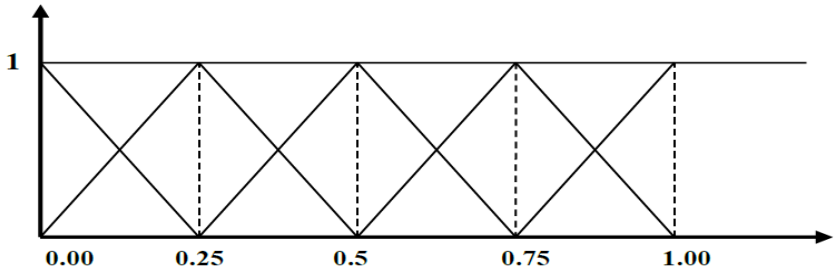
روش‌ها و تکنیک‌های مورداستفاده در پژوهش به شرح زیر هستند:

روش دلفی فازی: دلفی فازی یک تکنیک مبتنی بر اصول منطق فازی و سیستم‌های استنتاج فازی است که برای دستیابی به اجماع میان دیدگاه‌های خبرگان به کار می‌رود. این روش با استفاده از اعداد و محاسبات فازی، نظرات و ارزیابی‌های خبرگان را با دقت بالاتری مدل‌سازی و بازنمایی می‌کند. در این تکنیک، دیدگاه‌های خبرگان، به‌صورت عبارات کلامی گردآوری می‌شود و سپس به طیف‌های فازی تبدیل می‌گردند. در اجرای روش دلفی فازی برای غربالگری، ابتدا باید طیف فازی مناسبی برای فازی سازی عبارات کلامی پاسخ‌دهندگان ایجاد شود. برای این منظور می‌توان از روش‌های توسعه طیف فازی یا طیف‌های فازی رایج بهره گرفت (**داودی و همکاران**[1]، **۱۳۹۸**). به‌عنوان‌مثال، متغیرهای کلامی و اعداد فازی متناظر برای مقیاس پنج نقطه‌ای و تابع عضویت آن‌ها که برای تعیین درجه اهمیت چالش‌ها به کار می‌روند، در جدول ۱ و شکل ۲ ارائه‌شده‌اند.

جدول ۱، مقیاس تبدیل عبارات کلامی به اعداد فازی

متغیر کلامی	مخفف عبارات	اعداد فازی
خیلی زیاد	VH	(۰/۸،۰/۹،۱)
زیاد	H	(۰/۵،۰/۷، ۰/۹)
متوسط	M	(۰/٤،۰/۵، ۰/۷)
پایین	L	(۰/۱،۰/۳، ۰/۵)
خیلی پایین	VL	(۰/۰،۰/۱، ۰/۲)

1. Davoudi et al.



شکل ۲. تابع عضویت اعداد فازی ۵ نقطه

پس از تعیین یا طراحی طیف فازی مناسب، نظرات کارشناسان با استفاده از متغیرهای زبانی فازی جمع‌آوری می‌شود. در مرحله بعد، این نظرات باید تجمیع شوند. برای تجمیع فازی دیدگاه‌ها، روش‌های متعددی وجود دارد. درصورتی‌که نظرات کارشناسان به‌صورت اعداد فازی مثلثی نمایش داده شوند، ساده‌ترین روش برای محاسبه میانگین فازی، استفاده از رابطه زیر است:

$$F_{AVE}=\frac{\sum l}{n},\frac{\sum m}{n},\frac{\sum lu}{n}$$

پس از تجمیع فازی نظرات کارشناسان، مقادیر حاصل باید فازی زدایی شوند. در روش‌های مختلفی که با رویکرد فازی انجام می‌شود، محقق درنهایت مقادیر فازی نهایی را به عدد واضح و قابل‌فهم تبدیل می‌کند. به‌طورمعمول، تجمع اعداد فازی مثلثی و ذوزنقه‌ای را می‌توان با یک مقدار واضح خلاصه کرد.

تکنیک بهترین-بدترین (BWM[1]): این روش بر اساس مقایسات زوجی و با تعیین دو معیار کلیدی (بهترین و بدترین) به محاسبه وزن معیارها می‌پردازد. این تکنیک با بهره‌گیری از ساختاری ریاضی، قادر است با دقت بالا و درعین‌حال با تعداد مقایسات کمتر نسبت به روش‌های قدیمی‌تر، وزن معیارها یا گزینه‌های موجود را محاسبه کند. در این روش، تصمیم‌گیرنده بهترین و بدترین شاخص‌ها را تعیین می‌کند و سپس مقایسات زوجی میان هر یک از این دو شاخص (بهترین و بدترین) و سایر شاخص‌ها انجام می‌شود. در ادامه، با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر مسئله حداکثر–حداقل، وزن‌های مربوط به شاخص‌های مختلف محاسبه می‌شود. علاوه بر این، فرمولی در این روش ارائه‌شده که برای ارزیابی میزان ناسازگاری مقایسات و اطمینان از اعتبار آن‌ها به کار می‌رود. مراحل اصلی این روش به شرح زیر است:

الف. مشخص کردن میزان عملکرد بهترین معیار در برابر سایر معیارها با استفاده از اعداد ۱ تا ۹. نتایج بهترین معیار نسبت به بقیه معیارها ممکن است به‌صورت زیر باشد:

$$A_B=\{a_{B1},a_{B2},a_{B3},....,a_{Bn}\}$$

نماد a_{Bj} ارجحیت معیار بهترین را نسبت به معیار j ام نشان می‌دهد. بدیهی است که $a_{BB}=1$ خواهد بود.

ب. مشخص کردن عملکرد همه معیارها نسبت به بدترین معیار با استفاده از اعداد ۱ تا ۹. بردار نتایج مقایسات معیارها نسبت به بدترین معیار می‌تواند به شکل زیر باشد:

$$A_W=\{a_{1W},a_{2W},a_{3W},....,a_{nW}\}^T$$

نماد a_{jW} ارجحیت معیار j ام را نسبت به بدترین معیار نشان می‌دهد. بدیهی است که $a_{WW}=1$ خواهد بود.

1. Best-worst Method

ج. تعیین بردار بهینه وزن‌ها $\{W_1^*, W_2^*, W_3^*, \dots, W_n^*\}$، وزن مطلوب برای معیارها جایی است که برای هر جفت $\frac{W_B}{W_J}$ و $\frac{W_J}{W_W}$ روابط به‌صورت $a_{jW} = \frac{W_J}{W_W}$ و $a_{Bj} = \frac{W_B}{W_J}$ باشد.

برای برآوردن این شـــرایط باید راه‌حلی پیدا شـــود که در آن حداکثر اختلاف مطلق بین $\left|\frac{W_B}{W_J} - a_{Bj}\right|$ و $\left|\frac{W_J}{W_W} - a_{jW}\right|$ برای همه j ها به حداقل برسد. با توجه به غیر منفی بودن $(W_j \geq 0)$ و شرایط مجموع وزن‌ها $\sum W_j = 1$ مسئله زیر مطرح می‌شود:

$$min\ max_j\{\left|\frac{W_B}{W_J} - a_{Bj}\right|, \left|\frac{W_J}{W_W} - a_{jW}\right|\}$$

$$st.$$

$$\sum W_j = 1$$

$$W_j \geq 0 \quad for\ all\ j$$

مسئله بالا را می‌توان به مسئله زیر تبدیل کرد:

$$\min \varepsilon$$

$$st.$$

$$\left|\frac{W_B}{W_J} - a_{Bj}\right| \leq \varepsilon \quad for\ all\ j$$

$$\left|\frac{W_J}{W_W} - a_{jW}\right| \leq \varepsilon \quad for\ all\ j$$

$$\sum W_j = 1$$

$$W_j \geq 0 \quad for\ all\ j$$

با حل مسئله بالا وزن‌های بهینه $\{W_1^*, W_2^*, W_3^*, \dots\dots, W_n^*\}$ و ε^* به دست می‌آید. نگارش مدل ریاضی (برنامه‌ریزی خطی) طبق روابط بالا و توسط نرم‌افزار اکسل[1] نسخه ۲۰۱۹ حل گردید.

