Research in Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329
Vol. 16, Issue 1, No. 40, Spring 2025
https://doi.org/10.22108/pom.2025.141520.1561

(Research paper)

Identifying the Challenges of Industry 4.0 Technologies for Sustainable Operations in SMEs

Rahim Dabbagh*
Department of Industrial Engineering, Faculty of Industries and Industrial Technologies, Urmia University of Technology, Urmia, Iran, r.dabbagh@uut.ac.ir
Mohammad Farzan
Department of Industrial Engineering, Faculty of Industries and Industrial Technologies, Urmia University of Technology, Urmia, Iran, m.farzan@gmail.com
Behzad Mohseni
Department of Industrial Engineering, Faculty of Industries and Industrial Technologies, Urmia University of Technology, Urmia, Iran, stat.tabriz@gmail.com

Purpose: This study aims to identify and analyze the main challenges associated with implementing Industry 4.0 technologies in small and medium-sized enterprises (SMEs). The focus is on the role of these technologies in achieving sustainable and ethical operations, concentrating on circular economy and environmental impact reduction. This research provides a comprehensive framework to identify obstacles and propose solutions for improving productivity and sustainability.

Design/methodology/approach: The study employed the fuzzy DEMATEL method to analyze cause-and-effect relationships among the challenges. A questionnaire was used for data collection validated by experts, with a Cronbach's alpha reliability coefficient of 0.875. The sample consisted of 345 industrial experts working in industrial parks in East Azerbaijan Province, Iran. 15 key challenges were identified, and their interactive relationships were analyzed. Sensitivity analysis was also conducted to evaluate the accuracy and robustness of the results under varying weights assigned to experts.

Findings: 15 key challenges associated with implementing Industry 4.0 technologies in SMEs were identified. The most critical challenges were: lack of awareness about the benefits and requirements of Industry 4.0, absence of IT infrastructure (hardware and software), shortage of skilled workforce,

* Corresponding author, 0000-0003-2888-3928 2981-0329 / © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

low awareness of policies related to Industry 4.0, and insufficient managerial support for related projects. The analysis revealed that influential challenges (causes), such as lack of awareness, absence of IT infrastructure, and workforce shortages, directly impact dependent challenges (effects), such as lack of supply chain coordination, fear of unemployment, or customer resistance to technology adoption. It was also found that a "lack of awareness about Industry 4.0" had the highest influence and was identified as the most critical challenge.

Research limitations/implications: This study is limited to SMEs within a specific geographical region, which may affect the generalizability of the findings to other regions/industries. Also, the research focuses on Industry 4.0 technologies within the context of sustainable operations, which may require further exploration in other industrial domains. Researchers are encouraged to examine these challenges across broader geographical areas or different industries as a subject of future study.

Practical Implications: The findings highlighted several required actions to overcome the identified challenges. They include workforce training, which is about designing specialized training programs to enhance employee skills in advanced technologies; development of IT infrastructure, which is about investing in hardware and software infrastructure aligned with Industry 4.0 requirements; raising managerial awareness, which is about increasing managers' understanding of the benefits and opportunities offered by Industry 4.0 technologies for SMEs; and financial and government support, which is about allocating appropriate financial resources, offering low-interest loans, and formulating policies that encourage SMEs to adopt these technologies. Such measures can facilitate the adoption of Industry 4.0 technologies in SMEs and improve their productivity.

Social Implications: The study emphasizes that raising public awareness about the benefits of Industry 4.0 can lead to positive changes in societal attitudes toward environmental sustainability, corporate social responsibility, waste reduction, and resource efficiency improvement. Also, adopting these technologies can contribute to developing a circular economy and have a positive societal impact.

Originality/Value: This research provides a comprehensive framework for analyzing interactive challenges related to Industry 4.0 technologies in SMEs - a novel approach compared to previous studies primarily focused on large enterprises. By addressing the specific issues faced by resource-constrained SMEs, this study offers actionable insights for policymakers, industry managers, and researchers to design effective strategies for overcoming obstacles and paving the way for ethical and sustainable operations.

Keywords: Industry 4.0, SMEs, Multi-Critical Decision-Making, Ethical and sustainable trade, Circular economy

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۶، شماره ۱، پیاپی ۴۰، بهار ۱۴۰۴
دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴ ص ۱-۲۴
https://doi.org/10.22108/pom.2025.141520.1561

(مقالهٔ پژوهشی)

شناسایی چالش‌های فناوری‌های صنعت ۴,۰ برای عملیات پایدار در صنایع کوچک و متوسط

رحیم دباغ[۱*]؛ محمد فرزان[۲]؛ بهزاد محسنی[۳]

۱- دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده صنایع و فناوریهای معدنی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، r.dabbagh@uut.ac.ir
۲- کارشناس ارشد گروه مهندسی صنایع، دانشکده صنایع و فناوریهای صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، m.farzan@gmail.com
۳- کارشناس ارشد گروه مهندسی صنایع، دانشکده صنایع و فناوریهای صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، stat.tabriz@gmail.com

چکیده: از مهم‌ترین پیامدهای چهارمین انقلاب صنعتی، ترکیب فناوری‌های پیشرفتهٔ دیجیتالی مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و تحلیل داده‌های بزرگ در بهبود فرآیندها و افزایش بهره‌وری صنایع است؛ با این حال، کاربرد این فناوری‌ها در صنایع کوچک و متوسط (*SMEs*) با چالش‌هایی مواجه است. تحقیقات محدودی دربارهٔ پیاده‌سازی و به‌کارگیری فناوری‌های صنعت ۴,۰ به‌خصوص با تأکید بر عملیات اخلاقی و پایدار در *SME*ها انجام شده است؛ زیرا به‌کارگیری این فناوری‌ها با توجه به محدودیت‌ها، هزینه‌های عملیاتی و مالی دارد و یک چالش مهم برای این صنایع است. در پژوهش حاضر، پانزده چالش اصلی تأثیرگذار نقش فناوری‌های صنعت ۴,۰ در عملیات اخلاقی و اقتصاد دایره‌ای صنایع کوچک و متوسط شناسایی شدند. در این راستا، طراحی پرسش‌نامه پس از تأیید روایی از سوی خبرگان و پایایی آن با ضریب الفای کرونباخ ۰,۸۷۵، از سوی ۳۴۵ کارشناس فعال صنعتی در صنایع مستقر در شهرک‌های صنعتی استان آذربایجان شرقی تکمیل شدند؛ سپس روابط تعاملی تأثیرگذاری، تأثیرپذیری، ضریب نفوذ چالش‌ها، دسته‌بندی و رتبه‌بندی اهمیت نسبی عوامل علت و معلولی و تحلیل حساسیت آنها بررسی شده‌اند که در پژوهش‌های دیگر ملاحظه نمی‌شود. نتایج پژوهش نشان داد که به ترتیب چالش‌های اصلی کمبود آگاهی از صنعت ۴,۰، کمبود زیرساخت مبتنی بر فناوری اطلاعات، کمبود نیروی کارآزمودهٔ مرتبط، پایین‌بودن آگاهی از سیاست‌های صنعت ۴,۰ و پشتیبانی پایین مدیریت از این حوزه از چالش‌های اصلی‌اند. برای دستیابی به شایستگی و عملیات پایداری و اخلاقی در *SME*ها، مطابق چالش‌های اولویت‌دار نسل چهارم انقلاب صنعتی، با افزایش آگاهی و آموزش نیروها در استفاده از اینترنت توأم با ایجاد زیرساخت نرم‌افزار و سخت‌افزار مثل دسترسی به رایانه‌های رومیزی مبتنی بر فناوری اطلاعات امکان‌پذیر است.

واژه‌های کلیدی: چالش‌های صنعت ۴,۰، صنایع کوچک و متوسط، تصمیم‌گیری چند معیاره، تجارت اخلاقی و پایدار، اقتصاد دایره‌ای

* نویسنده مسئول، 0000-0003-2888-3928

2981-0329 / © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

۱- مقدمه

صنعت ۴٫۰[1] یا انقلاب صنعتی چهارم، به جدیدترین مرحلهٔ انقلاب صنعتی اشاره دارد. این عبارت به چهارمین انقلاب صنعتی اشاره دارد که ماشین‌ها، افراد و دارایی‌های فیزیکی را به یک اکوسیستم دیجیتال یکپارچه، متصل می‌کند و با ظهور انقلاب صنعتی چهارم، فناوری‌های پیشرفته‌ای نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، داده‌های بزرگ و سیستم‌های سایبری-فیزیکی به‌سرعت در حال تحول صنایع‌اند. این فناوری‌ها، این امکان را به صنایع می‌دهند که با بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و افزایش انعطاف‌پذیری در تولید، به‌سمت عملیات پایدارتر و کارآمدتر حرکت کنند. در این میان، اهمیت به‌کارگیری فناوری‌های صنعت ۴٫۰ در صنایع کوچک و متوسط (SMEs) به‌دلیل نقش کلیدی آنها در اقتصاد ملی و ایجاد اشتغال، بسیار حیاتی است؛ با این حال، برخلاف صنایع بزرگ که منابع و زیرساخت‌های لازم برای پیاده‌سازی این فناوری‌ها را دارند، SMEها با چالش‌های مختلفی در پذیرش و استفاده از فناوری‌های پیشرفته مواجه‌اند (Mousavi and Amiri Aghdai, 2021).

تاکنون مطالعات محدودی برای تأثیر فناوری‌های صنعت ۴٫۰ بر پیاده‌سازی عملیات پایداری و اخلاقی در SMEها انجام شده است. این صنایع به‌دلیل محدودیت‌های مالی، فنی و مدیریتی با موانع درخور توجهی روبه‌رو هستند که بهره‌گیری مؤثر از فناوری‌های صنعت ۴٫۰ را دشوار می‌کند. از سوی دیگر، بهره‌گیری از این فناوری‌ها به SMEها کمک می‌کند تا در جهت اهداف اقتصاد دایره‌ای و تجارت پایدار و اخلاقی حرکت کنند؛ بنابراین، شناسایی و بررسی چالش‌های اصلی موجود برای به‌کارگیری این فناوری‌ها در SMEها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این پژوهش، با هدف شناسایی چالش‌های اصلی مرتبط با پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴٫۰ در SMEها و تأثیر آن بر عملیات پایدار و اخلاقی مطابق این انقلاب صنعتی، ۱۵ چالش اصلی با استفاده از نظرهای خبرگان شناسایی شد. تحلیل چالش‌ها با توجه به هدف بررسی و شناسایی عوامل تأثیرگذار از تأثیرپذیر و اهمیت نسبی آنها در این صنایع، از روش تصمیم‌گیری چند معیارهٔ دیمتل فازی انجام شده است تا روابط تعاملی میان آنها و ارائهٔ دسته‌بندی عوامل علت و معلولی تعیین شوند. نتایج پژوهش حاضر در پیاده‌سازی صنعت ۴٫۰، به SMEها و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا راهبردهای مناسبی را برای غلبه بر این چالش‌ها و بهره‌گیری از فرصت‌های صنعت ۴٫۰ اتخاذ کنند.