ماتریس خانه کیفیت (HoQ[2]): خانه کیفیت یک ابزار نوین و کارآمد در مهندسی کیفیت است که به سازمان‌ها کمک می‌کند تا نیازهای مشتریان را به ویژگی‌های فنی و طراحی محصول تبدیل کنند. این ابزار برای تضمین اینکه محصول نهایی تمامی نیازها و خواسته‌های مشتریان را برآورده سازد، مورداستفاده قرار می‌گیرد. خانه کیفیت با استفاده از ماتریس‌های مختلف، ارتباط بین ویژگی‌های محصول و نیازهای مشتری را به‌صورت ساختاریافته و دقیق نشان می‌دهد.

خانه کیفیت به‌طورمعمول با مدل چهار ماتریسی شناخته می‌شود. این مدل به‌عنوان اساس و هسته اصلی QFD[3]، از چهار ماتریس مختلف استفاده می‌کند که در خانه کیفیت به‌وضوح قابل‌شناسایی است. این چهار ماتریس در خانه کیفیت عبارت‌اند از: ماتریس نیازهای مشتری (What's)، ماتریس ویژگی‌های فنی (How's)، ماتریس روابط و ماتریس اولویت‌ها. در حقیقت خانه کیفیت ماتریسی است که در آن رابطه میان چه‌ها ((what's و چگونه‌ها (How's) مشخص می‌گردد.

برای تعیین ارتباط میان چالش‌ها و راهبردهای پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت **٤.٠**، تدوین پرسش‌نامه ماتریس خانه کیفیت تدوین شد، به‌طوری‌که چالش‌ها به‌عنوان WHATsها و استراتژی‌ها به‌عنوان HOWs ها در ماتریس خانه کیفیت درج‌شده و این پرسش‌نامه در اختیار خبرگان قرار گرفت تا میزان اهمیت آن‌ها در طیف سه‌تایی (۱، ۳ و ۹) سنجیده شود. پس از تلفیق نظرات کارشناسان در یک ماتریس کلی، وزن راهبردها از رابطه زیر حاصل گردید:

1. Excel Solver
2. House of Quality
3. Quality function deployment

$$ws_j = \frac{1}{k} \times \left[\left(s_{j1} \times wc_1\right) + \left(s_{j2} \times wc_1\right) + \cdots + \left(sjn \times wc_k\right) \right)$$

تعداد چالش‌ها = k

تعداد راهبردها = n

وزن چالش kام حاصل از روش بهترین-بدترین= wc_k

میزان اهمیت راهبرد jام در تقابل با چالش k ام= s_{jk}

یافته‌ها

بر اساس مراحل انجام پژوهش و به‌منظور شناسایی چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ٤.٠، از روش مرور سامانمند ادبیات و چارچوب نظری استفاده شد. در این مرحله، ۳۱ چالش شناسایی گردید که در ۹ بُعد اصلی طبقه‌بندی شدند و عبارت‌اند از: چالش‌های فنی و فنّاورانه، چالش‌های سازمانی و مدیریتی، چالش‌های انسانی و آموزشی، چالش‌های اقتصادی و سیاسی، چالش‌های داده‌ها و امنیت سایبری، چالش‌های محیط زیستی، چالش‌های زنجیره تأمین، چالش‌های فرهنگی و اجتماعی و چالش‌های تحقیق و توسعه. به‌منظور پالایش و تائید چالش‌های شناسایی‌شده توسط خبرگان پژوهش، پرسش‌نامه‌های دلفی فازی طراحی و توزیع گردید. در مرحلهٔ نخست، نظرات خبرگان به‌صورت عبارات کلامی جمع‌آوری و بر اساس جدول ۱ به اعداد فازی مثلثی تبدیل شد. سپس میانگین نظرات محاسبه و با استفاده از فرایند فازی‌زدایی به مقادیر قطعی تبدیل گردید. در این پژوهش، حد آستانه پذیرش چالش‌ها برابر با عدد ۰.۷ در نظر گرفته شد. بر این اساس، چالش‌هایی که مقدار فازی‌زدایی‌شده آن‌ها بیشتر یا مساوی با ۰.۷ بود، به‌عنوان چالش‌های تأییدشده پذیرفته شدند و سایر چالش‌ها با مقدار کمتر از ۰.۷ از فرایند نهایی حذف گردیدند. همچنین، فرایند غربالگری چالش‌ها توسط خبرگان، در سه مرحله انجام گرفت و درنهایت، چالش‌های نهایی مطابق جدول ۳ استخراج شدند.

جدول ۳. چالش‌های نهایی پیاده‌سازی صنعت ٤.٠ در شرکت فولاد مبارکه

ابعاد چالش‌ها	چالش‌ها و موانع پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ٤.٠	نماد
چالش‌های زیرساختی و فنی	زیرساخت‌های قدیمی و ناکارآمد و مشکلات یکپارچه‌سازی با فناوری‌های جدید	C۱
	حجم عظیم داده‌ها و چالش‌های مدیریت آن	C۲
	فقدان شرکت‌های توانمند داخلی	C۳
چالش‌های منابع انسانی	کمبود نیروی کار ماهر با تخصص در فناوری‌های نوین	C٤
	مقاومت در برابر تغییر در سطوح مختلف سازمان	C٥
	نیاز به آموزش مستمر برای کارکنان	C٦
چالش‌های اقتصادی و مالی	نیاز به سرمایه‌گذاری کلان برای ارتقاء تجهیزات و زیرساخت‌ها (ارتباطی، ذخیره‌سازی و محاسباتی)	C۷
چالش‌های امنیتی	خطر حملات سایبری و نگرانی در مورد امنیت داده‌ها و اطلاعات حساس	C۸
چالش‌های سیاسی	تحریم‌های بین‌المللی و محدودیت در دسترسی به تجهیزات و نرم‌افزارهای مدرن	C۹
چالش‌های زنجیره تأمین	پیچیدگی و گستردگی زیاد زنجیره تأمین فولاد	C۱۰

در مرحلهٔ بعد، با بهره‌گیری از روش بهترین-بدترین و داده‌های جمع‌آوری‌شده از پرسش‌نامهٔ دوم که توسط خبرگان تکمیل شد، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی تدوین گردید. این مدل در نرم‌افزار اکسل پیاده‌سازی و حل شد و وزن هر یک از چالش‌ها مشخص گردید. در ادامه، برای تعیین وزن نهایی معیارها، میانگین هندسی اوزان به‌دست‌آمده، محاسبه‌شده و به‌عنوان وزن نهایی برای هر معیار در نظر گرفته شد. وزن نهایی معیارها، مطابق جدول ٤ محاسبه شده است.

جدول ٤. درجه اهمیت چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ٤

نماد	عنوان چالش‌ها و موانع پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ٤.٠	وزن
C۱	حجم عظیم داده‌ها و چالش‌های مدیریت آن	۰/۰۷۲
C۲	نیاز به سرمایه‌گذاری کلان برای ارتقا تجهیزات و تهیه زیرساخت‌های ارتباطی، ذخیره‌سازی و محاسباتی	۰/۰۷۲
C۳	پیچیدگی و گستردگی زیاد زنجیره تأمین فولاد	۰/۱۲۱
C٤	فقدان شرکت‌های توانمند داخلی	۰/۰۵۲
C۵	کمبود نیروی کار ماهر با تخصص در فناوری‌های نوین	۰/۰۵۲
C٦	نیاز به آموزش مستمر برای کارکنان	۰/۰۲٦
C۷	خطر حملات سایبری و نگرانی در مورد امنیت داده‌ها و اطلاعات حساس	۰/۰۵۲
C۸	تحریم‌های بین‌المللی و محدودیت دسترسی به تجهیزات و نرم‌افزارهای مدرن	۰/۱۸۱
C۹	زیرساخت‌های قدیمی و ناکارآمد و مشکلات یکپارچه‌سازی با فناوری‌های جدید	۰/۲۹۹
C۱۰	مقاومت در برابر تغییر در سطوح مختلف سازمان	۰/۰۷۲

در ادامه، به شناسایی راهبردهای مناسب برای رفع موانع و تسهیل فرایند پیاده‌سازی پرداخته شد. در این مرحله، با مرور چارچوب نظری و بررسی تجربیات موفق جهانی، همچنین با بهره‌گیری از نظرات خبرگان و متخصصان حوزهٔ فناوری‌های نوین و صنعت فولاد، راهبردهای مقابله با چالش‌های شناسایی‌شده تدوین گردید. هدف از شناسایی این راهبردها، ارائه نقشهٔ راه عملی برای تسهیل پذیرش و اجرای فناوری‌های صنعت **٤.٠** بود. جدول **۵**، راهبردهای اولیه را نمایش می‌دهد.

جدول ۵. راهبردهای اولیه برای رفع موانع پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ٤.٠

استراتژی‌ها (راهبردها)	منابع
ارتباطات (ICT[1]) با همکاری دولت و بخش خصوصی	اشرفی، ۱٤۰۲؛ دفتریان، ۱٤۰۰
ایجاد پارک‌های فناوری صنعتی برای ارائه خدمات زیرساختی به شرکت‌ها	امرائی، ۱٤۰۱؛ زاهد و سخی، ۱۳۹۵
برگزاری دوره‌های آموزشی و کارگاه‌های عملی برای ارتقای مهارت کارکنان	نوذری و همکاران، ۱٤۰۰؛ Santos et al., 2017
به‌کارگیری مدل‌های نگه‌داری و تعمیرات پیش‌بینانه (PdM[2]) برای کاهش هزینه‌های غیرضروری	دفتریان، ۱٤۰۰؛ Tortorella, 2024
استفاده از پلتفرم‌های یکپارچه برای مدیریت داده‌ها و فناوری‌های مرتبط	اشرفی، ۱٤۰۲؛ Gubbi et al., 2013
اجرای مرحله‌ای و آزمایشی (پایلوت فناوری) در صنایع کوچک قبل از اجرای طرح‌های واقعی	امرائی، ۱٤۰۱؛ Munsamy et al., 2024
اشاعه صنعت ٤.٠ در تمام سطوح سازمانی و ایجاد نگرش مثبت برای سازگاری با انقلاب صنعتی جدید	خرمشاهی، ۱٤۰۰؛ Schwab, 2018
استفاده از شبیه‌سازی برای پیش‌بینی و کاهش مشکلات در مراحل انتقال فناوری	امرائی، ۱٤۰۱؛ Suntsova et al, 2022
طراحی فرایندهای انعطاف‌پذیر که امکان نصب فناوری‌ها در زمان‌های غیرعملیاتی را فراهم کند	نوذری و همکاران، ۱٤۰۰؛ Prause, 2019
شناسایی اولویت‌ها و نیازهای هر حوزه برای گسترش فناوری‌های مرتبط و سبد اجرایی پروژه‌ها	انصاری و همکاران، ۱٤۰۲؛ رحمانی و همکاران، ۱٤۰۰

1. Information Communications Technology
2. Predictive Maintenance

ادامه جدول ۵. راهبردهای اولیه برای رفع موانع پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴.۰

استراتژی‌ها (راهبردها)	منابع
استفاده از سیستم‌های ERP[1] و نرم‌افزارهای مدیریت پروژه برای نظارت و کنترل فرایندها	انصاری و همکاران، ۱۴۰۲؛ بهرامی و همکاران، ۱۴۰۱
بهره‌گیری از هوش مصنوعی برای مدیریت و بهینه‌سازی فرایندهای تولید و تعمیرات پیش‌بینانه	Huda et al, 2024 کشاورز، ۱۴۰۲
همکاری با دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزشی برای توسعه مهارت‌های لازم	نوذری و همکاران، ۱۴۰۰؛ Luthra & Mangla , 2018
استقرار سیستم‌های مدیریت امنیت اطلاعات (ISMS[2]) مطابق با استاندارد ISO 27001.	دفتریان، ۱۴۰۰؛ Akao, 2024
ایجاد مرکز عملیات امنیتی (SOC[3]) برای نظارت بر تهدیدات سایبری	انصاری و همکاران، ۱۴۰۲؛ Prümmer et al, 2024
انجام ارزیابی‌های امنیتی و آزمون نفوذ برای شناسایی نقاط ضعف	خرمشاهی، ۱۴۰۰؛ Santos, 2017
تأمین منابع مالی برای طرح‌های حمایتی از صنایع و شرکت‌های دانش‌بنیان	افشاری منفرد و همکاران، ۱۴۰۰؛ رحیم دوست، ۱۴۰۱
مدیریت یکپارچه فرایندها و بانک پروژه‌های تحول دیجیتال به‌صورت مستمر	دفتریان، ۱۴۰۰؛ Munsamy et al, 2024
مشارکت و پیگیری صنایع داخلی برای انتقال تجهیزات و فناوری‌های موردنیاز	اشرفی، ۱۴۰۲؛ نوذری و همکاران، ۱۴۰۰
استفاده از متدولوژی‌های مدیریت پروژه چابک (Agile) برای افزایش کارایی	نوذری و همکاران، ۱۴۰۰؛ Huda et al, 2024
مشارکت در برنامه‌های بین‌المللی مانند Horizon Europe برای انتقال دانش	انصاری و همکاران، ۱۴۰۲؛ Lee et al., 2023
استفاده از فناوری بلاک‌چین برای مدیریت شفاف زنجیره تأمین	نوذری و همکاران، ۱۴۰۰؛ Raza et al, 2023
شناسایی شرکت‌ها برای ایجاد اکوسیستم پایدار نوآوری دیجیتال	اشرفی، ۱۴۰۲؛ Santos et al., 2017
بهره‌گیری از فناوری‌های متن‌باز (Open Source) برای کاهش هزینه‌های نرم‌افزاری	زرین و همکاران، ۱۳۹۷؛ Gubbi et al., 2013
برگزاری کنفرانس‌های علمی و انتشار گزارش‌های فنی درباره تجربیات موفق	نوذری و همکاران، ۱۴۰۰؛ اشرفی، ۱۴۰۲
ارائه معافیت‌های مالیاتی برای شرکت‌های سرمایه‌گذار در فناوری‌های نوین	افشاری منفرد و همکاران، ۱۴۰۰؛ رحمانی و همکاران، ۱۴۰۰
بومی‌سازی تجهیزات و فناوری‌های موردنیاز در داخل کشور	امرائی، ۱۴۰۱؛ انصاری و همکاران، ۱۴۰۲
تأمین زیرساخت‌های لازم و ایجاد بستر سرمایه‌گذاری خطرپذیر برای طرح‌های فناورانه	افشاری منفرد و همکاران، ۱۴۰۰؛ Miśkiewicz & Wolniak, 2020
طراحی فرایندهای نگه‌داری و تعمیرات با استفاده از فناوری‌های هوشمند	دفتریان، ۱۴۰۰؛ Tortorella et al., 2024
استفاده از مدل‌های مشارکت عمومی–خصوصی (PPP[4]) برای تأمین مالی پروژه‌ها	انصاری و همکاران، ۱۴۰۲؛ Lee et al., 2023
بهره‌برداری از داده‌های عملیاتی برای افزایش بهره‌وری خطوط تولید	نوذری و همکاران، ۱۴۰۰؛ Javaid et al., 2024
ایجاد داشبوردهای مدیریتی برای ارائه گزارش‌های لحظه‌ای از پروژه‌ها	اشرفی، ۱۴۰۲؛ خرمشاهی، ۱۴۰۰