صنایع کوچک و متوسط (SMEs) با اقتصاد چرخشی یا دورانی (CE[2])، با هدف کاهش پسماندها، بیشترین استفاده از منابع را در فعالیت‌های خود می‌برند که مؤید به‌کارگیری اقتصاد دایره‌ای با رویکرد سیستمی برای ایجاد ارزش افزوده در آنهاست (Mora et al., 2020). فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم با عنوان صنعت ۴٫۰، تأثیر مثبتی بر مدیریت چرخهٔ عمر محصولات دارد و این امکان را برای مدیران و متخصصان فعال فراهم کرده است تا با بهره‌برداری از پتانسیل‌های ارائه‌شدهٔ فناوری‌های صنعت ۴٫۰، اهداف و فعالیت‌های کسب و کار خود را در راستای CE کاراتر و اثربخش‌تر ادامه دهند (Rosa et al., 2020). به‌کارگیری فناوری‌های صنعت ۴٫۰، آثار مستقیم و غیرمستقیم درخور توجهی را بر عملکرد کسب و کار پایدار دارند (Kamble et al., 2020). در این راستا توجه به ماهیت مدیریت لجستیک با پتانسیل‌های صنعت ۴٫۰، کمک بسزایی در بهبود انعطاف‌پذیری و کارایی این صنایع می‌کند (Hoffman and Roche, 2017)؛ ازجمله فناوری‌های صنعت ۴٫۰ که در صنعت غذا، به تغییرات درخور

توجهی در حوزهٔ پایداری محیط‌زیست و سلامت انسان‌ها منجر شده است؛ به‌طوری که به‌کارگیری آن در صنایع غذایی، چالش‌ها و فرصت‌های جدیدی را به وجود آورده است، استراتژی‌های فعلی را برای الگوهای تولید و مصرف مواد غذایی تغییر داده و راه را برای حرکت به‌سمت انقلاب صنعتی پنجم یا صنعت ۵,۰ هموار کرده است (Hassoon et al., 2023). کسب و کارها برای درک و پیاده‌سازی صنعت ۴,۰، باید دیجیتالی‌شدن تکنولوژی‌ها، شفافیت و در دسترس بودن اطلاعات را توسعه دهند تا باعث توسعهٔ زنجیرهٔ تأمین تأثیرگذار شوند (Pfol et al., 2017). نوآوری فرایند فناوری‌های صنعت ۴,۰ در کنار مراحل طراحی، ساخت، تحویل، افزایش چرخهٔ عمر محصولات و خدمات، به کاهش مصرف مواد، ساخت مجدد، بازیافت و استفادهٔ مجدد منجر می‌شود (Yao et al., 2024).

با ظهور انقلاب صنعتی چهارم، فناوری‌های نوینی نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها، پتانسیل عظیمی را برای بهبود بهره‌وری و توسعهٔ پایدار در کسب و کارها ایجاد کرده است. کسب و کارهای کوچک و متوسط به‌عنوان بخش مهم اقتصادی، از این فناوری‌ها برای بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری بهره‌مند می‌شوند؛ با این حال، محدودیت‌های مالی، مدیریتی و زیرساختی که در آنها وجود دارد، استفاده از فناوری‌های پیشرفته به چالشی مهم تبدیل شده است. ضرورت انجام این تحقیق ناشی از نیاز مبرم SMEها به بهره‌گیری از فناوری‌های صنعت ۴,۰، برای دستیابی به شایستگی پایداری و اخلاقی است؛ در عین حال، فقدان منابع و زیرساخت‌های مناسب در SMEها باعث شده است به‌طور مؤثر از این فرصت‌ها بهره‌برداری نکنند. این مسئله، نیاز به شناسایی چالش‌های خاص تأثیرگذار از تأثیرپذیر SMEها در پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴,۰ را روشن می‌کند تا راهبردهای مناسبی برای غلبه بر این موانع تأثیرگذار و با اهمیت نسبی بالا تدوین شود.

نوآوری پژوهش در ارائهٔ چارچوبی است که با استفاده از روش دیمتل فازی، ۱۵ چالش کلیدی پیش روی SMEها را شناسایی و ارزیابی می‌کند و همچنین با بررسی روابط علی و معلولی میان چالش‌ها، به SMEها و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا اولویت‌بندی دقیق‌تری از چالش‌ها داشته باشند و در راستای بهبود عملکرد پایدار و اخلاقی این صنایع، گام بردارند.

در ادامهٔ مقاله، ساختار کلی به این صورت تنظیم شده است: در بخش دوم، مبانی نظری و پیشینهٔ پژوهش مرتبط با فناوری‌های صنعت ۴,۰ و SMEها مرور می‌شود؛ در بخش سوم، روش تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها توضیح داده می‌شود؛ سپس در بخش چهارم، نتایج تحلیل‌های دیمتل فازی و روابط علی بین چالش‌ها ارائه می‌شود. درنهایت بخش پنجم، به بحث و نتیجه‌گیری اختصاص دارد و پیشنهادهای کاربردی ارائه می‌شود.

۲-مبانی نظری

انقلاب صنعتی چهارم به تغییرات سریع و بزرگ فناوری و صنایع و الگوهای اجتماعی و عملیاتی در طی قرن ۲۱ را به‌منظور افزایش ارتباطات و اتوماسیون هوشمندسازی فراگیر در بر می‌گیرد و فناوری‌های مختلفی مانند اینترنت اشیا (IoT[۳])، محاسبات و رایانش ابری[۴]، ساخت افزودنی[۵]، امنیت سایبری با بلاک‌چین[۶]، واقعیت افزوده (AR) با هوش مصنوعی[۷] (AI)، داده‌های بزرگ[۸]، یکپارچه‌سازی سیستم[۹]، شبیه‌سازی[۱۰] و ربات‌های خودمختار[۱۱] را

در کنار هم ترکیب می‌کند تا فرایندهای تولید و مدیریت را تا حد ممکن بهینه‌سازی و ارتباط مؤثری بین دنیای دیجیتال و مجازی فراهم کند George, 2024()؛ این مسئله در شکل ۱ ملاحظه می‌شود.

شکل ۱- فناوری‌های صنعت ۴

Fig. 1- Industry Technologies 4

سیستم مدیریت هوشمند پسماند، با استفاده از اینترنت اشیا (IOT)[۱۲] عمل می‌کنند و باعث جداسازی زباله‌های شهری، شناسایی ویژگی‌های زباله‌های تر و خشک و تصفیهٔ پایدار زباله‌ها می‌شوند. طراحی چنین سیستمی باعث دستیابی به عملکرد رضایت‌بخش در مدیریت زباله از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی می‌شود(Fatima et al., 2020). سیستم‌های تولیدی آینده باید انعطاف‌پذیر باشند تا از داده‌های تولیدشده نهایت استفاده را بکنند و تقاضاهای بازار، که دائماً در حال تغییرند، را جوابگو باشند و همچنین قدرت رقابت در بازار را به دست بیاورند و سهم بازار خود را افزایش دهند (Theorin et al., 2017). برای اینکه صنایع در بازارها رقابت کنند، باید مجهز به خطوط تولید کاملی ازجمله فناوری‌های اتوماسیون در خطوط تولید باشند و در صورت نیاز بدون از دست دادن زمان، پیکربندی یا تغییر کاربری را انجام دهند (Pederson et al., 2016). با گسترش روزافزون فناوری‌های صنعت ۴,۰ در کسب و کارها، فرآیندهای تصمیم‌گیری در آنها متحول شده و این نقش بسیار مهمی در بهبود کیفیت فرایندهای تولید و عملکرد فرایند فنی و صرفه‌جویی اقتصادی داشته است (Dibona et al., 2021). فناوری‌هایی چون هوش مصنوعی، تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ و اینترنت اشیا، مهم‌ترین خدمات فناوری‌های صنعت ۴,۰ برای بهبود پایداری در صنایع کوچک و متوسط محسوب می‌شوند (Pandya et al., 2024).

پوزی و همکاران[۱۳] (۲۰۲۳)، بهبود مستمر با مدیریت ناب را عامل موفقیت حیاتی برای رقابت مبتنی بر کیفیت دانسته و انعطاف‌پذیری برای پیاده‌سازی صنعت ۴,۰ در صنایع تولیدی را نتیجه گرفته‌اند؛ زیرا صنعت ۴,۰ از هر دو سیستم تولید ناب و چابک پشتیبانی می‌کند، به‌کارگیری آن عمدتاً با رقابت‌پذیری موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود و با تولید چابک، انعطاف‌پذیری را به‌طور عمده افزایش می‌دهد (Ding et al., 2023). درمجموع از پیشینهٔ پژوهش‌ها (جدول۱) ملاحظه می‌شود که تحلیل چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴,۰ در صنایع کوچک و متوسط،

به‌ویژه برای استان خاصی در راستای عملیات اخلاقی و پایداری محیط‌زیست در شرایط عدم قطعیت، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره وجود ندارد.

جدول ۱- پیشینه و شکاف تحقیقاتی

Table 1- Research gap

مؤلف	سال	هدف پژوهش	روش	نتایج
یائو و همکاران[۱۴]	۲۰۲۴	بررسی چالش‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در صنعت ۴,۰	روش‌های آماری	راهکار جامعه و صنعت ۵,۰ ارائه‌شده ازطریق خدمات ابری با راه‌حل‌های هوشمند، منعطف، پایدار و انسان‌محور است.
جوشی و همکاران[۱۵]	۲۰۲۴	بررسی چالش‌های فناوری‌های صنعت ۴,۰ در شرکت‌های کوچک و متوسط	آماری	ادغام استراتژی‌های مخارج عملیاتی با فن‌آوری‌های صنعت ۴,۰ در صنایع کوچک و متوسط کشورهای در حال توسعه، به ارتقای بهره‌وری، کیفیت و انعطاف‌پذیری و غیره منجر می‌شود.
سینگ و کومار[۱۶]	۲۰۲۰	بررسی موضوعات مختلف استراتژیک برای اجرای موفقیت‌آمیز استراتژی مدیریت زنجیرهٔ تأمین(SCM) در SMEهای کشور هند	روش‌های آماری	مدیریت ارتباط با مشتریان، منابع سازمان و مدیریت موجودی‌ها رویکردهای اصلی SCM هستند.
یاداو و همکاران[۱۷]	۲۰۲۰	توسعهٔ چارچوبی برای غلبه بر چالش‌های SCM ازطریق صنعت ۴,۰	روش بهترین-بدترین و الکتره	چالش‌های مدیریتی و سازمانی و اقتصادی، حیاتی‌ترین چالش‌ها برای پذیرش SCM هستند.
تیواری و خان[۱۸]	۲۰۲۰	بررسی حسابداری و گزارشگری پایداری در صنعت ۴,۰	هوش مصنوعی	صنعت ۴,۰ مزایای زیادی را در زمینه‌های اتوماسیون و بهره‌وری عملیات در حسابداری و گزارشگری پایداری ارائه می‌دهد.
مانی و همکاران[۱۹]	۲۰۲۰	مطالعهٔ رابطه بین شیوه‌های پایداری اجتماعی زنجیرهٔ تأمین و عملکرد زنجیرهٔ تأمین در SMEs	مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر کواریانس	وجود رابطهٔ مثبت بین شیوه‌های پایداری اجتماعی و عملکرد زنجیرهٔ تأمین
گوارنیری و تروجان[۲۰]	۲۰۱۹	تصمیم‌گیری دربارهٔ انتخاب تأمین‌کننده براساس معیارهای اجتماعی، اخلاقی و زیست‌محیطی	روش سلسله‌مراتبی والکتره	ارائهٔ یک مدل سیستماتیک و جامع برای فرایندهای تصمیم‌گیری در انتخاب تأمین‌کننده با ابعاد پایداری
سانگوان و همکاران[۲۱]	۲۰۱۹	توسعهٔ یک چارچوب KPI برای ارزیابی پایداری‌های تولیدی	تحلیل عاملی اکتشافی	شناسایی ۱۲۱ شاخص ارزیابی عملکرد کلیدی برای ارزیابی پایداری سازمان‌های تولیدی
لوترا و مانگلا[۲۲]	۲۰۱۸	شناسایی چالش‌های کلیدی برای ابتکارات صنعت ۴	تحلیل عاملی توضیحی – تحلیل سلسله‌مراتبی	چالش‌های سازمانی دارای بیشترین اهمیت و پس از آن چالش‌های فناوری، چالش‌های استراتژیک و مسائل حقوقی و اخلاقی قرار دارند.
باتالیا و همکاران[۲۳]	۲۰۱۸	بررسی نقش سرمایه‌گذاری‌های تحقیق و توسعه بر رشد SMEs	رگرسیون چندگانه	تأثیر منفی ترکیب سرمایه‌گذاری R&D بالا و فعالیت‌های صادراتی بالا بر رشد درآمدهای SMEs
مولر و همکاران[۲۴]	۲۰۱۸	بررسی فرصت‌ها و چالش‌های مرتبط با صنعت ۴,۰ در زمینهٔ پایداری	معادلات ساختاری	فرصت‌های استراتژیک، عملیاتی، محیطی و اجتماعی محرک‌های مثبت پیاده‌سازی صنعت ۴,۰ هستند که چالش‌ها مانع پیشرفت می‌شوند.
مکتدر و همکاران[۲۵]	۲۰۱۸	ارزیابی چالش‌ها برای اجرای صنعت ۴,۰	روش بهترین-بدترین	فقدان زیرساخت‌های فناوری مهم‌ترین چالش و مانع اجرای صنعت ۴,۰ می‌شود.