1. Enterprise resource planning
2. Information Security Management System
3. Security Operation Center
4. Public–Private partnership

ادامه جدول ۵. راهبردهای اولیه برای رفع موانع پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴.۰

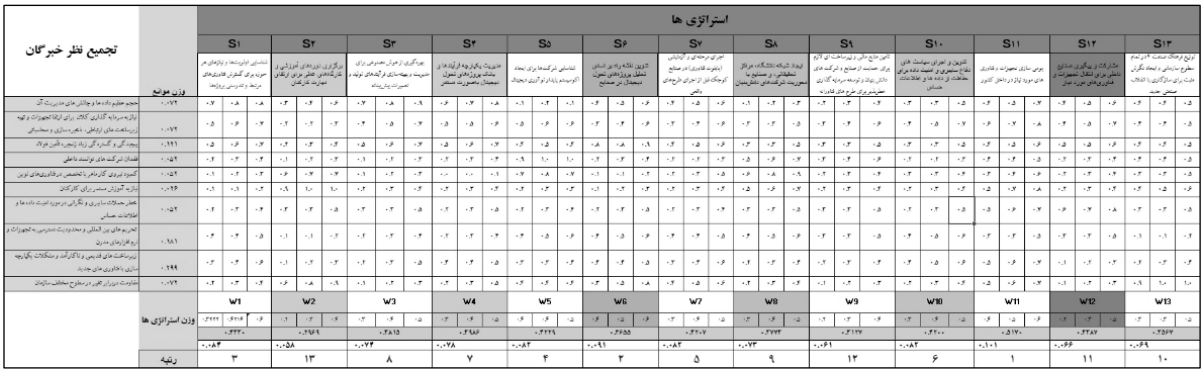
استراتژی‌ها (راهبردها)	منابع
برگزاری جلسات مشاوره و آموزش در مورد اهمیت تغییرات سازمانی	اشرفی، ۱۴۰۲؛ خوش سپهر و همکاران، ۱۴۰۱
ارتقاء سیستم‌های دفاع سایبری و استفاده از رمزگذاری پیشرفته برای حفاظت از داده‌ها	خرمشاهی، ۱۴۰۰؛ انصاری و همکاران، ۱۴۰۲
توسعه معماری‌های سیستمی قابل‌گسترش برای پذیرش فناوری‌های جدید	اشرفی، ۱۴۰۲؛ Schwab, 2018
استفاده از سیستم‌های ماژولار برای کاهش پیچیدگی در فرآیند ارتقا	انصاری و همکاران، ۱۴۰۲؛ Lee et al., 2023
پیاده‌سازی استراتژی‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های دیجیتال	امرائی، ۱۴۰۱؛ Luthra & Mangla , 2018
تحلیل داده‌های مشتریان برای بهبود فرایندهای تولید و ارائه خدمات بهتر	اشرفی، ۱۴۰۲؛ Javaid et al., 2024
ایجاد شبکه دانشگاه، مراکز تحقیقاتی و صنایع با محوریت شرکت‌های دانش‌بنیان	نوذری و همکاران، ۱۴۰۰ Bălănescu et al, 2013
تدوین نقشه راه بر اساس تحلیل پروژه‌های تحول دیجیتال در صنایع	انصاری و همکاران، ۱۴۰۲؛ Dávila, 2024

راهبردهای مذکور توسط خبرگان در دو مرحلهٔ دلفی فازی، غربال و پالایش شد و درنهایت ۱۳ راهبرد برای مقابله با چالش‌های پیاده‌سازی فناوری صنعت **۴.۰** در صنعت فولاد، استخراج گردید. برای تعیین میزان ارتباط میان چالش‌ها و راهبردها، پرسش‌نامه ماتریس خانه کیفیت طراحی شد، به‌طوری‌که چالش‌ها به‌عنوان WHATsها و راهبردها به‌عنوان HOWsها در ماتریس خانه کیفیت درج شد و این پرسش‌نامه در اختیار خبرگان قرار گرفت تا اهمیت هر یک را بر اساس متغیرهای کلامی فازی مشخص کنند. در مرحلهٔ بعد، تمامی پرسش‌نامه‌ها جمع‌آوری شد و خانه کیفیت فازی تشکیل گردید. سپس با استفاده از میانگین مقادیر ثبت‌شده در پرسش‌نامه‌ها، داده‌ها تلفیق گردید. پس از ادغام نظرات کارشناسان در یک ماتریس کلی، وزن هر راهبرد با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$ws_j = \frac{1}{k} \times [(s_{j1} \times wc_1) + (s_{j2} \times wc_1) + \cdots + (s\text{jn} \times wc_k))$$

تعداد معیارها=k

شکل ۳. ماتریس نهایی خانه کیفیت تشکیل‌شده جهت تقابل چالش‌ها با راهبردها را نشان می‌دهد.



شکل ۳. ماتریس خانه کیفیت و درجه اهمیت راهبردها

وزن نهایی راهبردهایی که می‌توان در تقابل با چالش‌های پیاده‌سازی فناوری صنعت **۴.۰** در بخش تعمیرات و نگه‌داری صنعت فولاد مبارکه در نظر گرفت، مطابق جدول ٦ محاسبه و سپس رتبه‌بندی شده است.

جدول ٦ ، اولویت‌بندی راهبردهای مقابله با چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴.۰

اولویت	استراتژی‌ها (راهبردها)	وزن
۱	بومی‌سازی تجهیزات و فناوری‌های موردنیاز در داخل کشور	۰/۱۰۱
۲	تدوین نقشهٔ راه بر اساس تحلیل پروژه‌های تحول دیجیتال در صنایع	۰/۰۹۱
۳	شناسایی اولویت‌ها و نیازهای هر حوزه برای گسترش فناوری‌های مرتبط و سبد اجرایی پروژه‌ها	۰/۰۸٤
٤	شناسایی شرکت‌ها برای ایجاد اکوسیستم پایدار نوآوری دیجیتال	۰/۰۸۲
٥	اجرای مرحله‌ای و آزمایشی (پایلوت فناوری) در صنایع کوچک قبل از اجرای طرح‌های واقعی	۰/۰۸۲
٦	تدوین و اجرای سیاست‌های دفاع سایبری و امنیت داده برای حفاظت از داده‌ها و اطلاعات حساس	۰/۰۸۲
۷	مدیریت یکپارچه فرایندها و بانک پروژه‌های تحول دیجیتال به‌صورت مستمر	۰/۰۷۸
۸	بهره‌گیری از هوش مصنوعی برای مدیریت و بهینه‌سازی فرایندهای تولید و تعمیرات پیش‌بینانه	۰/۰۷٤
۹	ایجاد شبکه دانشگاه، مراکز تحقیقاتی و صنایع با محوریت شرکت‌های دانش‌بنیان	۰/۰۷۳
۱۰	اشاعه فرهنگ صنعت ٤.۰ در تمام سطوح سازمانی و ایجاد نگرش مثبت برای سازگاری با انقلاب صنعتی جدید	۰.۰٦۹
۱۱	مشارکت و پیگیری صنایع داخلی برای انتقال تجهیزات و فناوری‌های موردنیاز	۰/۰٦٦
۱۲	تأمین منابع مالی و زیرساخت ای لازم برای حمایت از صنایع و شرکت‌های دانش‌بنیان و توسعه سرمایه‌گذاری خطرپذیر برای طرح‌های فناورانه	۰/۰٦۱
۱۳	برگزاری دوره‌های آموزشی و کارگاه‌های عملی برای ارتقای مهارت کارکنان	۰/۰۵۸

بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای تحقیق

تحقق اهداف بلندمدت کشور، به‌ویژه نقش‌آفرینی و اثرگذاری در اقتصاد جهانی، مستلزم عبور موفقیت‌آمیز از مسیر انقلاب صنعتی چهارم است. این تحول نه‌تنها امکان ارتقای جایگاه اقتصادی ایران در جهان را فراهم می‌کند، بلکه می‌تواند با استفاده از تجارب کشورهای پیشرو و تدوین سیاست‌های مناسب، زمینه‌ساز افزایش رقابت‌پذیری و پایداری در صنایع داخلی باشد. کشورهای پیشرو در این حوزه، با تدوین اسناد سیاستی جامع، توانسته‌اند فرصت‌های انقلاب صنعتی چهارم را شناسایی و تهدیدهای آن را مدیریت کنند (خرمشاهی، ۱٤۰۰). ایران نیز باید با بهره‌گیری از این تجارب و شناسایی دقیق فرصت‌ها و چالش‌ها، به تدوین و اجرای سیاست‌های جامع در حوزهٔ انقلاب صنعتی چهارم بپردازد (خوش سپهر و همکاران، ۱٤۰۱). در همین راستا، پژوهش حاضر باهدف شناسایی و اولویت‌بندی چالش‌ها و استراتژی‌های پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت **۴.۰**، انجام شد. یافته‌های مطالعه نشان می‌دهد که چالش‌های زیرساختی، سرمایه‌گذاری، نیروی انسانی و هماهنگی زنجیره تأمین، ازجمله موانع اصلی در مسیر تحول دیجیتال صنعت فولاد هستند. در این میان، زیرساخت‌های قدیمی و ناکارآمد با بالاترین میزان اهمیت، به‌عنوان اساسی‌ترین چالش شناسایی شد که نیاز به بازنگری در سیستم‌ها و مدرن‌سازی تجهیزات را مورد تأکید قرار می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که صنعت فولاد برای همگام شدن با تحولات دیجیتال، نیازمند زیرساخت‌های پیشرفته‌ای است که بتوانند از فناوری‌های نوظهور پشتیبانی کنند. افزون بر این، تحریم‌های بین‌المللی و محدودیت دسترسی به فناوری‌های پیشرفته، یکی از موانع کلیدی در پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت **٤.۰** است. این محدودیت‌ها دسترسی به تجهیزات و نرم‌افزارهای مدرن را دشوار کرده و روند تحول دیجیتال را کند می‌کنند. ازآنجاکه بسیاری از فناوری‌های صنعت **٤.۰** نیازمند ابزارها و نرم‌افزارهای مدرنی هستند که تولید آن‌ها به دانش و فناوری پیشرفته نیاز دارد، سیاست‌های تحریمی و وابستگی به تأمین‌کنندگان خارجی، چالشی اساسی برای صنایع کشور ایجاد کرده است. در این راستا، بومی‌سازی فناوری‌ها و تولید داخلی تجهیزات به‌عنوان مهم‌ترین اولویت راهبردی تحقیق حاضر مطرح شد. همچنین، کمبود نیروی کار ماهر در حوزهٔ فناوری‌های

نوین، به‌ویژه در بخش‌های کلیدی مانند نگه‌داری و تعمیرات، یکی دیگر از موانعی است که می‌تولند پذیرش فناوری‌های دیجیتال را به تأخیر بیندازد. با توجه به پیچیدگی فناوری‌های صنعت **٤.٠** و نیاز به مهارت‌های فنی بالا، عدم وجود نیروی کار متخصص، توانایی سازمان‌ها در پیاده‌سازی این فناوری‌ها را محدود می‌سازد. راهبرهای شناسایی‌شده در این پژوهش، راهکارهای مشخصی را برای مقابله با چالش‌ها و تسهیل پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت **٤.٠** ارائه می‌دهد. تدوین نقشهٔ راه استراتژیک، به‌عنوان ابزاری برای هدایت دقیق و هدفمند فرایندهای دیجیتال‌سازی، می‌تواند به سازمان‌ها کمک کند تا منابع خود را بهینه تخصیص دهند و از سردرگمی در مراحل اجرا جلوگیری کنند. ایجاد اکوسیستم پایدار نوآوری دیجیتال نیز یکی دیگر از استراتژی‌های کلیدی است که بر اهمیت همکاری بین صنایع، دانشگاه‌ها و شرکت‌های دانش‌بنیان تأکید دارد. همچنین با تدوین و اجرای سیاست‌های دفاع سایبری و امنیت داده می‌توان به‌طور مؤثر با تهدیدات داخلی و بیرونی سازمان که امنیت سیستم‌های اطلاعاتی و داده‌های حساس را به خطر می‌اندازد مقابله و از آسیب‌های احتمالی جلوگیری کرد. علاوه بر این، برگزاری دوره‌های آموزشی و کارگاه‌های عملی برای ارتقای مهارت کارکنان، ازجمله اقدامات ضروری برای افزایش آمادگی نیروی انسانی است. درنهایت، اشاعه فرهنگ صنعت **٤.٠** در تمام سطوح سازمانی به‌عنوان یکی از مؤثرترین اقدامات برای کاهش مقاومت سازمانی و ایجاد نگرش مثبت نسبت به تحول دیجیتال شناخته شد. پذیرش فناوری‌های جدید نیازمند تغییر نگرش و ایجاد فرهنگ همکاری در سازمان‌ها است. برنامه‌های آموزشی، ترویجی و مشارکتی می‌توانند این فرهنگ را تقویت کرده و بستر لازم برای موفقیت تحول دیجیتال را فراهم کنند.

این نتایج نشان می‌دهد که صنعت فولاد، باوجود چالش‌های متعدد، پتانسیل قابل‌توجهی برای پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت **٤.٠** دارد. به‌کارگیری راهبردهای پیشنهادی می‌تواند مسیر تحول دیجیتال در این صنعت را هموار کرده و زمینه را برای افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و رقابت‌پذیری در بازارهای جهانی فراهم آورد.