۳- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر ازنظر هدف کاربردی و ازنظر ماهیت توصیفی است. با توجه به هدف شناسایی و اهمیت نسبی چالش‌های اصلی و تأثیرگذار نسبت‌به تأثیرپذیرهای مرتبط و تعامل بین آنها برای فعالیت‌های پایداری و اخلاقی صنعت ۴,۰ در صنایع مستقر شهرک‌های صنعتی استان آذربایجان شرقی، از بین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، روش دیمتل انتخاب و برای افزایش دقت در ارزیابی چالش‌ها، ازنظر کارشناسان فعال در صنایع مربوطهٔ روش فازی در آن استفاده شد. در این زمینه فعالیت‌های پایداری محیط‌زیست و اخلاقی در کاهش ضایعات، استفادهٔ بهینه از منابع، مسائل زیست‌محیطی و افزایش رضایت مصرف‌کنندگان مطابق چهارمین انقلاب صنعتی است. درمجموع تحلیل چالش‌ها با توجه به هدف بررسی از روش تصمیم‌گیری چند معیاره دیمتل فازی انجام شده است تا روابط تعاملی میان آنها و ارائهٔ دسته‌بندی عوامل علت (تأثیرگذارها) و معلولی (تأثیرپذیرها) تعیین شوند. به‌طور خلاصه مراحل به‌کارگیری روش دیمتل فازی به‌صورت زیر است.

۳-۱-گام‌های رویکرد دیمتل فازی[۲۶]

مراحل روش انتخاب‌شده پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکل ۲- روش دیمتل فازی

Fig.2- Fuzzy Dematel Method

گام اول – شناسایی چالش‌ها و ساخت مقیاس فازی

با استفاده از نظرات خبرگان و سوابق و مطالعات گذشته دربارهٔ مسئلهٔ مدنظر، اقدام به استخراج عوامل و چالش‌های موجود و مؤثر شده است تا به این ترتیب عوامل مؤثر شناسایی شوند و با اعداد منطق فازی بعد از ارزیابی خبرگان مربوطه، منظور شده است.

گام دوم – محاسبهٔ ماتریس ارتباطات مستقیم فازی

ماتریس ارتباط مستقیم با توجه به مقایسه‌های جفتی معیارها از سوی متخصصان، با استفاده از یک مقیاس زبانی فازی پنج نقطه‌ای از ۰ تا ۴ به دست می‌آید که بیشترین روش استفاده‌شده در تحقیقات بوده است. مطابق جدول۲، ماتریس ارتباط مستقیم فازی D با محاسبهٔ میانگین نظرات متخصصان به دست می‌آید و سپس به یک عدد فازی مثلثی تبدیل می‌شود.

جدول۲ - مقیاس زبانی فازی

Table 2 - Fuzzy Linguistic Scale

اصطلاحات زبانی	نمرهٔ تأثیرگذاری	عدد فازی مثلثی
بدون تأثیر	۰	(۰,۰,۰/۲۵)
تأثیر خیلی کم	۱	(۰,۰/۲۵,۰/۵)
تأثیر کم	۲	(۰/۲۵,۰/۵,۰/۷۵)
تأثیر زیاد	۳	(۰/۵,۰/۷,۱)
تأثیر خیلی زیاد	۴	(۰/۷۵,۱,۱)

گام سوم – نرمال‌سازی ماتریس ارتباطات مستقیم فازی

ماتریس ارتباط مستقیم نرمال‌شدهٔ N در این مرحله محاسبه می‌شود. جمع سطری درایه‌های ماتریس N محاسبه و معکوس بیشترین آن در درایه‌های ماتریس N ضرب می‌شود. با این کار شدت نسبی حاکم بر روابط مستقیم تعیین می‌شود.

$$\alpha = \frac{1}{max \sum_{j=1}^{n} a_{ij}} \qquad (۱)$$

$$N = \alpha . M$$

گام چهارم – غیرفازی‌سازی

از روش BNP[۲۷] برای فرایند فازی‌زدایی استفاده شد. BNP یک عدد فازی a=(l,m,u) به‌صورت زیر است:

$$BNP = l + \frac{(u-l)+(m-l)}{۳} \qquad (۲)$$

$$BNP = l + \frac{(u-l)+(m-l)}{۳}$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

گام پنجم – محاسبهٔ ماتریس روابط کل

ماتریس ارتباط کلی T از ماتریس ارتباط مستقیم نرمال‌شده به دست می‌آید.

$$T = N + N^2 + N^3 + \cdots + N^n = \frac{N(I-N)^n}{I-N} = \frac{N}{I-N} = N(I-N)^{-1} \qquad (۳)$$

$$\lim_{n\to\infty} N^n = 0$$

گام ششم – محاسبهٔ مجموع سطرها D و ستون‌ها R و محاسبهٔ D-R و D+R

مجموع سطر و مجموع ستون‌ها به‌طور جداگانه با D و R در ماتریس ارتباط کلی T، با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$D = \left[\sum_{i=1}^{n} t_{ij}\right]_{n*1} = [t_i]_{n*1} \quad (۴)$$

$$R = \left[\sum_{i=1}^{n} t_{ij}\right]_{n*1} = [t_j]_{n*1} \quad (۵)$$

- D: جمع سطری درایه‌ها، برای هر عامل میزان تأثیرگذاری آن بر دیگر عناصر است.
- R: جمع ستونی درایه‌ها، برای هر عامل شدت تأثیرپذیری عامل مذکور از دیگر عناصر است.
- D+R: بردار برتری و اهمیت نسبی عامل و میزان تأثیر و تأثر عامل مدنظر در سیستم است. به‌عبارتی هرچه مقدار D+R بیشتر باشد، آن عامل تعامل بیشتری با دیگر عناصر سیستم دارد.
- D-R: بردار ارتباط (میزان تأثیرگذاری منهای میزان تأثیرپذیری) است و مقدار خالص تأثیرگذاری هر عامل بر عناصر دیگر را نشان می‌دهد.

اگر $D > R \rightarrow D - R > ۰$ باشد، آنگاه یک عامل تأثیرگذار، قطعی و علت است.

اگر $D < R \rightarrow D - R < ۰$ باشد، آنگاه یک عامل تأثیرپذیر، قطعی و معلول است.

گام هفتم – به دست آوردن نمودار روابط علت و معلول

نمودار علی براساس ترسیم زوج مرتب (D-R, D+R) به دست می‌آید. برای این کار یک دستگاه مختصات دکارتی با محور طولی D+R و محور عرضی D-R رسم و در آن موقعیت هر عامل با نقطه‌ای به مختصات (D-R, D+R) تعیین می‌شود. در جدول ۳، جزئیات و اطلاعات پژوهش مشخص شده است.

جدول ۳- جزئیات و اطلاعات پژوهش

Table 3- Details And Information Of The Research

نوع مطالعه	هدف تحقیق	جامعه و نمونهٔ آماری	شیوهٔ نمونه‌گیری	حجم نمونه	ابزار گردآوری	روش تحلیل
کمی	شناسایی و تحلیل چالش‌های صنعت ۴,۰ در عملیات اخلاقی و پایدار	صنایع کوچک و متوسط در شهرک‌های صنعتی استان آذربایجان شرقی	تصادفی	۳۴۵ نفر	پرسش‌نامهٔ مقایسات زوجی	دیمتل فازی

۴- یافته‌ها

به‌منظور شناسایی و تحلیل چالش‌های اصلی و کاربردی فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم برای عملیات اخلاقی و پایداری در صنایع مستقر در شهرک‌های صنعتی مدنظر، اقدام به تکمیل پرسش‌نامه‌های مقایسات زوجی از سوی خبرگان مربوطه در این حوزه، با تأیید اولیهٔ خبرگان شد. بعد از بررسی پژوهش‌ها و نظرات کارشناسان صنعتی و دانشگاهی، تعداد ۱۵ چالش کلیدی حمایت در جهت پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴,۰ در صنایع مستقر در شهرک‌های صنعتی، برای فعالیت‌ها و عملیات اخلاقی و پایداری محیط‌زیست شناسایی و معرفی شد. این ۱۵ چالش کلیدی به‌همراه منابع آنها در جدول ۴ ملاحظه می‌شود.

جدول ۴- شناسایی چالش‌های فناوری‌های صنعت ۴

Table 4- Identifying The Challenges Of Industry Technologies 4

کد	چالش	منبع
چالش ۱ Chn۱	نبود آگاهی دربارهٔ سهم صنعت ۴,۰	آلمادا-لوبو[۲۸] (۲۰۱۶) - هوفمان و روش[۲۹] (۲۰۱۷) - لوترا و مانگلا (۲۰۱۸) - جبور و همکاران[۳۰] (۲۰۱۸) - لیائو و همکاران[۳۱] (۲۰۱۸) - دوتا و همکاران[۳۲] (۲۰۲۰) - بهاتیا و همکاران[۳۳] (۲۰۲۰) - یاداو و همکاران (۲۰۲۰)
چالش ۲ Chn۲	نبود پشتیبانی مدیریت برای صنعت ۴,۰	لوترا و مانگلا (۲۰۱۸) - مورا و همکاران[۳۴] (۲۰۲۰) - ترنر و همکاران[۳۵] (۲۰۱۹) - کومار[۳۶] (۲۰۲۰)
چالش ۳ Chn۳	هزینهٔ بالای فناوری‌های صنعت ۴,۰	مارکز و همکاران[۳۷] (۲۰۱۷) - داوسون[۳۸] (۲۰۱۴) - موکتادیر و همکاران (۲۰۱۸) - کومار (۲۰۲۰) -دباغ و نصیری فرد[۳۹] (۲۰۱۹)- بهاتیا و همکاران (۲۰۲۰) - یاداو و همکاران (۲۰۲۰)
چالش ۴ Chn۴	اختصاص بودجهٔ پایین برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های صنعت ۴,۰	موکتادیر و همکاران (۲۰۱۸) - چین و همکاران[۴۰] (۲۰۲۰) - (گارسیا-موئینا و همکاران[۴۱] (۲۰۱۸)
چالش ۵ Chn۵	نبود آگاهی دربارهٔ سیاست‌ها و پایداری دولت‌ها برای صنعت ۴,۰	لوترا و مانگلا (۲۰۱۸) - راوش و همکاران[۴۲] (۲۰۱۹) - چوهان و همکاران[۴۳] (۲۰۲۱)
چالش ۶ Chn۶	تخصیص‌ندادن منابع برای تحقیق و توسعه دربارهٔ فناوری‌های صنعت ۴,۰	موکتادیر و همکاران (۲۰۱۸) - آلمادا-لوبو (۲۰۱۶) - شوآب و همکاران[۴۴] (۲۰۱۹) - دوتا و همکاران (۲۰۲۰)
چالش ۷ Chn۷	نبود برنامه‌ریزی بلندمدت برای پذیرش فناوری صنعت ۴,۰	مولر و همکاران (۲۰۱۸) - لوترا و مانگلا (۲۰۱۸) - کومار (۲۰۲۰)
چالش ۸ Chn۸	نبود انگیزهٔ مشتریان OEM/ها[۴۵] دربارهٔ پذیرش فناوری‌های صنعت ۴,۰	موکتادیر و همکاران (۲۰۱۸)- مارکز و همکاران (۲۰۱۷) - دوتا و همکاران (۲۰۲۰) - جبور و همکاران[۴۶] (۲۰۱۸) - شاشی و همکاران[۴۷] (۲۰۱۹)
چالش ۹ Chn۹	نبود زیرساخت مبتنی بر فناوری اطلاعات (نرم‌افزار یا سخت‌افزار)	پفول و همکاران[۴۸] (۲۰۱۷)
چالش ۱۰ Chn۱۰	نبود نیروی کار آموزش‌دیده	سامر[۴۹] (۲۰۱۵) - لوترا و مانگلا (۲۰۱۸) - مولر و همکاران (۲۰۱۸) صالحی[۵۰] (۲۰۱۴)- بهاتیا و همکاران (۲۰۲۰)
چالش ۱۱ Chn۱۱	نبود هماهنگی و همکاری بین شرکای زنجیرهٔ تأمین	وانگ و همکاران[۵۱] (۲۰۱۶) - موکتادیر و همکاران (۲۰۱۸) - ززلکا و همکاران[۵۲] (۲۰۱۶) - بگ و همکاران[۵۳] (۲۰۲۱) - کومار (۲۰۲۰)
چالش ۱۲ Chn۱۲	ترس از بیکاری و کاهش نیروی کار	ساتاپاتی[۵۴] (۲۰۱۷) - ززلکا و همکاران (۲۰۱۶) - شین و همکاران[۵۵] (۲۰۱۹) - کومار (۲۰۲۰) - سزارینو و همکاران (۲۰۱۹)[۵۶]
چالش ۱۳ Chn۱۳	ترس از شکست فناوری‌های صنعت ۴,۰	ساتاپاتی (۲۰۱۷)- پفول و همکاران (۲۰۱۷)- جین و همکاران (۲۰۱۷) - یاداو و همکاران (۲۰۲۰)- سزارینو و همکاران (۲۰۱۹)
چالش ۱۴ Chn۱۴	نبود راه‌حل‌های جایگزین برای شکست فناوری	داوسون (۲۰۱۴) - موکتادیر و همکاران (۲۰۱۸) - کومار (۲۰۲۰)
چالش ۱۵ Chn۱۵	ترس از عدم قطعیت تقاضا به‌دلیل اختلالات بازار	وانگ و همکاران (۲۰۱۶)- تئورین و همکاران[۵۷] (۲۰۱۷) - لوترا و مانگلا (۲۰۱۸)

جدول ۵- دسته بندی چالش‌های فناوری‌های صنعت ۴,۰

Table 5- Classification The Challenges Of Industry Technologies 4.0

کد	چالش	دسته‌بندی چالش‌ها
چالش ۴	اختصاص بودجهٔ پایین برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های صنعت ۴,۰	چالش‌های مرتبط با اقتصاد دایره‌ای
چالش ۵	نبود آگاهی دربارهٔ سیاست‌ها و پایداری دولت‌ها برای صنعت ۴,۰	
چالش ۱۵	ترس از عدم قطعیت تقاضا به‌دلیل اختلالات بازار	
چالش ۱	نبود آگاهی دربارهٔ سهم صنعت ۴,۰	چالش‌های مرتبط با عملیات اخلاقی و پایدار
چالش ۱۲	ترس از بیکاری و کاهش نیروی کار	
چالش ۲	نبود پشتیبانی مدیریت برای صنعت ۴,۰	چالش‌های مرتبط با صنایع کوچک و متوسط
چالش ۳	هزینهٔ بالای فناوری‌های صنعت ۴,۰	
چالش ۸	نبود انگیزهٔ مشتریان /OEM ها۵۸ دربارهٔ پذیرش فناوری‌های صنعت ۴,۰	
چالش ۹	نبود زیرساخت مبتنی بر فناوری اطلاعات (نرم‌افزار یا سخت‌افزار)	چالش‌های مرتبط با فناوری
چالش ۱۳	ترس از شکست فناوری‌های صنعت ۴,۰	
چالش ۱۰	نبود نیروی کار آموزش‌دیده	چالش‌های مرتبط با منابع انسانی
چالش ۵	نبود آگاهی دربارهٔ سیاست‌ها و پایداری دولت‌ها برای صنعت ۴,۰	چالش‌های مرتبط با مدیریت
چالش ۶	تخصیص‌ندادن منابع برای تحقیق و توسعه دربارهٔ فناوری‌های صنعت ۴,۰	
چالش ۷	نبود برنامه‌ریزی بلندمدت برای پذیرش فناوری صنعت ۴,۰	
چالش ۱۱	نبود هماهنگی و همکاری بین شرکای زنجیرهٔ تأمین	

ابتدا ماتریس میانگین پاسخ‌ها، همانا ماتریس ارتباطات مستقیم چالش‌های شناسایی‌شده محاسبه شدند. ماتریس ارتباطات مستقیم فازی یک ابزار مفید برای تحلیل روابط بین متغیرهاست که امروزه از منطق فازی برای نمایش این روابط استفاده می‌شود. در این ماتریس، هر عنصر به‌صورت یک عدد فازی بین ۰ و ۱ نمایش داده شده است که نشانگر قدرت ارتباط بین دو متغیر است. این اعداد مقادیر کمتر از ۰، برابر با ۰ و بیشتر از ۱ نیز هستند. با تحلیل ماتریس ارتباطات مستقیم فازی مشخص می‌شود که چه متغیرهایی با یکدیگر به‌شدت مرتبط‌اند و چه متغیرهایی کمتر ارتباط دارند. این اطلاعات در فرایند تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی مفید است و به بهبود عملکرد سیستم‌ها و فرایندها کمک می‌کند. بعد از محاسبهٔ ماتریس ارتباطات مستقیم فازی، با نرمال‌سازی آن، ماتریس ارتباطات مستقیم نرمال فازی برای نمایش ارتباطات بین متغیرها استفاده می‌شود. این ماتریس برای نمایش قدرت ارتباطات بین متغیرها و برای تحلیل و پیش‌بینی روابط بین متغیرها استفاده می‌شود. عناصر ماتریس ارتباطات مستقیم نرمال‌شده، نشانگر قدرت ارتباط بین هر زوج از متغیرهاست و مقادیر آنها بین ۰ و ۱ قرار دارد؛ به این صورت که مقدار ۱ نشان‌دهندهٔ ارتباط کامل و مقدار ۰ نشان‌دهندهٔ نبود ارتباط است؛ سپس ماتریس ارتباطات کل محاسبه و ابزار تحلیلی برای مدل‌سازی و تحلیل روابط بین متغیرها استفاده می‌شود. هر عنصر این ماتریس نشان‌دهندهٔ ارتباط بین دو متغیر است و با استفاده از این، به بهبود عملکرد و بهینه‌سازی فرایندهای مختلف در سیستم‌های پیچیده کمک می‌شود. در این مرحله بعد از محاسبهٔ ماتریس ارتباطات کل، اقدام به فازی زدایی می‌شود و برای شناسایی تأثیرگذارترین (D) و تأثیرپذیرترین (R) عامل چالشی، ابتدا با محاسبهٔ مجموع سطرها (D) و ستون‌ها (R) از ماتریس ارتباطات استفاده و در ادامه اهمیت تعاملی چالش‌ها (D+R) و خالص تأثیرگذاری، همانا ضریب نفوذ (D-R) در جداول ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود.

جدول ۶- مجموع سطرها (تأثیرگذارD) و ستون‌ها (تأثیرپذیر R)

Table 6- Sum Of Rows (D) And Columns (R)

چالش‌ها	Di	Defuzzy(Di)	Rj	Defuzzy(Ri)
چالش ۱	(۰/۰۴۲۸,۰/۱۱۰۱,۰/۲۵۲۶)	۰/۱۳۵۱۴	(۰/۰۰۶۱,۰/۰۲۴,۰/۱۱۴۲)	۰/۰۴۸۱۱
چالش ۲	(۰/۰۲۳,۰/۰۶۹۹,۰/۲۱۴۶)	۰/۱۰۲۴۹	(۰/۰۱۰۲,۰/۰۳۵۲,۰/۱۳۹)	۰/۰۶۱۴۵
چالش ۳	(۰/۰۱۲۴,۰/۰۴۵۷,۰/۱۷۱۶)	۰/۰۷۶۵۵	(۰/۰۱۷۲,۰/۰۵۲۷,۰/۱۷۰۹)	۰/۰۸۰۲۶
چالش ۴	(۰/۰۰۸۵,۰/۰۳۷۶,۰/۱۶۱)	۰/۰۶۹۰۲	(۰/۰۱۶۲,۰/۰۴۷۹,۰/۱۵۹۴)	۰/۰۷۴۵۳
چالش ۵	(۰/۰۲۶۹,۰/۰۷۷۵,۰/۲۲۲)	۰/۱۰۸۷۹	(۰/۰۰۶,۰/۰۲۲۷,۰/۱۰۷۹)	۰/۰۴۵۵۳
چالش ۶	(۰/۰۰۸۵,۰/۰۳۷۵,۰/۱۶۱۹)	۰/۰۶۹۳۱	(۰/۰۱۳۹,۰/۰۴۴۲,۰/۱۵۳۱)	۰/۰۷۰۴
چالش ۷	(۰/۰۱۱۱,۰/۰۴۳۱,۰/۱۷۱۸)	۰/۰۷۵۳۳	(۰/۰۱۶۵,۰/۰۵۲۲,۰/۱۷۲)	۰/۰۸۰۲
چالش ۸	(۰/۰۰۰۲,۰/۰۰۲۷,۰/۰۵۳۴)	۰/۰۱۸۷۴	(۰/۰۱۶۶,۰/۰۵۳۳,۰/۱۷۷۵)	۰/۰۸۲۴۴
چالش ۹	(۰/۰۳۴۷,۰/۰۹۳۴,۰/۲۳۶)	۰/۱۲۱۳۷	(۰/۰۰۷۸,۰/۰۲۶,۰/۱۱۴۱)	۰/۰۴۹۳
چالش ۱۰	(۰/۰۳۳۲,۰/۰۹۱۳,۰/۲۴۵۶)	۰/۱۲۳۳۶	(۰/۰۱۰۸,۰/۰۳۲۴,۰/۱۲۴۱)	۰/۰۵۵۷۸
چالش ۱۱	(۰/۰۰۰۵,۰/۰۰۵۴,۰/۰۶۴۵)	۰/۰۲۳۴۴	(۰/۰۱۷۳,۰/۰۵۵,۰/۱۸۱۲)	۰/۰۸۴۵۱
چالش ۱۲	(۰/۰۰۲۲,۰/۰۱۵۸,۰/۱۰۱۶)	۰/۰۳۹۸۷	(۰/۰۱۵۶,۰/۰۴۸۱,۰/۱۵۷۲)	۰/۰۷۳۶۲
چالش ۱۳	(۰/۰۰۴۳,۰/۰۲۱,۰/۱۱۴۸)	۰/۰۴۶۷۱	(۰/۰۱۷۹,۰/۰۵۲۷,۰/۱۶۶۴)	۰/۰۷۹
چالش ۱۴	(۰/۰۰۴۶,۰/۰۱۶,۰/۰۹۲۳)	۰/۰۳۷۶۴	(۰/۰۱۵,۰/۰۴۹۹,۰/۱۷۳۸)	۰/۰۷۹۵۵
چالش ۱۵	(۰,۰/۰۰۱۶,۰/۰۴۹)	۰/۰۱۶۸۸	(۰/۰۲۵۸,۰/۰۷۲۳,۰/۲۰۱۸)	۰/۰۹۹۹۵