یافته‌های پژوهش بامطالعه انصاری و همکاران (۱٤۰۲) که در بررسی مدل‌های آمادگی سازمان‌ها برای ورود به صنعت **٤.٠**، بر ضرورت وجود نقشه راه استراتژیک و جامع تأکید کردند، همسو است. همچنین، در مطالعهٔ مقبول و همکاران (۲۰۲۳)، در مورد فناوری‌های صنعت **٤.٠** و IoT در صنعت تولید غنا، به چالش‌هایی همچون نبود زیرساخت‌های دیجیتال، کمبود نیروی کار متخصص و هزینه‌های بالای پیاده‌سازی اشاره‌شده است؛ این پژوهش نیز چالش‌هایی نظیر زیرساخت‌های قدیمی، کمبود نیروی کار ماهر و نیاز به سرمایه‌گذاری کلان را شناسایی کرده است. پژوهش حاضر در کنار همخوانی با مطالعات پیشین، رویکردی جامع‌تر و کاربردی‌تر را در شناسایی چالش‌ها و ارائه راهبردهای مناسب برای رفع موانع پیاده‌سازی صنعت **٤.٠** در صنعت فولاد ارائه کرده است. به پژوهشگران آتی پیشنهاد می‌شود ارائه مدل‌های ارتباط ساختاری چالش‌ها یا راهبردهای این پژوهش را با تکنیک‌هایی نظیر مدل‌سازی ساختاری تفسیری یا نقشه شناخت فازی در دستور کار قرار دهند.

منابع

اشرفی، رضا. (۱٤۰۲). جایگاه تحول دیجیتال در شرکت فولاد مبارکه. خبرگزاری فلزات آنلاین. بازیابی شده از: https://felezatonline.ir/?p=32706

افشاری منفرد، مسعود، موسائی، رضا، جوان جعفری، علی، منوری، حسین و فتاح دماوندی، محمد. (۱٤۰۰). پایش تحولات انقلاب صنعتی چهارم: گزارش اول: انقلاب صنعتی چهارم، ویژگی‌ها، تأثیرات و روندهای آتی. تهران: نشر دفتر مطالعات راهبردی رونق تولید دانشگاه امام صادق (ع). http://trindoc.itsr.ir/ProductGozareshDetail.aspx?ID=7141

امرائی، علی. (۱٤۰۱). انقلاب چهارم صنعتی و آینده صنعت فولاد. خبرگزاری دنیای اقتصاد. بازیابی شده از https://donya-e-eqtesad.com/fa/tiny/news-3863356.

انصاری، ایمان، براتی، مسعود، صادقی مقدم، محمدرضا و قباخلو، مرتضی (۱٤۰۲). مروری بر مدل‌های آمادگی سازمان برای ورود به انقلاب صنعتی چهارم، فصلنامه مهندسی مدیریت نوین، ۳۰(۹)، ۱۹۷-۲۲۳. https://journals.iau.ir/article_706498.html

باقری مقدم، ناصر، مسیبی، علیرضا و منطقی، منوچهر. (۱۴۰۳). شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر تحول دیجیتال در صنعت خودروسازی کشور. سومین کنفرانس بین‌المللی اقتصاد و مدیریت کسب‌وکار، تهران. بازیابی از: https://civilica.com/doc/2093359

بهادری، بابک؛ عسکری، مسعود؛ فرزامی، هومن؛ صالحی، طیبه؛ سیلمانی خلجی، میلاد؛ رمضانی، محمدصادق و واعظ قاسمی، فریبا (۱۳۹۹، ۱ اردیبهشت). گزارش آینده صنعت فولاد (۱): شناسایی ابعاد تحولی انقلاب صنعتی چهارم در صنعت فولاد و چشم‌اندازهای فناورانه پیش رو، دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1504213

بهادری، بابک؛ عسکری، مسعود؛ فرزامی، هومن؛ صالحی، طیبه؛ سیلمانی خلجی، میلاد؛ رمضانی، محمدصادق و واعظ قاسمی، فریبا (۱۳۹۹، ۱۶ اردیبهشت). گزارش آینده صنعت فولاد (۳): واکاوی سند طرح جامع فولاد کشور از منظر فرصت‌ها و چالش‌های انقلاب صنعتی چهارم و پیشنهاد فرصت‌های اصلاحی و تحولی ، دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1517943

بهرامی، محمدرضا , هاشم زاده، غلامرضا , شاه منصوری، اشرف و فتحی هفشجانی، کیامرث. (۱۴۰۲). تحلیل مؤلفه‌های مؤثر بر ارزیابی آمادگی صنعت نسل چهارم. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۳(۲), ۲۶۷-۲۹۷. https://doi.org/10.48308/jimp.13.2.267

خرمشاهی، هاتف. (۱۴۰۰). طرح تحول دیجیتال فولاد مبارکه. خبرگزاری ایراسین. بازیابی شده از https://irasin.ir/x9MD.

خوش سپهر، زهرا، علیمحدلو، مسلم، محمدی، علی و رعنایی کردشولی، حبیب‌الله. (۱۴۰۱). علم‌سنجی روندهای نوظهور در مفاهیم انقلاب صنعتی چهارم و کیفیت ۴.۰. علوم و فنون مدیریت اطلاعات، ۳۴-۵۵. https://stim.qom.ac.ir/article_2283.html

داودی، آزاده، هوشمند، محمود و ملک الساداتی، سعید. (۱۳۹۸). بررسی سیاست‌های حمایت از بیکاران در ایران با استفاده از روش‌های دلفی فازی و تحلیل سلسله مراتبی فازی. مدیریت بازار کار ایران، ۷۱. https://qjerp.ir/article-1-2157-fa.html

دباغ، رحیم، فرزان، محمد و محسنی ، محمد. (۱۴۰۴). شناسایی چالش‌های فناوریهای صنعت ۴.۰ برای عملیات پایدار در صنایع کوچک و متوسط. پژوهش در مدیریت تولید و عملیات. ۱۶(۱). ۱-۲۴. https://doi.org/10.22108/pom.2025.141520.1561

دفتریان، آرمینا سادات (۱۴۰۰). نگاشت مدل تأثیرگذاری نگهداری و تعمیرات ۴.۰ بر عملکرد تولید پایدار: ترکیب دیمتل فازی و مدل‌سازی ساختاری تفسیری – مطالعه موردی در شرکت فولاد مبارکه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، رشته مدیریت صنعتی، گرایش تولید و عملیات. https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/bb7aa877c83f31dd2297fd2a4d80c8ff

رحمانی، سوما، علیزاده ثانی، محسن، منطقی، منوچهر و فرزامی، هومن. (۱۴۰۰). عوامل مؤثر بر ناکامی فرارسی فناورانه در زنجیره ارزش فولاد ایران. فصلنامه مدیریت توسعه فناوری، ۹(۲)، ۱۶۳-۱۹۶. https://jtdm.irost.ir/article_1116.html

رحیم‌دوست، الهه. (۱۴۰۱). راهبردهای به‌کارگیری تکنولوژی‌های روز دنیا در صنعت فولاد کشور. ماهنامه علمی «امنیت اقتصادی», ۱۰(۵), ۲۱-۳۲. https://es.tesrc.ac.ir/article_253884.html

زاهد، عطیه و سخی، محمدرضا. (۱۳۹۵). مروری بر تکنیک‌های کلان داده. سومین کنفرانس ملی برق و کامپیوتر، کاشان. https://sid.ir/paper/884634/fa

زرین، صدف، علیمحمدی، مهرداد و سیادت، سیدحسین. (۱۳۹۷). معماری نوین آینده: مدلی نوآور برای کسب‌وکار بر بستر یکپارچگی رایانش ابری و اینترنت اشیاء. فصلنامه رشد فناوری، ۱۴(۵۴)، ۳۵-۲۶. https://www.sanatarticle.com/Detail/4084

عبدالعلی‌زاده اردبیلی، رقیه و ثقفی، فاطمه. (۱٤۰۰). اولویت‌بندی استراتژی‌های انقلاب صنعتی چهارم در صنعت خودروسازی ایران با استفاده از تاپسیس و سوارای فازی. هفتمین کنفرانس ملی مطالعات مدیریت در علوم انسانی، تهران. بازیابی شده از https://civilica.com/doc/1475614