جدول ۷- مجموع تأثیرگذاری و تأثیرپذیری چالش‌ها

Table7- Total Impact On Challenges

چالش‌ها	عنوان	نتایج		
		ضریب نفوذ (تأثیرگذار (مثبت) و تأثیرپذیر(منفی))-D R	ضریب تعاملی و اهمیت نسبی (D+R)	رتبهٔ تعاملی
چالش ۱	نبود آگاهی دربارهٔ سهم صنعت ۴,۰	۰/۰۸۷۰۳	۰/۱۸۳۲۵	۱
چالش ۲	نبود پشتیبانی مدیریت برای صنعت ۴,۰	۰/۰۴۱۰۴	۰/۱۶۳۹۴	۴
چالش ۳	هزینهٔ بالای فناوری‌های صنعت ۴,۰	-۰/۰۰۳۷۱	۰/۱۵۶۸۱	۵
چالش ۴	اختصاص بودجهٔ پایین برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های صنعت ۴	-۰/۰۰۵۵۱	۰/۱۴۳۵۴	۸
چالش ۵	نبود آگاهی دربارهٔ سیاست‌ها و پایداری دولت‌ها برای صنعت ۴,۰	۰/۰۶۳۲۶	۰/۱۵۴۳۲	۷
چالش ۶	تخصیص‌ندادن منابع برای تحقیق و توسعه دربارهٔ فناوری‌های صنعت ۴,۰	-۰/۰۰۱۰۸	۰/۱۳۹۷۱	۹
چالش ۷	نبود برنامه‌ریزی بلندمدت برای پذیرش فناوری صنعت ۴,۰	-۰/۰۰۴۸۷	۰/۱۵۵۵۳	۶
چالش ۸	نبود انگیزهٔ مشتریان دربارهٔ پذیرش فناوری‌های صنعت ۴,۰	-۰/۰۶۳۷۱	۰/۱۰۱۱۸	۱۵
چالش ۹	نبود زیرساخت مبتنی بر فناوری اطلاعات (نرم‌افزار یا سخت‌افزار)	۰/۰۷۲۰۷	۰/۱۷۰۶۷	۳
چالش ۱۰	نبود نیروی کار آموزش‌دیده	۰/۰۶۷۵۸	۰/۱۷۹۱۴	۲
چالش ۱۱	نبود هماهنگی و همکاری بین شرکای زنجیرهٔ تأمین	-۰/۰۶۱۰۷	۰/۱۰۷۹۵	۱۴
چالش ۱۲	ترس از بیکاری و کاهش نیروی کار	-۰/۰۳۳۷۵	۰/۱۱۳۵	۱۳
چالش ۱۳	ترس از شکست فناوری‌های صنعت ۴,۰	-۰/۰۳۲۲۹	۰/۱۲۵۷۱	۱۰
چالش ۱۴	نبود راه‌حل‌های جایگزین برای شکست فناوری	-۰/۰۴۱۹۱	۰/۱۱۷۱۹	۱۱
چالش ۱۵	ترس از عدم قطعیت تقاضا به‌دلیل اختلالات بازار	-۰/۰۸۳۰۷	۰/۱۱۶۸۴	۱۲

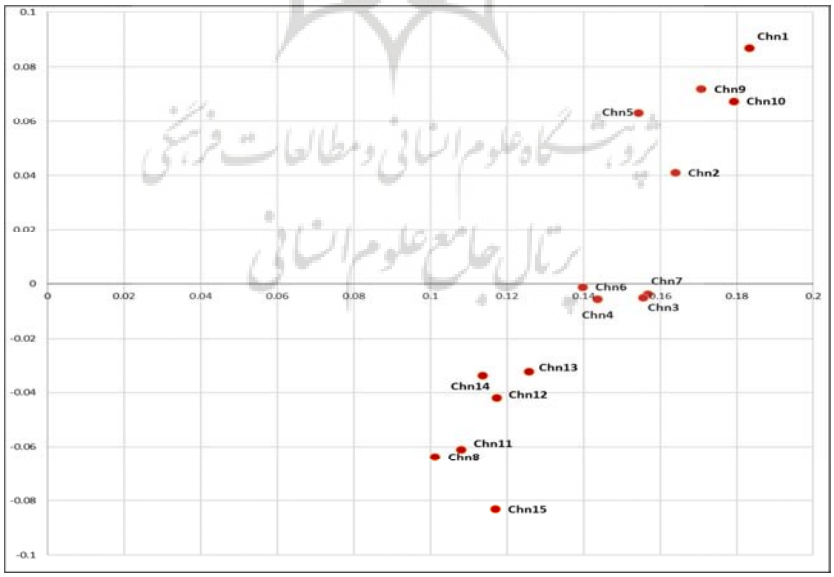
رتبه‌بندی چالش‌های صنایع مطالعه‌شده ازنظر ضرایب تعاملی(D+R) هر چالش نسبت‌به بقیه در جدول ۶ تعیین شده است که درجهٔ اهمیت چالش‌ها را نشان می‌دهد. از طرف دیگر از مقادیر ضریب نفوذ (D-R) چالش‌ها به دو دستهٔ علت (اثرگذار) و معلول (اثرپذیر) تقسیم می‌شود؛ یعنی اگر D-R>۰ باشد، چالش‌ها در گروه علت و تأثیرگذار قطعی و اگر D-R<۰ باشد، در گروه معلول و تأثیرپذیر قطعی تقسیم‌بندی می‌شوند. خلاصهٔ نتایج در جدول ۷ مشخص شده است.

جدول ۸- رتبه‌بندی چالش‌ها به دو گروه علت و معلول

Table 8- Ranking Of Challenges Into Two Groups Of Cause And Effect

رتبه	گروه علت (تأثیرگذار)	گروه معلول (تأثیرپذیر)
۱	چالش ۱	چالش ۱۵
۲	چالش ۹	چالش ۸
۳	چالش ۱۰	چالش ۱۱
۴	چالش ۵	چالش ۱۴
۵	چالش ۲	چالش ۱۲
۶	---	چالش ۱۳
۷	---	چالش ۴
۸	---	چالش ۷
۹	---	چالش ۳
۱۰	---	چالش ۶

درمجموع بعد از انجام محاسبات، در نمودار شکل ۳ روابط براساس زوج مرتب (D-R, D+R)، در محور افقی چالش‌های علت (مثبت) و معلول (منفی) و محور عمودی اهمیت نسبی چالش‌ها ترسیم شده است.



شکل ۳- نمودار علت و معلولی دیمتل فازی

Fig. 3 - Fuzzy Dematel Cause And Effect Diagram

براساس جدول ۵، چالش فقدان آگاهی دربارهٔ سهم صنعت ۴ دارای بیشترین مقدار D با مقدار ۰/۱۳۵۱۴ در رتبهٔ اول، چالش کمبود نیروی کار آموزش‌دیده با مقدار D برابر با ۰/۱۲۳۳۶ در رتبهٔ دوم و چالش فقدان زیرساخت مبتنی بر فناوری اطلاعات (سخت‌افزار یا نرم‌افزار) با مقدار D برابر با ۰/۱۲۱۳۷ در رتبهٔ سوم است؛ بنابراین به ترتیب تأثیرگذارترین عامل به حساب می‌آیند و چالش ترس از عدم قطعیت تقاضا به‌دلیل اختلالات بازار، دارای بیشترین مقدار R با مقدار ۰/۰۹۹۹۵ در رتبهٔ اول، چالش نبود هماهنگی و همکاری بین شرکای زنجیرهٔ تأمین با مقدار R برابر با ۰/۰۸۴۵۱ در رتبهٔ دوم و چالش نبود انگیزهٔ مشتریان /OEM ها[۵۹] دربارهٔ پذیرش فناوری‌های صنعت ۴,۰ با مقدار R برابر با ۰/۰۸۲۴۴ در رتبهٔ سوم قرار دارد؛ پس به ترتیب تأثیرپذیرترین عوامل‌اند. همچنین چالش نبود آگاهی دربارهٔ سهم صنعت ۴,۰ نیز دارای بیشترین مقدار D+R با مقدار ۰/۱۸۳۲۵ است؛ پس بیشترین ارتباط را با دیگر عوامل سیستم دارد.

بعد از استخراج نتایج و رتبه‌بندی چالش‌ها، مشاهده می‌شود که چالش نبود آگاهی دربارهٔ سهم صنعت ۴,۰ دارای بیشترین مقدار مثبت است. این چالش بحرانی‌ترین چالش در دسته‌بندی علت‌ها تلقی می‌شود. مقادیر دقیق دسته‌بندی چالش‌ها در دستهٔ علت و معلول در جدول ۷ مشخص شده است. چالش نبود زیرساخت مبتنی بر فناوری اطلاعات (نرم‌افزار یا سخت‌افزار)، چالش نبود نیروی کار آموزش‌دیده، چالش نبود آگاهی دربارهٔ سیاست‌ها و پایداری دولت‌ها برای صنعت ۴,۰ و چالش نبود پشتیبانی مدیریت برای صنعت ۴,۰، به ترتیب دومین، سومین، چهارمین و پنجمین چالش‌های رتبه‌بندی در دستهٔ علت‌اند. همچنین مشخص می‌شود که چالش ترس از عدم قطعیت تقاضا به‌دلیل اختلالات بازار، چالش نبود انگیزهٔ مشتریان یا تولیدکنندگان اصلی تجهیزات (OEM[۶۰]) دربارهٔ پذیرش فناوری‌های صنعت ۴,۰، چالش فقدان هماهنگی و همکاری بین شرکای زنجیرهٔ تأمین، چالش نبود راه‌حل‌های جایگزین برای شکست فناوری و چالش ترس از بیکاری و کاهش نیروی کار، به ترتیب پنج چالش رتبه‌بندی‌شده در دستهٔ معلول‌اند. مشاهدات و نتایج حاصل این پژوهش، به توسعهٔ چارچوبی برای تجزیه و تحلیل چالش‌های صنعت ۴,۰ و یافتن ارتباط متقابل بین چالش‌ها کمک می‌کند تا با تخصیص بهینهٔ منابع برای حل چالش‌های اولویت‌دار و برنامه‌ریزی‌های دقیق، باعث بهبود عملکرد صنایع SME شهرک‌های صنعتی و حتی در سطح کشور شود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۵- بحث

در پژوهش حاضر ۱۵ چالش برای کاربرد فناوری‌های صنعت ۴,۰ در صنایع کوچک و متوسط شهرک‌های صنعتی در شرایط عدم قطعیت شناسایی شدند. در این زمینه، به تحقیقات گذشته در سطح یک صنعت خاص با شرایط قطعی توجه شده است. مطالعهٔ یاداو و همکاران (۲۰۲۰)، تلاشی برای ارائهٔ چارچوبی برای غلبه بر چالش‌های زنجیرهٔ تأمین پایدار ازطریق اقدامات صنعت ۴,۰ و اقتصاد دایره‌ای بوده است که در آن تعداد ۲۸ چالش در حوزهٔ مدیریت زنجیرهٔ تأمین پایدار (SSCM[۶۱]) و ۲۲ راه‌حل را شناسایی کرده‌اند. آنها چالش‌های مدیریتی و سازمانی و چالش‌های اقتصادی را مهم‌ترین و حیاتی‌ترین چالش‌های SSCM معرفی کرده‌اند.

صنعت ۴، نسل چهارم انقلاب صنعتی شناخته می‌شود و تأثیرات گسترده‌ای بر اقتصاد دایره‌ای دارد. برخی از تأثیرات اصلی آن شامل افزایش بهره‌وری، تغییر در ساختار اشتغال، تحول در مدل‌های کسب و کار، تأثیرات بر

زنجیرهٔ تأمین و تغییر در رفتار مصرف‌کننده است. به‌طور کلی، صنعت ۴,۰ با ایجاد فرصت‌ها و چالش‌های جدید، تأثیرات گسترده‌ای بر اقتصاد دایره‌ای دارد و به تحولات بزرگ در این حوزه منجر می‌شود. مطالعهٔ ماچادو و همکاران[۶۲] (۲۰۲۰) نشان داده است که توسعهٔ پایدار و اقتصاد دایره‌ای دو موضوع بسیار مهم برای رقابت‌پذیری کسب و کارها به شمار می‌روند. تولید پایدار در صنعت ۴,۰ اهمیت بسیار زیادی دارد؛ زیرا با ترکیب فناوری‌های پیشرفته و مدیریت منابع بهینه، به تولید محصولات و خدمات با کارایی بالا و تأثیر کمتر با نگرش‌های اخلاقی بر محیط‌زیست دست می‌یابد. تحلیل تولید پایدار در صنعت ۴,۰ به موارد کارایی منابع، کاهش آثار زیست‌محیطی، طراحی محصولات پایدار و توسعهٔ فناوری‌های پایدار توجه دارد. ماچادو و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای دربارهٔ تولید پایدار در صنعت ۴,۰ نشان داده‌اند که مفاهیم تولید پایدار و استفاده از فناوری‌های جدید، صنعت ۴,۰ را قادر می‌کند تا تأثیرات مثبتی بر تمام ابعاد پایداری به‌صورت یکپارچه داشته باشد. همچنین جنبه‌های توسعهٔ مدل‌های کسب و کار، سیستم‌های تولید پایدار و دایره‌ای و زنجیرهٔ تأمین پایدار، طراحی محصول پایدار را با در دستور کار قرار دادن صنعت ۴,۰ پیاده‌سازی و عملیاتی می‌کند.

محققان و متخصصان با توجه به مزایای متعدد زیاد برای سازمان‌های تولیدی، اهمیت زیادی برای صنعت ۴,۰ قائل‌اند؛ اما هنوز به چالش‌ها و موانع پیاده‌سازی این صنعت به‌صورت کامل و جامع در عملیات تولید توجه نشده است. یکی از مهم‌ترین چاش‌های پیاده‌سازی صنعت ۴,۰ در صنایع کوچک و متوسط، چالش فقدان آگاهی و کمبود منابع انسانی ماهر است؛ با این حال، با برنامه‌ریزی مناسب، آموزش کارکنان، همکاری با شرکت‌ها و مؤسسات دیگر و بهره‌گیری از کمک‌های دولتی، صنایع کوچک و متوسط به‌خوبی از فواید صنعت ۴,۰ بهره‌مند می‌شوند. در این راستا نگوین و لوو[۶۳] (۲۰۲۰) مطالعه‌ای را با هدف بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش صنعت ۴,۰ ازطریق صنایع کوچک و متوسط در شهر هوشی مین ویتنام بررسی کرده‌اند. یافته‌های آنها نشان داده است که عوامل فقدان آگاهی‌ها و اطلاعات لازم دربارهٔ صنعت ۴,۰، کمبود نیروی انسانی ماهر و توانا، درک به‌موقع هزینه، هزینهٔ صرفه‌جویی‌شده، بهبود کیفیت محصول، زمان صرفه‌جویی‌شده، منابع کسب و کار و شرایط محیط کسب و کار، سودمندی درک‌شده و افزایش ارتباط با مشتری، همگی تأثیر مثبت و معناداری بر پذیرش واقعی صنعت ۴,۰ دارند.

برای رفع چالش نبود زیرساخت مبتنی بر فناوری اطلاعات در صنایع کوچک و متوسط (SMEs)، اولین اقدام تحلیل دقیق نیازهای فناوری اطلاعات و ارزیابی وضعیت فعلی زیرساخت‌هاست. این ارزیابی باید شامل بررسی‌های دقیق در زمینهٔ سخت‌افزار، نرم‌افزار و ظرفیت‌های شبکه‌ای باشد. با توجه به تحولات سریع فناوری، SMEs باید به‌روزرسانی مداوم زیرساخت‌ها را در دستور کار قرار دهند و از مزایای فناوری‌های جدید، مانند اینترنت اشیا و تحلیل داده‌های کلان بهره‌برداری کنند. در گام بعدی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مدرن، باید با توجه به فناوری‌های نوظهور مانند کلان‌داده و هوش مصنوعی باشد. ایجاد همکاری‌های استراتژیک با تأمین‌کنندگان فناوری، به SMEها کمک می‌کند تا راهکارهای مناسب و مقرون‌به‌صرفه‌ای را برای بهبود زیرساخت‌های خود پیدا کنند. آموزش و توانمندسازی پرسنل نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. برگزاری دوره‌های آموزشی و کارگاه‌های تخصصی در زمینهٔ فناوری‌های نوین، به افزایش قابلیت‌های نیروی کار و بهبود پذیرش فناوری‌های جدید کمک می‌کند. تدوین یک برنامهٔ استراتژیک فناوری اطلاعات، که شامل اهداف اندازه‌گیری‌شدنی و مسیرهای اجرایی

شفاف باشد، ضروری است. همچنین SMEs باید به جلب حمایت مالی از منابع مختلف، ازجمله سرمایه‌گذاری‌های خصوصی و حمایت‌های دولتی، توجه داشته باشند.

این اقدامات نه‌تنها به برطرف‌کردن چالش‌ها کمک می‌کند، زمینه‌ساز رشد و توسعهٔ پایدار در SMEs است و آنها را در مسیر تبدیل به بازیگران کلیدی در بازارهای رقابتی قرار می‌دهد.

برای رفع سومین چالش نبود نیروی کار آموزش‌دیده در صنایع کوچک و متوسط (SMEs)، اقداماتی به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

اولین اقدام، شناسایی نیازهای خاص مهارتی صنایع کوچک و متوسط است. این شناسایی باید شامل تحلیل مشاغل کلیدی و مهارت‌های مورد نیاز در زمینهٔ فناوری‌های جدید باشد؛ سپس، توسعهٔ برنامه‌های آموزشی و توانمندسازی با همکاری مؤسسات آموزشی و دانشگاه‌ها، به‌عنوان گام بعدی ضروری است. این برنامه‌ها باید به‌طور خاص بر مهارت‌های فنی و نرم‌افزاری تمرکز کنند که در پیاده‌سازی فناوری‌های جدید مؤثرند.

علاوه بر این، SMEs باید فرهنگ یادگیری مداوم را در سازمان خود تقویت کنند. برگزاری کارگاه‌های آموزشی منظم، دوره‌های آنلاین و برنامه‌های اشتغال‌آموزی به کارکنان کمک می‌کند تا مهارت‌های خود را به‌روز کنند و با تغییرات سریع فناوری هماهنگ شوند. همچنین ایجاد همکاری با نهادهای دولتی و سازمان‌های حرفه‌ای برای تأمین منابع مالی و فنی برای برنامه‌های آموزشی، بسیار مفید است. این همکاری‌ها به SMEs کمک می‌کند تا به منابع آموزشی و کارشناسان مجرب دسترسی پیدا کنند.

درنهایت برقراری سیستم‌های انگیزشی برای تشویق کارکنان، به شرکت در دوره‌های آموزشی و ارتقای مهارت‌ها، به بهبود کیفیت نیروی کار کمک می‌کند. با اجرای این اقدامات، SMEs به‌تدریج نیروی کار آموزش‌دیده و ماهر مورد نیاز را برای بهره‌برداری از فناوری‌های نوین فراهم می‌کنند و درنتیجه، به افزایش رقابت‌پذیری و موفقیت خود دست می‌یابند.

ازجمله موانع بالقوه‌ای سازمان‌های تولیدی در پذیرش صنعت ۴، شامل هزینه‌های پیاده‌سازی، نگرش سنتی و آمادگی‌نیافتن برای تغییر است؛ با این حال، سازمان‌های تولیدی با مدیریت مناسب تغییر، سرمایه‌گذاری در آموزش و توسعهٔ دانش فنی و توجه به امنیت داده‌ها، موانع فوق را برطرف می‌کنند و صنعت ۴ را می‌پذیرند. کمبل و همکاران[۶۴] (۲۰۲۰) تحقیقی در صنعت تولید هند با هدف تحلیل موانع بالقوه‌ای سازمان‌های تولیدی از پذیرش صنعت۴ را ارائه داده‌اند. آنها با استفاده از مدل‌سازی ساختاری تفسیری، روابط بین موانع را بررسی کرده‌اند. یافته‌های آنها شناسایی و طبقه‌بندی موانع مهم و تأثیرگذار را برای آشکارکردن آثار مستقیم و غیرمستقیم بر پذیرش صنعت۴ به‌صورت مفید نشان داده است.

۵-۱- **تحلیل** حساسیت

پنل[۶۵] (۱۹۹۷) در تحقیق «تحلیل حساسیت: استراتژی‌ها، روش‌ها، مفاهیم و مثال‌ها»، انجام تحلیل حساسیت را برای بررسی صحت و دقت نتایج تحقیقات، به‌جهت پیداکردن راه‌حل‌های بهینه برای تصمیم‌گیری‌های مؤثر مطرح کرده است. پژوهش حاضر از دو روش برای تحلیل حساسیت، یکی با تغییر وزن اختصاص داده شده به هر چالش و دومی با تغییر وزن اختصاص داده شده به هر کارشناس، استفاده کرده است. در این پژوهش براساس تحقیق شیا و

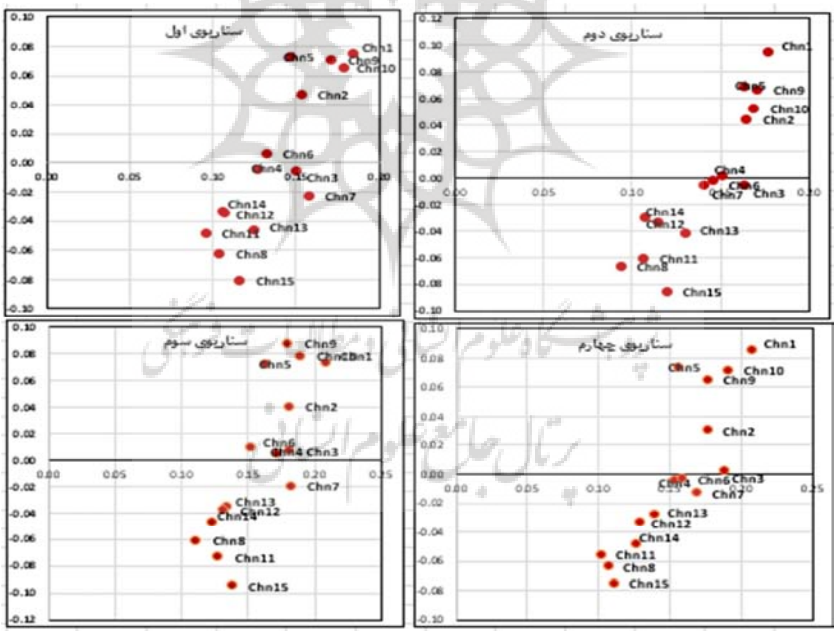
همکاران[۶۶] (۲۰۱۵)، از روش تغییر وزن اختصاص داده شده به هر کارشناس برای بررسی میزان قدرت و نیرومندی راه‌حل ارائه‌شده برای تحلیل روابط علت و معلولی چالش‌ها استفاده شده است. در این قسمت، تعداد سه نفر از کارشناسان شرکت‌کننده در این مطالعه به‌صورت تصادفی انتخاب و با رویکرد تغییر وزن برای هر کارشناس، پاسخ‌های آنها در ۴ سناریوی متفاوت اعمال شد که در حالت اول به هر کارشناس وزن برابر اختصاص داده شد؛ در حالت دوم و سوم و چهارم نیز به دو کارشناس وزن یکسان و به یک کارشناس وزن بالاتری اختصاص داده شد که این مشخصات در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۹- تغییر وزن کارشناسان در تحلیل حساسیت

Table 9- Change in expert weights in sensitivity analysis

شرح	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
کارشناس ۱	۰/۳۳	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵
کارشناس ۲	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۵	۰/۲۵
کارشناس ۳	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۵

بنابراین بعد از تعیین وزن برای کارشناسان در چهار سناریوی مختلف، محاسبات برای تجزیه و تحلیل حساسیت انجام شده است. بعد از این مرحله، برای هر سناریو چالش‌های علت و معلولی مطابق نمودارهای مربوطه رسم شد که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمودار علت و معلولی سناریوها – دیمتل فازی

Fig. 4- Cause And Effect Diagram Of Scenarios - Fuzzy Dematel

نتایج به دست آمده حاصل از این تحلیل حساسیت در جدول ۹ آورده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از سازگاری یافته‌های تحقیق است؛ زیرا با تحلیل حساسیت، تغییر درخور توجهی در نتایج تحت شرایط مختلف ملاحظه نشد که این نشان‌دهندهٔ قدرت و دقت نتایج این پژوهش است.