علی‌اکبری، سبحان، وفایی، فرهاد و نمامیان، فرشید. (۱٤۰۱). شناسایی موانع به‌کارگیری اینترنت اشیا در صنایع کوچک و متوسط استان ایلام با استفاده از تکنیک دلفی فازی. فصلنامه علمی فرهنگ ایلام، ۲۳(۷٦-۷۷)، ۹۷-۱۱٦. https://www.farhangeilam.ir/article_169586.html

کشاورز محمدرضا (۱٤۰۲)، ارائه مدل کارکردی هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در بازاریابی عصبی، راهبردهای بازرگانی،۲۰(۲۲) ، ص ٤۷-٦٤. https://doi.org/10.22070/cs.2024.19182.1383

گرمسیری، کریم , بالوئی جام خانه، هادی و قربان پور، احمد. (۱٤۰٤). ارزیابی میزان آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی در سازگاری با تحولات صنعت نسل چهارم با رویکرد یادگیری ماشین .پژوهش در مدیریت تولید و عملیات. ۱٦(۲)، ۱-۲٦. http://doi.org/10.22108/pom.2025.143022.1582

گودینی، مریم. (۱۳۹۹). مفهوم پایداری در مدیریت تولید. اولین کنفرانس بین‌المللی چالش‌ها و راهکارهای نوین در مهندسی صنایع و مدیریت و حسابداری، ساری. https://civilica.com/doc/1045291/

خوش سپهر، زهرا، علی‌محمدلو، مسلم، محمدی، علی، & رعنایی کردشولی، حبیب الله. (۱٤۰۲). علم‌سنجی و تجزیه‌وتحلیل روند پژوهش‌ها در حوزه انقلاب صنعتی چهارم و کیفیت۰/٤. *علوم و فنون مدیریت اطلاعات*. *9*(2), 133-166. doi: 10.22091/stim.2022.7738.1707

محمودزاده، ابراهیم، حسنی‌اصل، حمیدرضا، قوچانی، محمدمهدی و نیک‌نفس، علی (۱۳۹۸). تدوین راهبردهای امنیت سایبری سامانه‌های کنترل صنعتی در زیرساخت‌های حیاتی کشور. مطالعات بین‌رشته‌ای دانش راهبردی، ۸(۳۱), ۲۵۳-۲۸۱.https://smsnds.sndu.ac.ir/article_268.html

نوذری، حامد، صادقی، محمدابراهیم، قهرمانی نهر، جاوید و نجفی، سیداسماعیل. (۱٤۰۰). تحلیل کمی چالش‌های پیاده‌سازی زنجیره تأمین دیجیتال مبتنی بر فناوری اینترنت اشیاء (زنجیره تأمین ٤.۰). نشریه علمی مدیریت استاندارد و کیفیت، ٦٤-۹۵. http://doi.org/10.22034/jsqm.2022.314683.1380

Abdolalizadeh Ardebili, R., & Saghafi, F. (2022, June 27). *Prioritizing the strategies of the fourth industrial revolution in the Iranian automotive industry using TOPSIS and fuzzy SWARA* [Conference presentation]. Seventh National Conference on Management Studies in the Humanities, Tehran [In Persian]. https://civilica.com/doc/1475614

Afshari Monfared, M., Mousaei, R., Javan Jafari, A., Munavari, H., and Fattah Damavandi, M. (2021). Monitoring the Developments of the Fourth Industrial Revolution: First Report. *The Fourth Industrial Revolution, Characteristics, Impacts and Future Trends*, Tehran, Publishing Office of Strategic Studies for the Promotion of Production, Imam Sadeq University (AS). http://trindoc.itsr.ir/ProductGozareshDetail.aspx?ID=7141.

Akao, Y. (2024). Quality function deployment: integrating customer requirements into product design. CRC Press. https://doi.org/10.4324/9781003578833

Aliakbari, S., Vafaie, F., & Namamian, F. (2023). Identifying Obstacles to the Use of Internet of Things in Small and Medium Industries of Ilam Province Using the Fuzzy Delphi Technique. *a scientific journal of Ilam culture*, *23*(76.77), 97-116 [In Persian]. https://www.doi.org/10.22034/farhang.2023.169586

Ansari, I., Barati, M., Sadeghi Moghadam, M. R.& Qabakhlou, M. (2013). A review of organizational readiness models for entering the Fourth Industrial Revolution, *Quarterly Journal of Modern Management Engineering*, 30(9), 197-223 [In Persian]. https://journals.iau.ir/article_706498.html

Ashrafi, R. (2023, November 4). *The position of digital transformation in Mobarakeh Steel Company*. Metals Online News Agency [In Persian]. https://felezatonline.ir/?p=32706

Bagheri Moghadam, N., Mosaiyebi, A., and Manteghi, M. (1403). Identifying and prioritizing factors affecting digital transformation in the country's automotive industry. Third International Conference on Economics and Business Management, Tehran [In Persian]. https://civilica.com/doc/2093359

Bahadori, B.; Askari, M., Farzami, H., Salehi, T., Silmani-Khalji, M., Ramezani, M. S. & Vaez Ghasemi, F. (2019, May 1). Future of the Steel Industry Report (1): Identifying the Transformational Dimensions of the Fourth Industrial Revolution in the Steel Industry and the Technological Prospects Ahead. *Office of Energy, Industry and Mining Studies, Research Center of the Islamic Consultative Assembly* [In Persian]. https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1504213

Bahadori, B.; Askari, M., Farzami, H., Salehi, T., Silmani-Khalji, M., Ramezani, M. S. & Vaez Ghasemi, F. (2019, May 16). Future Report on the Steel Industry (3): Analysis of the National Steel Master Plan Document from the Perspective of the Opportunities and Challenges of the Fourth Industrial Revolution and Suggestion of Reform and Development Opportunities. *Office of Energy, Industry and Mining Studies, Research Center of the Islamic Consultative Assembly* [In Persian]. https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1517943

Bahrami, M. R. , Hashemzadeh, G. R. , Shahmansouri, A. and Fathi Hefeshjani, K. (2023). Analyzing Effective Components in Industry 4.0 Readiness Assessments. Journal of Industrial Management Perspective, 13(2), 267-297 [In Persian]. https://doi.org/10.48308/jimp.13.2.267

Bălănescu, V., Soare, P., Beliciu, V., & Alpopi, C. (2013). The impact of business process management on organizational strategy. *Business Excellence and Management*, 3(2), 21-28 http://beman.ase.ro/no32/3.pdf

Dabagh R., Farzan M. & Mohseni B. (2025). identifying the challenges of industry technologies 4 for sustainable operations in small and medium industries. *Research in Production and Operations Management*.16(1) [In Persian]. https://doi.org/10.22108/pom.2025.141520.1561

Daftarian, A. S. (2021). Mapping the impact model of maintenance and repairs 4.0 on sustainable production performance: Combining fuzzy DEMATEL and interpretive structural modeling - a case study in Mobarakeh Steel Company. [Master's thesis, University of Isfahan] [In Persian]. https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/bb7aa877c83f31dd2297fd2a4d80c8ff

Dávila, J. E. C., Yarasca, C. L. C., Saldívar, D. O., & Hernández, Y. C. U. (2024). Estrategias de transformación digital en empresas tradicionales. *Revista Venezolana de Gerencia: RVG*, 29(105), 289-302. https://doi.org/10.52080/rvgluz.29.105.19

Davoudi A, hoshmand M, maleksadat S. (2018). Investigating Unemployment Protection Policies in Iran using Fuzzy Delphi and Fuzzy AHP Methods. Journal of Economic Research and Policies. 26 (87), 249-308 [In Persian]. http://qjerp.ir/article-1-2157-fa.html

Enriquez Rodriguez, A. A. (2024). Implementación de mantenimiento digital para reducir el tiempo de gestión de envío de repuestos en empresa de perforación diamantina. *Universidad San Ignacio de Loyola* https://hdl.handle.net/20.500.14005/14325

Garmsiri, K. , Balouei Jamkhaneh, H. and Ghorbanpour, A. (2025). Readiness Assessment of Petrochemical Companies in Adapting to the Developments of Industry 4.0 Using Machine Learning Approach. *Research in Production and Operations Management*, *16*(2), 1-26 [In Persian]. http://doi.org/10.22108/pom.2025.143022.1582

Godini, M. (2020, September 14). The concept of sustainability in production management. The first international conference on challenges and new solutions in industrial engineering [Conference presentation], 1st International Conference on Challenges and New Solutions in Industrial Engineering and Management and Accounting, Sari [In Persian]. https://civilica.com/doc/1045291/

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660. http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010

Huda, N. U., Ahmed, I., Adnan, M., Ali, M., & Naeem, F. (2024). Experts and intelligent systems for smart homes' Transformation to Sustainable Smart Cities: A comprehensive review. *Expert Systems with Applications*, 238, 122380. http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122380

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Sinha, A. K. (2024). Digital economy to improve the culture of industry 4.0: A study on features, implementation and challenges. *Green Technologies and Sustainability*, 100083. http://dx.doi.org/10.1016/j.grets.2024.100083

Keshavarz M. (2023). Presenting a Functional Model of Artificial Intelligence and Machine Learning in Neuromarketing. Journal of Business strategies. 20(22), 47-64 [In Persian]. https://doi.org/10.22070/cs.2024.19182.1383

Khan, A., & Turowski, K. (2016). *A survey of current challenges in manufacturing industry and preparation for industry 4.0.* In Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry"(IITI'16) Volume 1 (pp. 15-26). Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-33609-1_2

Khorramshahi, H. (2021, September 14). Mobarakeh Steel's Digital Transformation Plan. *Irasin News Agency* [In Persian]. https://irasin.ir/x9MD

Khoshsepehr, Z., AliMohammadlou, M., Mohammadi, A., & Ranaei Kordshouli, H. (2023). Scientometrics and Analysis of the Research Trends in the Fourth Industrial Revolution Field and Quality 0.4. *Sciences and Techniques of Information Management*, *9*(2), 133-166 [In Persian]. https://doi.org/10.22091/stim.2022.7738.1707

Lee, J., Chua, P. C., Chen, L., Ng, P. H. N., Kim, Y., Wu, Q., ... & Moon, S. K. (2023). Key enabling technologies for smart factory in automotive industry: status and applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology*, 1(1), 93-105. http://dx.doi.org/10.57062/ijpem-st.2022.0017

Linstone, H. A., & TUROFF, M. (2002). Delphi bibliography. *Journal of Marketing Research*, 14(54), 68 . http://dx.doi.org/10.2307/3150755

Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration*, 6, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005

Luthra, S., & Mangla, S. K. (2018). Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 168–179. http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.018

Mahmoudzadeh, E., Hassani asl, H. R., Gochani, M. M., & Nik nafs, A. (2019). Developing cybersecurity strategies for industrial control systems in the country's critical infrastructure. *Quarterly Journal of Interdisciplinary Studies on Strategic Knowledge*, *8*(31), 253-281[In Persian]. https://smsnds.sndu.ac.ir/article_268.html?lang=fa

Maqbool, R., Saiba, M. R., & Ashfaq, S. (2023). Emerging industry 4.0 and Internet of Things (IoT) technologies in the Ghanaian construction industry: sustainability, implementation challenges, and benefits. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13), 37076-37091. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-24764-1

Miśkiewicz R, Wolniak R.(2020). Practical Application of the Industry 4.0 Concept in a Steel Company. *Sustainability*.; 12(14):5776. https://doi.org/10.3390/su12145776

Munsamy, M., Telukdarie, A., & Manenzhe, M. (2024). A 4th Industrial Revolution Systems Approach for Human Resource Optimization in Maintenance. *Procedia Computer Science*, 232, 1900-1908. http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.012

Nozari, H., Sadeghi, M.E., Nahr, J.G., & Najafi, S.E. (2022). Quantitative Analysis of Implementation Challenges of IoT-Based Digital Supply Chain (Supply Chain 4.0) [In Persian]. http://doi.org/10.22034/jsqm.2022.314683.1380

Omaraei, A. (2022, April 29). The Fourth Industrial Revolution and the Future of the Steel Industry. *Donya-e-Eqtesad News Agency* [In Persian]. https://donya-e-eqtesad.com/fa/tiny/news-3863356

Prause, M. (2019). Challenges of industry 4.0 technology adoption for SMEs: the case of Japan. *Sustainability*, 11(20), 5807. https://doi.org/10.3390/su11205807

Prümmer, J., van Steen, T., & van den Berg, B. (2024). A systematic review of current cybersecurity training methods. *Computers & Security*, 136, 103585. http://dx.doi.org/10.1016/j.cose.2023.103585

Raza, Z., Haq, I. U., & Muneeb, M. (2023). Agri-4-all: A framework for blockchain based agricultural food supply chains in the era of fourth industrial revolution. *Ieee Access*, 11, 29851-29867. http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3259962

Rahmani, S. , AlizadehSani, M. , Manteghi, M. and Farzami, H. (2021). Factors Affecting Technological catch-up failure in Iran's Steel Value Chain. *Journal of Technology Development Management*, *9*(2), 163-196 [In Persian]. https://doi.org/10.22104/jtdm.2021.4796.2768

Rahimdoost, E. (2022). Strategies for applying modern technologies in the country's steel industry. *Monthly Scientific Journal "Economic Security"*, 10(5), 21-32 [In Persian]. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17354188.1401.10.5.2.9

Santos, K., Loures, E., Piechnicki, F., & Canciglieri, O. (2017). Opportunities assessment of product development process in Industry 4.0. *Procedia manufacturing*, 11, 1358-1365. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.265

Santos, M. Y., Oliveira e Sá, J., Andrade, C., Vale Lima, F., Costa, E., Costa, C., . . . Galvão, J. (2017). A Big Data system supporting Bosch Braga Industry 4.0. International Journal of Information Management.37(6).750-760. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.07.012

Suntsova, Olesia (2022). The definition of smart economy and digital transformation of business in the concepts Industry 4.0 and 5.0. *Technology audit and production reserves.* 4 (66), S. 18 – 23. http://dx.doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265105

Tortorella, G. L., Saurin, T. A., Fogliatto, F. S., Tlapa Mendoza, D., Moyano-Fuentes, J., Gaiardelli, P., ... & Macias de Anda, E. (2024). Digitalization of maintenance: exploratory study on the adoption of Industry 4.0 technologies and total productive maintenance practices. *Production Planning & Control*, 35(4), 352-372. http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2022.2083996

Zahed, A., & Sakhi, M. R. (2017, August 2). *A review of big data techniques.* [Conference presentation]. Third National Conference on Electricity and Computers, Kashan [In Persian]. https://civilica.com/doc/622188

Zarrin, S., Alimohammadi, M., & Sayadat, S. H. (2018). New Architecture of the Future: Amew Architecture for future: innovative business model based on integrity of cloud computing and IOT. *Roshd-e-Fanavari*, 14(54), 26-35 [In Persian]. https://www.jstandardization.ir/article_148441.html

Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015, August). *Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges*. 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD) (pp. 2147-2152). IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284