جدول ۱۰- نتایج تحلیل حساسیت دیمتل فازی

Table 10- Results of fuzzy DEMET sensitivity analysis

چالش‌ها	سناریوی اول		سناریوی دوم		سناریوی سوم		سناریوی چهارم	
	D+R	رتبه	D+R	رتبه	D+R	رتبه	D+R	رتبه
چالش ۱	۰/۱۸۵۹	۱	۰/۱۷۸۲	۱	۰/۲۱۰۴	۱	۰/۲۰۸۱	۱
چالش ۲	۰/۱۵۴۶	۵	۰/۱۶۶۲	۴	۰/۱۸۲۴	۵	۰/۱۷۷۳	۵
چالش ۳	۰/۱۵۲	۶	۰/۱۶۴۷	۵	۰/۱۸۳۶	۴	۰/۱۸۸۵	۳
چالش ۴	۰/۱۲۸۱	۹	۰/۱۵۱۹	۷	۰/۱۷۳۰	۷	۰/۱۵۴۶	۹
چالش ۵	۰/۱۴۸۰	۷	۰/۱۶۴۴	۶	۰/۱۶۵۴	۸	۰/۱۵۶۴	۸
چالش ۶	۰/۱۳۳۶	۸	۰/۱۴۷۱	۸	۰/۱۵۳۳	۹	۰/۱۵۹۸	۷
چالش ۷	۰/۱۵۹۰	۴	۰/۱۴۱۵	۹	۰/۱۸۳۸	۳	۰/۱۷۰۰	۶
چالش ۸	۰/۱۰۵۶	۱۴	۰/۰۹۴۹	۱۵	۰/۱۱۳۰	۱۵	۰/۱۰۷۳	۱۴
چالش ۹	۰/۱۷۲۹	۳	۰/۱۷۲۱	۲	۰/۱۸۱۸	۶	۰/۱۷۷۷	۴
چالش ۱۰	۰/۱۷۹۸	۲	۰/۱۷۰۲	۳	۰/۱۹۰۹	۲	۰/۱۹۲۱	۲
چالش ۱۱	۰/۰۹۶۹	۱۵	۰/۱۰۷۷	۱۴	۰/۱۲۹۶	۱۳	۰/۱۰۲۱	۱۵
چالش ۱۲	۰/۱۰۷۹	۱۲	۰/۱۰۸۴	۱۳	۰/۱۳۵۶	۱۱	۰/۱۳۰۲	۱۱
چالش ۱۳	۰/۱۲۶۴	۱۰	۰/۱۳۱۴	۱۰	۰/۱۳۳۶	۱۲	۰/۱۳۹۴	۱۰
چالش ۱۴	۰/۱۰۷۶	۱۳	۰/۱۱۵۸	۱۲	۰/۱۲۵۰	۱۴	۰/۱۲۷۵	۱۲
چالش ۱۵	۰/۱۱۷۷	۱۱	۰/۱۲۰۸	۱۱	۰/۱۳۹۷	۱۰	۰/۱۱۱۵	۱۳

۶-نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ۱۵ چالش اصلی فناوری‌های چهارمین انقلاب صنعتی با تأکید بر فعالیت‌ها و عملیات اخلاقی و پایداری صنایع کوچک و متوسط مستقر در شهرک‌های صنعتی استان آذربایجان شرقی، شناسایی و اولویت‌بندی شده است. برای اعتبارسنجی نتایج، از روش‌های تحلیل حساسیت تحت شرایط مختلف، مقایسه با اصول تحولی مدل RAMI 4.0 [۶۷] (مدل معماری مرجع صنعت ۴,۰) و همچنین جمع‌آوری نظرات ۲۰ نفر از خبرگان با استفاده از روش دلفی استفاده شده است. نتایج این ارزیابی‌ها نشان‌دهندهٔ تفاوت معناداری در نتایج نیست و هم‌راستایی یافته‌ها با اصول پیاده‌سازی RAMI 4.0 در سازمان‌ها، به‌عنوان راهنمای مؤثر برای تحول دیجیتال و همچنین تأیید نتایج از سوی خبرگان، اعتبار و صحت نتایج پژوهش را تأیید می‌کند.

از نتایج این پژوهش مشخص شد که چالش‌های عمده‌ای مانند فقدان آگاهی از نقش چهارمین انقلاب صنعتی، کمبود نیروی کار ماهر، کمبود زیرساخت‌های مبتنی بر فناوری اطلاعات، فقدان آگاهی از سیاست‌های صنعت ۴,۰ و نبود پشتیبانی مدیران برای پذیرش فناوری‌های صنعت ۴,۰، از مهم‌ترین چالش‌ها در صنایع مستقر در شهرک‌های

صنعتی‌اند و دیگر عوامل نیز، عوامل تأثیرپذیرند. بر این اساس، با برنامه‌ریزی مناسب برای بهبود عوامل تأثیرگذار، انتظار می‌رود که دیگر عوامل تأثیرپذیر نیز بهبود یابند؛ بنابراین صنایع کوچک و متوسط کشور برای دستیابی به استانداردهای صنایع اخلاقی و پایدار، نیازمند ارتقای آگاهی و اطلاعات خود دربارهٔ صنعت ۴٫۰ هستند. این صنایع باید با جذب نیروی کار آموزش‌دیده در این حوزه و ارتقای سطح دانش نیروهای فعلی خود ازطریق برگزاری دوره‌های آموزشی، اقدامات لازم را انجام دهند. در این زمینه، مراکز آموزشی علمی‌کاربردی و دانشگاه‌ها نقش بسزایی دارند. همچنین ضروری است که هماهنگی‌های مؤثری بین اعضای زنجیرهٔ تأمین، ازجمله امور مالی، سیاست‌های دولتی و حمایت‌های مدیریتی در حین پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴٫۰ ایجاد شود. براساس نتایج مطالعات پیشین، مشخص شد که نبود آگاهی دربارهٔ فناوری‌های هوشمند و چالش‌های پیاده‌سازی آنها در صنایع، نگرانی درخور توجهی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه ایجاد کرده است. به‌عبارتی، سازمان‌ها در کشورهای توسعه‌یافته به‌طور معمول از دانش، آگاهی و اطلاعات بیشتری در زمینهٔ فناوری‌های هوشمند و پیشرفته نسبت‌به کشورهای در حال توسعه برخوردارند.

نبود زیرساخت‌های فناوری اطلاعات (اعم از سخت‌افزار و نرم‌افزار)، یکی از چالش‌های اساسی در دستیابی به عملیات اخلاقی و پایدار در صنایع کوچک و متوسط شهرک‌های صنعتی است. این چالش با حمایت‌های مدیران و سیاست‌گذاران ازطریق تخصیص منابع مالی، اختصاص ردیف‌های بودجه‌ای مستقل و ارائهٔ تسهیلات کم‌بهره با دورهٔ بازپرداخت طولانی برطرف می‌شود. همچنین هزینه‌های بالای فناوری‌های صنعت ۴٫۰ که فراتر از توان بسیاری از این صنایع است، با به‌کارگیری نیروی کار تحصیل‌کردهٔ جوان و استفاده از محصولات شرکت‌های دانش‌بنیان کاهش می‌یابد. صنایع کوچک و متوسط معمولاً تصمیمات و استراتژی‌های خود را بر مبنای اهداف کوتاه‌مدت اتخاذ می‌کنند؛ اما این فرهنگ باید تغییر داده و بازبینی شود؛ زیرا یکی از عوامل کلیدی موفقیت در به‌کارگیری فناوری‌های صنعت ۴٫۰، برنامه‌ریزی‌های بلندمدت است که باید سرلوحهٔ مدیران این صنایع قرار گیرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از بررسی چالش‌های کسب و کارهای کوچک و متوسط (SMEs)، مشخص شده است که این صنایع ازنظر دانش و تخصص، همواره با کمبودهایی روبه‌رو هستند که آنها را در تدوین برنامه‌ها با مشکل مواجه می‌کند؛ بنابراین استفاده از مشاوران و استادان دانشگاه‌ها در این حوزه، کمک شایانی به آنها می‌کند. درنهایت برای اینکه شرکت‌های کوچک و متوسط در عرصهٔ جهانی موفق باشند، باید برای آیندهٔ خود برنامه‌ریزی و از فناوری‌های نوین صنعت ۴٫۰ برای دستیابی به عملیات اخلاقی و پایداری محیط‌زیست بهره‌برداری کنند. همچنین سیاست‌گذاران در سطح دولت‌ها باید توجه و اهمیت ویژه‌ای به این شرکت‌ها داشته باشند و با حمایت از تولیدات آنها، به استفاده از فناوری‌های صنعت ۴٫۰ تشویق کنند.

References

Almada-Lobo, B. (2016). The Industry 4.0 revolution and the future of manufacturing execution systems (MES). *Journal of Industrial Engineering and Management, 9*(3), 751-757. https://doi.org/10.3926/jiem.1994

Bag, S., Gupta, S., & Kumar, S. (2021). Industry 4.۰ adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. *International Journal of Production Economics, 231*. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107844

Battaglia, D., Neirotti, P., & Paolucci, E. (2018). The role of R&D investments and export on SMEs' growth: a domain ambidexterity perspective. *Management Decision, 56*(9), 1883-1903.

Bhatia, M., Jakhar, S., Mangla, S. K., & Gangwani, R. (2020). Sustainability in supply chain management: A comprehensive analysis of trends and future research. *Sustainability, 12*(4), 1024-1041. https://doi.org/10.3390/su12041024

Cezarino, L. O., Liboni, L. B., Oliveira Stefanelli, N., Oliveira, B. G., & Stocco, L. C. (2019). Diving into emerging economies bottleneck: Industry ٤.٠ and implications for circular economy. *Management Decision, 59*(8),1841-1862. https://doi.org/10.1108/MD-10-2018-1084

Chauhan, S. S., Sharma, N., & Singh, R. (2021). Role of Industry 4.0 in sustainable supply chain management: A systematic review. *Journal of Cleaner Production, 279,* 1238-1248. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123842

Chien, C. F., Tseng, M. L., Tan, R. R., Tan, K. H., & Velek, V. (2020). Sustainable supply chain management in the context of Industry 4.0. *Journal of Cleaner Production, 273*, 123-136. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123013

Garcia-Muiña, F. E., González-Sánchez, R., Ferrari, E., & Settembre-Blundo, D. (2018). Industry 4.0 and its influence on the sustainability of the supply chain. *Sustainability, 10*(10), 3746-3758. https://doi.org/10.3390/su10103746

Dabbagh, R., & Nasiri Fard, B. (2019). Vulnerable and safe points in crisis situations with a passive defense approach in Tabriz, Iran. *Journal of Rescue and Relief*, *11*(3), 214-33.

DiBona, G., Cesarotti, V., Arcese, G., & Gallo, T. (2021). Implementation of Industry 4.٠ technology: New opportunities and challenges for maintenance strategy. *Procedia Computer Science, 180*, 424-429. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.258

Ding, B., Ferras Hernandez, X., & Agell Jane, N. (2023). Combining lean and agile manufacturing competitive advantages through Industry 4.٠ technologies: an integrative approach. *Production planning & control, 34*(5), 442-458. https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1934587

Dawson, J. (2014). Industry 4.0: The Fourth Industrial Revolution. *Journal of Business & Economics Research, 12*(2), 11-18. https://doi.org/10.19030/jber.v12i2.8729

Dutta, P., Agarwal, R., & Singhal, M. (2020). A roadmap to Industry 4.0: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Processes, 59,* 1041-1054. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.021

Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., & Kumar Singh, R. (2020). Digital transformation priorities of India's discrete manufacturing SMEs – a conceptual study in perspective of Industry 4.٠. *Competitiveness Review, 30*, 289-314. https://doi.org/10.1108/CR-03-2019-0031

Fatimah, Y., Govindan, K., Murniningsih, R., & Setiawan, A. (2020). Industry 4.٠ based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia. *Journal of Cleaner Production, 269*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122263

George, A. S. (2024). The fourth industrial revolution: a primer on industry 4.0 and its transformative impact. *Partners Universal Innovative Research Publication, 2*(1), 16-40. doi.org/10.5281/zenodo.10671872

Guarnieri, P., & Trojan, F. (2019). Decision making on supplier selection based on social, ethical, and environmental criteria: A study in the textile industry. *Resources, Conservation and Recycling, 141*, 347-361.

Hassoun, A. A. -K.-M. (2023). The fourth industrial revolution in the food industry—Part I: Industry 4.٠ technologies. *Food Science and Nutrition*, 50-62. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2034735

Jabbour, A. B. L. D. S., Jabbour, C. J. C., Filho, M. G., & Roubaud, D. (2018). Environmental innovation and green supply chain management in Industry 4.0: A case study in the automotive industry. *Resources, Conservation and Recycling, 140*, 49-61. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.007

Jain, P., Shao, L., & Shin, H. (2017). The role of digitalization in sustainable supply chain management: A study on the manufacturing industry. *International Journal of Production Research, 55*(21), 6375-6393. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1325234

Liao, Y., Loures, E. D. F. R., Deschamps, F., Brezinski, G., & Venancio, A. (2018). Industry 4.0 and the impact on the supply chain. *International Journal of Production Research, 56*(1-2), 281-293. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1390357

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.

Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). Industry 4.۰ 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

Joshi, S., Sharma, M., Bartwal, S., Joshi, T., & Prasad, M. (2024). Critical challenges of integrating OPEX strategies with I4. 0 technologies in manufacturing SMEs: A few pieces of evidence from developing economies. *The TQM Journal, 36*(1), 108-138.

Jabbour, A. B. L. D. S., Jabbour, C. J. C., Foropon, C., & Filho, M. G. (2018). Environmental innovation and green supply chain management in industry 4.0: A case study in the automotive industry. *Resources, Conservation and Recycling, 140*, 49-61. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.007

Kamble, S., Gunasekaran, A., & Dhone, N. (2020). Industry 4.۰ and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. *International Journal of Production Research, 58*(5), 1319-1337. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630772

Kumar, R. (2020). Sustainable supply chain management in the era of digitalization: Issues and challenges. *Journal of Manufacturing Processes, 56*, 123-134. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.006

Kumar, R. (2020). Espousal of Industry 4.0 in Indian manufacturing organizations: Analysis of enablers. *Journal of Manufacturing Technology Management, 31*(5), 1034-1056. https://doi.org/10.1108/JMTM-05-2019-0262

Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry ٤.٠: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research, 58* (5), 1462-1448. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777

Mani, V., Jabbour, C. J. C., & Mani, K. T. (2020). Supply chain social sustainability in small and medium manufacturing enterprises and firms' performance: Empirical evidence from an emerging Asian economy. *International Journal of Production Economics, 227*, 107656.

Marques, A., Agostinho, C., Zacharewicz, G., & Jardim-Gonçalves, R. (2017). The role of Industry 4.0 in the future of manufacturing and the supply chain. *Procedia CIRP, 60*, 247-252. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.060

Moktadir, M. A., Ali, S. M., Kusi-Sarpong, S., & Shaikh, M. A. A. (2018). Assessing challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection. *Process safety and environmental protection, 117,* 730-741.

Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability, 10*(1), 247.

Mousavi, S. M., & Amiri Aghdaie, S. F. (2021). Marketing Research in the Fourth Industrial Revolution, Using "Big Data" Analytics and "Machine Learning" to Provide Value to the Customer. *New Marketing Research Journal, 10*(4), 37-54. https://doi.org/10.22108/nmrj.2020.122740.2109

Mura, M., Longo, M., & Zanni, S. (2020). Circular economy in Italian SMEs: A multi-method study. *Journal of Cleaner Production, 245*, 118821. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118821

Nguyen, X. T., & LUU, Q. K. (2020). Factors affecting adoption of industry 4.۰ by small-and medium-sized enterprises: A case in Ho Chi Minh city, Vietnam. *The Journal of Asian Finance, Economics and Business, 7*(6), 255-264. doi:10.13106/jafeb.2020.vol7.no6.255

Pandya, D., Kumar, G., & Singh, S. (2024). Aligning sustainability goals of industrial operations and marketing in Industry 4.0 environment for MSMEs in an emerging economy. *Journal of Business & Industrial Marketing, 39*(3), 581-602. https://doi.org/10.1108/JBIM-04-2022-0183

Pannell, D. J. (1997). Sensitivity analysis of normative economic models: theoretical framework and practical strategies. *Agricultural economics, 16*(2), 139-152. https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.1997.tb00449.x

Pedersen, M. R., Nalpantidis, L., Andersen, R. S., Schou, C., Bøgh, S., Krüger, V., et al (2016). Robot skills for manufacturing: From concept to industrial deployment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 37,* 282-291. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.04.002

Pfohl, HC., Yahsi, B., & Kurnaz, T. (2017). *Concept and Diffusion-Factors of Industry 4.*۰ in the Supply Chain. In: Freitag, M., Kotzab, H., Pannek, J. (eds) Dynamics in Logistics. Lecture Notes in Logistics. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45117-6_33.

Pozzi, R., Rossi, T., & Secchi, R. (2023). Industry 4.۰ technologies: critical success factors for implementation and improvements in manufacturing companies. *Production Planning & Control, 34*(2), 139-158. https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1891481

Rauch, E., Dallasega, P., & Unterhofer, T. (2019). Industry 4.0 and its impact on the supply chain: A systematic review. *Procedia CIRP, 79*, 421-426. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.051

Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.۰: a systematic literature review. *International Journal of Production Research, 58*(6), 1662-1687. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896

Salehi, M. R. (2014). Survey of effective factors on the efficiency of homogeneous governmental universities of Iran. *Iranian Higher Education*, *6*(4), 107-134.

Satapathy, S. (2017). The impact of Industry 4.0 on sustainable supply chain management: A review. *International Journal of Industrial Engineering and Management, 8*(3), 123-134. https://doi.org/10.1080/18477466.2017.1312317

Schwab, K., Gold, J., & Reiner, S. (2019). *The Fourth Industrial Revolution*. Crown Business.

Shashi, M., Centobelli, P., Cerchione, R., & Singh, S. P. (2019). Industry 4.0 and its role in sustainable supply chain management: A systematic review. *Technological Forecasting and Social Change, 149*, 119763. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119763

Shin, H., Hwang, T., & Kim, H. (2019). Impact of Industry 4.0 on the manufacturing sector and its implications for sustainability. *Sustainability, 11*(8), 2151. https://doi.org/10.3390/su11082151

Singh, R. K., & Kumar, R. (2020). Strategic issues in supply chain management of Indian SMEs due to globalization: an empirical study. *Benchmarking: An International Journal, 27*(3), 913-932.

Sangwan, K. S., Bhakar, V., & Digalwar, A. K. (2019). A sustainability assessment framework for cement industry–a case study. *Benchmarking: An International Journal, 26*(2), 470-497.

Sommer, L. (2015). *Industry 4.0: The digital transformation of manufacturing*. Springer Vieweg.

Tiwari, K., & Khan, M. S. (2020). Sustainability accounting and reporting in the industry 4.0. *Journal of cleaner production, 258*, 120783.

Theorin, A., Bengtsson, K., Provost, J., Lieder, M., Johnsson, C., Lundholm, T., et al (2017). An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.۰. *International journal of production research, 55*(5), 1297-1311. https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1201604

Turner, J., Howarth, R., & Bevan, A. (2019). The role of industry 4.0 technologies in achieving operational excellence. *Journal of Manufacturing Processes, 45*, 59-73. doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.023

Wang, L., Wan, J., Li, Z., & Zhang, D. (2016). A survey on the application of Industry 4.0 in the supply chain management: A case study. *Journal of Industrial Engineering and Management, 9*(3), 682-695. https://doi.org/10.3926/jiem.2105

Xia, X., Govindan, K., & Zhu, Q. (2015). Analyzing internal barriers for automotive parts remanufacturers in China using grey-DEMATEL approach. *Journal of cleaner production*, *87,* 811-825. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.044

Yadav, G., Kumar, A., Luthra, S., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V., & Batista, L. (2020). A framework to achieve sustainability in manufacturing organisations of developing economies using industry 4.۰ technologies' enablers. *Computers in industry*, *122,* 103280. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103280

Yadav, G., Luthra, S., Jakhar, S. K., Mangla, S. K., & Rai, D. P. (2020). A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: An automotive case. *Journal of Cleaner Production, 254,* 120112.

Yadav, A., Verma, A., & Garg, R. (2020). Industry 4.0 adoption: A roadmap for Indian manufacturers. *Journal of Manufacturing Technology Management, 31*(3), 561-579. https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2019-0290

Yao, X., Ma, N., Zhang, J., Wang, K., Yang, E., & Faccio, M. (2024). Enhancing wisdom manufacturing as industrial metaverse for industry and society 5.0. *Journal of Intelligent Manufacturing, 35*(1), 235-255.

Zezulka, F., Marcon, P., Vesely, I., & Sajdl, O. (2016). Industry 4.0 – An introduction in the phenomenon. *Procedia Engineering, 149*, 30-35. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.053

[1] Industry 4.0
[2] Circular Economy

[3] Internet of Things
[4] Cloud Computing
[5] Additive Manufacturing
[6] Cyber Security With Blockchain
[7] Augmented Reality With Artificial Intelligence
[8] Big Data
[9] System Integration
[10] Simulation
[11] Autonomous Robot
[12] Internet of Things
[13] Pozzi et al
[14] Yao et al.
[15] Joshi et al.
[16] Singh, & Kumar
[17] Yadav et al.
[18] Tiwari & Khan
[19] Mani et al.
[20] Guarnieri & Trojan
[21] Sangwan et al.
[22] Luthra & Mangla
[23] Battaglia et al.
[24] Müller et al.
[25] Moktadir et al.
[26] Fuzzy Dematel
[27] Best Non Fuzzy Performance
[28] Almada-Lobo
[29] Hofmann & Rüsch
[30] Jabbour et al.
[31] Liao et al.
[32] Dutta et al.
[33] Bhatia et al.
[34] Morrar et al.
[35] Turner et al.
[36] Kumar
[37] Marques et al.
[38] Dawson
[39] Dabbagh & Nasiri Fard
[40] Chien et al.
[41] Garcia-Muiña et al.
[42] Rauch et al.
[43] Chauhan et al.
[44] Schwab et al.
[45] Orginal Equipment Manufacture
[46] Jabbour et al.
[47]Shashi et al.
[48] Pfohl et al.
[49] Sommer
[50] Salehi
[51] Wang et al.
[52] Zezulka et al.
[53] Bag et al.
[54] Satapathy
[55] Shin et al.
[56] Cezarino et al.
[57] Theorin et al.
[58] Orginal Equipment Manufacture
[59] Orginal Equipment Manufacture
[60] Original equipment manufacturer
[61] Sustainable Supply Chain Management
[62] Machado et al
[63] NGUYEN and LUU
[64] Kamble et al.
[65] Pannell
[66] Xia et al.
[67] Reference Architectural Model for Industrie 4.0

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی