



Research in Production and Operations Management

University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329

Vol. 16, Issue 2, No. 41, Summer 2025



DOI: [10.22108/pom.2025.143022.1582](https://doi.org/10.22108/pom.2025.143022.1582)

(Research paper)

Readiness Assessment of Petrochemical Companies in Adapting to the Developments of Industry 4.0 Using Machine Learning Approach

Karim Garmsiri

Department of Industrial Management, Business and Economics School, Persian Gulf University,
Bushehr, Iran, k.garmsiri@yahoo.com

Hadi Balouei Jamkhaneh *

Department of Industrial Management, Business and Economics School, Persian Gulf University,
Bushehr, Iran, hadibalouei@pgu.ac.ir

Ahamad Ghorbanpour

Department of Industrial Management, Business and Economics School, Persian Gulf University,
Bushehr, Iran, ghorbanpur@pgu.ac.ir

Purpose: This study aims to assess the readiness level of Iranian petrochemical companies to adapt to the transformations of Industry 4.0. Given the importance of advanced technologies in enhancing productivity and competitiveness, the primary goal is to identify readiness levels and categorize organizations based on internationally recognized indicators.

Design/methodology/approach: This research is primarily practical and survey-based. The questionnaire for this study is based on the Industry 4.0 Readiness Assessment Model developed by the University of Warwick. After identifying and validating key indicators through a literature review and expert interviews, the researchers gathered data from 78 petrochemical companies using the aforementioned standard questionnaire. The combined K-means-PSO algorithm was employed for data analysis and clustering.

Findings: It was discovered that out of 78 petrochemical companies, 42 are at a high readiness level and 36 are at a medium readiness level for adapting to Industry 4.0. This clustering is clearly defined with the assistance of the K-means PSO algorithm. Additionally, indicators such as data usage,

* Corresponding author, 0000-0001-5250-7127

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/>)



strategy implementation, and human resource capability had the most significant impact on determining the readiness level of companies.

Research limitations/implications: As the results of this study are based on self-reported data from a specific industry, future research should explore other industries and employ longitudinal analyses to monitor the dynamics of preparedness over time.

Practical implications: The findings of this study serve as a valuable decision-making tool for petrochemical company managers and industry policymakers, enabling more targeted planning for the transition to Industry 4.0 by identifying company readiness levels.

Social implications: Enhancing the readiness of companies to adopt Industry 4.0 technologies can result in higher quality employment, better technology utilization, reduced environmental impacts, and increased national productivity.

Originality/value: Given that no research has previously assessed the readiness of petrochemical companies to adapt to Industry 4.0 developments and their clustering, this study is among the first to comprehensively evaluate the readiness of petrochemical companies for Industry 4.0 using a valid international model and machine learning techniques, providing a replicable framework for other sectors.

Keywords: Industry 4.0, Organizational Readiness Assessment, Petrochemical Industry, Clustering, K-means-PSO Algorithm, Machine Learning Approach



پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۶، شماره ۲، پیاپی ۴۱، تابستان ۱۴۰۴

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱ ص ۱-۲۶



DOI: [10.22108/pom.2025.143022.1582](https://doi.org/10.22108/pom.2025.143022.1582)

(مقاله پژوهشی)

ارزیابی میزان آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی در سازگاری با تحولات صنعت نسل چهارم با رویکرد یادگیری ماشین

کریم گرمسیری^۱؛ هادی بالوئی جام‌خانه^{۲*}؛ احمد قربان‌پور^۳

۱- دانشجوی دکتری گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، k.garmsiri@yahoo.com

۲- استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، hadibalouei@pgu.ac.ir

۳- استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، ghorbanpur@pgu.ac.ir

چکیده: ظهور انقلاب صنعتی ۴.۰، چالش‌های جدیدی را برای کسب‌وکارها، در بخش‌های تولیدی و صنعتی ایجاد کرده است. با توجه به نقش کلیدی صنایع پتروشیمی در توسعه اقتصادی و صنعتی کشور، هدف این پژوهش، ارزیابی میزان آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی در سازگاری با تحولات صنعت ۴.۰ است. روش‌شناسی این پژوهش، از دو مرحله شناسایی شاخص‌های ارزیابی میزان آمادگی و خوشه‌بندی شرکت‌های پتروشیمی، با استفاده از الگوریتم آمیخته‌کای میانگین - الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ تشکیل شده است. جامعه آماری پژوهش، شرکت‌های صنایع پتروشیمی ایران است. پرسش‌نامه استاندارد ابزار ارزیابی آمادگی صنعت ۴.۰ دانشگاه وارویک، بین ۷۸ شرکت از صنایع پتروشیمی ایران توزیع و داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از الگوریتم *Kmeans-PSO* تحلیل شد. نتایج نشان می‌دهد که ۴۲ شرکت در خوشه اول و از حیث میزان آمادگی برای سازگاری با تحولات صنعت ۴.۰، عملکرد پایین و ۳۶ شرکت در خوشه دوم با عملکرد متوسط قرار دارند. این پژوهش میزان آمادگی شرکت‌های پتروشیمی را در پذیرش فناوری‌های صنعت ۴.۰ ارزیابی و راهنمایی‌هایی را برای مدیران و صنایع بالادستی برای تقویت، بهبود و انتقال آنها به سمت یک سازمان بالغ و آماده برای سازگاری با فناوری‌های صنعت ۴.۰ ارائه کرد. تاکنون پژوهشی درباره ارزیابی میزان آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی برای سازگاری با تحولات صنعت ۴.۰ و خوشه‌بندی آنها انجام نشده است و این پژوهش یکی از نخستین تحقیقات در این زمینه است.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی آمادگی، تحولات صنعت ۴.۰، خوشه‌بندی، سازگاری، صنایع پتروشیمی، یادگیری ماشین

۱- مقدمه

امروزه شرکت‌های تولیدی به‌ویژه در صنایع پتروشیمی، به‌دلیل پیشرفت‌های اخیر محیطی، اجتماعی، اقتصادی و فناوری، با چالش‌های اساسی ناشی از انقلاب صنعتی ۴,۰ مواجه‌اند. این چالش‌ها نیازمند قابلیت‌های جدید و رویکردهای چابک و پاسخگو هستند. از طرفی در حالی که تحقیقات زیادی در زمینه آمادگی پذیرش فناوری‌های صنعت ۴,۰ انجام شده است، هنوز خلأهایی در ارزیابی دقیق و جامع وضعیت آمادگی شرکت‌های پتروشیمی برای سازگاری با صنعت ۴,۰ و این تحولات، وجود دارد.

از زمان ظهور انقلاب صنعتی، محققان تلاش کرده‌اند تا راه‌های نوآورانه‌ای را برای تقویت فرآیند تولید به نفع راندمان تولید، کاهش هزینه و کیفیت محصول بیابند. صنعت ۴,۰ نشان‌دهنده دیجیتالی‌شدن تمام سیستم‌ها و فرآیندهای موجود در زنجیره ارزش سازمان است و فناوری‌های نوینی مثل اینترنت اشیا و سیستم‌های سایبر-فیزیکی را معرفی کرده است که به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کنند (Wang et al., 2017)؛ (al., 2016). صنایع نسل ۴,۰ در حال تغییر اکوسیستم تولیدی جهان با ادغام فناوری‌های دیجیتال در نحوه تولید، بهبود و توزیع محصولات شرکت‌هاست. با این حال، شرکت‌های تولیدی به‌دلیل ناآگاهی از میزان آمادگی و سازگاری با فناوری‌های صنعت ۴,۰، بیشتر در ادغام این فناوری‌ها در بخش‌های سازمانی خود، با شکست مواجه می‌شوند. با به‌کارگیری مدل‌های آمادگی پذیرش فناوری‌های صنعت ۴,۰، وضعیت فعلی شرکت‌ها ارزیابی و راهکارهایی برای تقویت، بهبود و انتقال آنها به سمت یک سازمان بالغ و آماده برای فناوری‌های صنعت ۴,۰ ارائه می‌شود (Grufman et al., 2020). در این عصر، فناوری‌های نوظهور، شرکت‌های تولیدی سنتی را به کارخانه‌های هوشمند تبدیل می‌کنند که افراد، محصولات، اطلاعات و ماشین‌های مبتنی بر فناوری را به محیط‌های دیجیتال و خودکار منتقل می‌کنند. با ظهور فناوری صنعتی دیجیتال تحولی که در آن حسگرها، ماشین‌ها، محصولات و سیستم‌های فناوری اطلاعات در سراسر زنجیره ارزش به هم متصل می‌شوند، وضعیت تمام اجزای یک سیستم در زمان واقعی مشخص می‌شود و تصمیم‌گیری‌های بعدی بهبود می‌یابد. فناوری‌های صنعت ۴,۰ انعطاف‌پذیری بیشتری را برای شرکت به ارمغان می‌آورد تا محصولات با کیفیت بالا و با هزینه کمتر را تولید کند. با این حال، برای دستیابی به این روند، صنایع باید رویکردهای تصمیم‌گیری را تطبیق دهند و تقویت کنند (Nounou et al., 2023). به‌کارگیری فناوری‌های صنعت ۰.۴ برای دستیابی به اهداف حیاتی مانند کارایی هزینه، انعطاف‌پذیری چابکی و سیستم‌های تولید مشتری‌محور مفید خواهد بود و به‌طور مثبت بر فرآیندهای تجاری تأثیر می‌گذارد و آنها را مولدتر و کارآمدتر می‌کند (Monshizadeh et al., 2023). در این راستا با توجه به اینکه بسیاری از کارشناسان و محققان دانشگاهی بر توسعه مدل‌های میزان آمادگی شرکت برای پذیرش فناوری تمرکز کرده‌اند و بیشتر این مدل‌ها بر ارزیابی ابعاد بدون تجزیه و تحلیل و خوشه‌بندی شرکت‌ها تمرکز داشتند، ولی هنوز تحقیق جامعی از حیث ارزیابی میزان آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی برای سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ و خوشه‌بندی آنها وجود ندارد؛ بنابراین هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی میزان آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی در سازگاری با تحولات صنعت نسل چهارم با رویکرد یادگیری ماشین است. برای دستیابی به این هدف، به سؤال‌های زیر پاسخ داده خواهد شد:

۱) شرکت‌های صنایع پتروشیمی از حیث ویژگی‌های سازگاری با تحولات صنعت نسل چهارم، در چند خوشه‌بندی قرار می‌گیرند؟

۲) عملکرد فعلی خوشه‌های شرکت‌های صنایع پتروشیمی از حیث میزان آمادگی در سازگاری با تحولات صنعت نسل چهارم چگونه است؟

۳) مدل یادگیری میزان آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی در سازگاری با تحولات صنعت نسل چهارم، به چه صورت است؟

پاسخ به سؤالات فوق، به خوشه‌بندی شرکت‌های پتروشیمی براساس ویژگی‌های سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰، عملکرد فعلی خوشه‌های شرکت‌ها را در زمینه آمادگی برای سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ و مدل یادگیری میزان آمادگی شرکت‌ها در سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ بررسی می‌کند. این پژوهش به درک بهتر، نیاز به برنامه‌ریزی استراتژیک برای ارتقای سطح آمادگی شرکت‌ها و بهبود عملکرد آنها کمک می‌کند.

در ادامه، نگارش مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است. در بخش مبانی نظری و پیشینه پژوهش، درباره صنعت نسل چهارم و مدل‌های ارزیابی آمادگی موجود در حوزه مرتبط بحث می‌شود.

به دنبال بخش روش‌شناسی، چارچوب استفاده‌شده برای ارزیابی آمادگی شرکت‌ها در سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ و جزئیات مربوط به روش خوشه‌بندی توضیح داده شده است. در بخش یافته‌ها، نتایج ارزیابی اولیه، با بحث درباره شرکت‌های صنایع پتروشیمی بیان می‌شود. در نهایت در بخش پایانی، یافته‌های اصلی، محدودیت‌های پژوهش و تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲- مبانی نظری و پیشینه تجربی

در این بخش از پژوهش، متغیرهای اصلی و فرعی را بررسی می‌کنیم که در ارزیابی آمادگی شرکت‌ها برای سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ به کار می‌روند. در جدول ۱، مدل‌های مختلف ارزیابی آمادگی شرکت‌ها برای سازگاری با صنعت ۴,۰ و ابعاد کلیدی هر مدل معرفی شده است.

۲-۱ صنعت نسل ۴,۰

توسعه فناوری و راه‌حل‌های هوشمند در حال تکامل است و هیچ نشانه‌ای از کاهش سرعت وجود ندارد. صنایع برای رقابت‌پذیری در فضای بین‌المللی، نیازمند دستیابی به این فناوری‌ها هستند. انقلاب صنعتی ۴,۰، اولین بار در سال ۲۰۱۱ در آلمان و در نمایشگاه هانوفر^۲ معرفی شد. در این نمایشگاه، بحث‌هایی برای توصیف اینکه چگونه صنعت ۴,۰، انقلابی در ایجاد زنجیره‌های ارزش جهانی ایجاد می‌کند، برگزار شده است ([Popkova et al., 2019](#)). با توجه به اینکه این مفهوم کاملاً جدید است، هنوز هیچ اتفاق نظری درباره یک تعریف مشترک برای صنعت ۴,۰ وجود ندارد. صنعت ۴,۰ بیشتر یک اصطلاح گسترده، عمومی و فراگیر برای توصیف تلاقی روندها و فناوری‌هایی است که پتانسیل تغییر شکل مکانیسم‌های ارائه ارزش برای خدمات و محصولات را دارند؛ بنابراین، برخی از نویسندگان به ضرورت تعریفی پویا و جامع اشاره و صنعت ۴,۰ را تغییر منطق تولید به سمت رویکرد غیرمتمرکز فزاینده و خودتنظیم‌کننده خلق ارزش توصیف کرده‌اند که با مفاهیم و فناوری‌هایی مانند سیستم‌های

فیزیکی-سایبری، اینترنت اشیا^۳ (IOT)، محاسبات ابری، تولید مواد افزودنی و کارخانه‌های هوشمند امکان‌پذیر است (Mittal et al., 2018). با این راه‌حل‌های هوشمند جدید، صنعت ۴,۰ برای هر صنعتی در سرتاسر جهان سودمند است که آمادۀ استفاده از فناوری‌ها باشد (Maisiri & Van Dyk, 2019). صنعت ۴,۰ فرصت‌ها، پیشرفت‌ها و مزایای متعددی مانند تولید انبوه بسیار سازگار، انعطاف‌پذیر و سفارشی‌سازی‌شده، هماهنگی زنجیره‌های ارزش در زمان واقعی و بهینه‌سازی آنها، کاهش هزینه‌های پیچیدگی و ظهور خدمات و مدل‌های تجاری جدید را ارائه می‌دهد. فناوری‌های جدید مانند اینترنت اشیا، اینترنت خدمات^۴، داده‌های بزرگ^۵، تجزیه و تحلیل داده‌های بزرگ، سیستم‌های فیزیکی-سایبری^۶، ربات‌های مستقل^۷ و رایانش ابری^۸ باعث ایجاد مدل‌های تجاری جدید و تغییرات در سیستم‌های تولید، مصرف، حمل و نقل، توزیع و غیره می‌شود. در عصر صنعت ۴,۰، شرکت‌ها به دنبال بهره‌برداری از داده‌های موجود برای اتخاذ تصمیمات مبتنی بر داده، برای به دست آوردن مزیت رقابتی‌اند (Chen et al., 2017).

صنعت ۴,۰ چهارمین انقلاب صنعتی شناخته می‌شود که با ظهور فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا (IOT)، سیستم‌های سایبر - فیزیکی و تحلیل داده‌های کلان، به تحول در فرایندهای تولید و تجاری‌سازی منجر شده است. این تحول نه تنها به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند، این امکان را به سازمان‌ها می‌دهد که به تقاضاهای متغیر بازار پاسخ دهند و محصولات سفارشی را با کیفیت بالاتر تولید کنند که به گفته (Wang et al., 2016)، این تحول به ایجاد کارخانه‌های هوشمند منجر می‌شود که در آنها ارتباط بین ماشین‌ها و سیستم‌ها به شکل بهینه‌تری مدیریت می‌شود. با وجود مزایای فراوان، پذیرش صنعت ۴,۰ با چالش‌هایی نیز همراه است. راج و همکاران^۹ (۲۰۲۰)، موانع موجود در پذیرش این فناوری‌ها را بررسی و عواملی مثل وجودنداشتن استراتژی دیجیتال و کمبود منابع را به عنوان موانع اصلی شناسایی کرده‌اند. همچنین، فرصت‌هایی نظیر بهبود فرایندهای تولید، افزایش بهره‌وری و ایجاد مدل‌های کسب‌وکار جدید نیز در این زمینه وجود دارد که به شرکت‌ها کمک می‌کند تا در بازار رقابتی باقی بمانند.

۲-۲ میزان آمادگی شرکت‌ها در سازگاری با تحولات صنعت نسل ۴,۰

بررسی و مطالعه درباره آمادگی صنعت ۴,۰، راهی است که به شرکت‌ها در جهت آماده‌شدن برای چالش‌هایی کمک می‌کند که ممکن است هنگام تغییر به انقلاب جدید ظاهر شوند (Hofmann & Rüsch, 2017). مدل ارزیابی آمادگی و سازگاری با تحولات، باید شرکت را به سطحی از آگاهی و شناخت برساند تا متوجه شوند شرکت آمادۀ شروع فرآیند تحول برای صنعت ۴,۰ است یا خیر. میتال و همکاران^{۱۰} (2018) ارزیابی آمادگی را به «ابزار ارزیابی برای تحلیل و تعیین سطح آمادگی شرایط، نگرش‌ها و منابع، در تمام سطوح یک سیستم مورد نیاز برای دستیابی به یک هدف» تعریف می‌کنند. شوماخر و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۶) بیان می‌کنند که تفاوت بین مدل بلوغ و مدل آمادگی، در ارزیابی آمادگی قبل از شروع فرآیند تحول است.

ارزیابی آمادگی ابزاری است که برای تجزیه و تحلیل و تعیین سطح آمادگی شرکت مورد نیاز برای دستیابی به اهدافش استفاده می‌شود (Mittal et al., 2018). تاکنون مدل‌های متعددی برای ارزیابی آمادگی شرکت به جهت پذیرش و سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ منتشر شده است. در این مدل‌ها رویکردهای مختلفی به صنعت ۴,۰ وجود دارد. برای به دست آوردن درک روشنی از تفاوت‌های بین هر مدل، روشن کردن جزئیات بیشتری از

تفاوت‌های بین سطوح و ویژگی‌های هر مدل ارزیابی مهم است. این تفاوت‌ها در میزان جزئیات ارائه‌شده با ابعاد فرعی هر مدل منعکس می‌شود. برخی از این مدل‌ها بر فناوری استفاده‌شده در ساخت و همچنین در خود محصول تمرکز می‌کنند؛ در حالی که مدل‌های دیگر ارزیابی بر جنبه‌های دیگر تأکید می‌کنند (جدول ۱). این جدول، مدل‌های مختلف ارزیابی عملکرد، امکانات شرکت‌های مختلف و آمادگی شرکت‌ها را برای سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ در صنایع مختلف در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۴ مقایسه کرده است. این جدول مبنایی برای برنامه‌ریزی استراتژیک و بهبود فرایندها در راستای سازگاری با صنعت ۴,۰ است و به کمک آن، شرکت‌ها با درک بهتری از جنبه‌های مختلف آمادگی خود، مدل مناسب برای ارزیابی آمادگی‌شان را انتخاب و تصمیمات بهتری در زمینه پذیرش فناوری‌های جدید اتخاذ می‌کنند. منظور از سطوح، تعداد مراحل یا مراحل است که شرکت باید قبل از اجرای کامل صنعت ۴,۰ طی کند. این سطوح، ویژگی‌های هر مدل ارزیابی را به بخش‌های آسان و فهم‌پذیر تجزیه می‌کند؛ مانند ابعاد اصلی و یا ابعاد فرعی (Anderl et al., 2015).

جدول ۱- مقایسه مدل‌های مختلف ارزیابی آمادگی شرکت برای سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰

Table 1- Comparison of different models for evaluating the company's readiness to adapt to industry 4.0 developments

ابعاد	مدل لیچالو و همکاران ^{۱۵} (۲۰۱۵)	آندرل و همکاران ^{۱۴} (۲۰۱۵)	چمنیز ^{۱۳} (۲۰۲۴)	آگکا و همکاران ^{۱۲} (۲۰۱۷)
محصول	✓	✓	✓	✓
فرایند	✓	✓	✓	✓
افراد	✓		✓	
تکنولوژی	✓			✓
سازمان	✓		✓	✓
استراتژی	✓			✓
فرهنگ			✓	
دولت				✓
سیستم اطلاعاتی	✓			
خدمات مشتق از داده				✓
زنجیره تأمین				✓

مفهوم از ابعاد، به عنوان تعداد حوزه‌های درون یک شرکت مرتبط با هر مفهومی درک می‌شود که در مدل در نظر گرفته شده است.

یکی از آنها، ابزار ارزیابی آمادگی صنعت نسل چهارم است که واحد تحقیقاتی به نام WMG در دانشگاه وارویک^{۱۶} آن را ارائه کرده است. این ابزار ارزیابی آمادگی از شش بعد اصلی و ۳۷ بعد فرعی مرتبط با صنعت ۴,۰ تشکیل شده است (Agca et al., 2017). هدف آنها ارائه راهی ساده و عینی برای شرکت‌ها به جهت شروع ارزیابی آمادگی و جاه‌طلبی آینده خود با استفاده از پتانسیل عصر فیزیکی سایبری است. این ابزار ارزیابی آمادگی به صورت جامع طراحی شده است و فراتر از حوزه فناوری، تمامی بخش‌های سازمان را در بر می‌گیرد. این ابزار حول چهار سطح آمادگی (مبتدی، متوسط، باتجربه و متخصص) طراحی شده است.

۳- پیشینه تجربی

سونی و نایک^{۱۷} (۲۰۲۰) مقاله‌ای سیستماتیک را با عنوان «عوامل حیاتی برای اجرای موفقیت‌آمیز صنعت نسل ۴،۰، بررسی و جهت‌گیری تحقیقات آینده» نوشتند. آنها در این مطالعه با بررسی چگونگی پیاده‌سازی موفق صنعت نسل ۴،۰ در سازمان‌ها، ۱۰ عامل کلیدی را شناسایی کردند. این عوامل به این شرح‌اند: هم‌راستایی با استراتژی سازمانی، حمایت مدیر ارشد، آموزش و توانمندسازی کارکنان، توسعه فرهنگ نوآوری، توسعه زیرساخت‌های دیجیتال، مدیریت تغییر، یکپارچگی سیستم، تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌ها، همکاری با ذینفعان و توجه به جنبه‌های پایداری. این عوامل به‌طور مستقیم با ابعاد اصلی و فرعی ارائه‌شده از سوی دانشگاه وارویک مرتبط‌اند؛ برای مثال عامل «هم‌راستایی با استراتژی سازمانی»، به نیاز یک استراتژی همسو با ابعاد مختلف سازمان اشاره دارد که در زمینه محصولات و خدمات و همچنین زنجیره تأمین اثرگذار است و عامل «حمایت مدیر ارشد»، به بهبود فرهنگ نوآوری و توانمندسازی کارکنان کمک می‌کند. این عوامل کلیدی به‌عنوان عوامل موفقیت در پیاده‌سازی و پذیرش فناوری‌های صنعت ۴،۰، به ابعاد اصلی کمک می‌کنند تا سازمان‌ها به‌طور مؤثرتری در مسیر دیجیتال‌سازی و بهبود مستمر حرکت کنند.

راماناتن و سامارانایاک^{۱۸} (۲۰۲۲) در مقاله خود با موضوع «ارزیابی آمادگی صنعت ۴،۰ در تولید: یک چارچوب خودتشخیصی و یک مطالعه موردی گویا»، با بررسی یک شرکت تولیدی و طرح موضوع I4.0RAF^{۱۹}، چارچوبی با هشت عامل کلیدی معرفی کردند که به شرکت‌ها کمک می‌کند تا اولویت‌های ورود به محیط صنعت نسل ۴،۰ را شناسایی کنند. این هشت عامل عبارت‌اند از استراتژی و سازمان، تجهیزات، سیستم‌های IT، منابع انسانی، مدیریت زنجیره تأمین، مدیریت کیفیت، مدیریت عملیات و تعریف محصول که این عوامل به‌صورت مستقل ارزیابی شدند و به شرکت‌ها کمک کردند تا بدون نیاز به تحلیل‌های پیچیده، سطح آمادگی خود را از نظر هر عامل مشخص کنند. نتایج این تحقیق نیز، مشابه بسیاری از تحقیقات از جمله کستلو برانکو و همکاران^{۲۰} (۲۰۱۹) به مدیران و سازمان‌ها کمک می‌کند تا نیازهای خود را بهتر شناسایی کنند و برنامه‌ریزی بهتری در راستای انتقال به صنعت نسل ۴،۰ انجام دهند.

اوستونداگ و همکاران^{۲۱} (۲۰۱۸) در بخشی از کتاب خود با عنوان صنعت ۴،۰: مدیریت تحول دیجیتال، جنبه‌های مختلف صنعت نسل ۴،۰ و همچنین تحلیل و مدیریت تغییرات ناشی از این صنعت را در سازمان‌ها و صنایع بررسی کردند که برخی از آنها عبارت‌اند از تحول دیجیتال، مدل‌های بلوغ و آمادگی، فناوری‌های کلیدی و مدیریت استراتژیک. در بخشی از کتاب به‌صورت مقاله در دسترس مدل‌های بلوغ و آمادگی برای استراتژی‌های صنعت ۴،۰ بررسی شده است و به چالش‌های شرکت‌ها در فرآیند تحول به‌سمت صنعت نسل ۴،۰ اشاره می‌شود. آنها با طرح پرسش‌نامه و ابزارهای ارزیابی سطح بلوغ سازمانی و تحلیل به کمک فرمول‌های ریاضی، یک مدل بلوغ جدید شامل ابعاد و زمینه‌های مرتبط با صنعت نسل ۴،۰ را ارائه کردند. مدیران و سازمان‌ها با کمک این مدل‌ها، تصمیمات بهتری در راستای پذیرش و تحول شرکت از طریق صنعت نسل ۴،۰ می‌گیرند.

کاسترو و همکاران^{۲۲} (۲۰۲۰) در پژوهشی، آمادگی صنعت ۴،۰ شرکت‌های پرتغالی را ارزیابی کردند. آنها در مقاله خود با توسعه سیستم خودارزیاب SHIFTo4.0 که برای پذیرش مفاهیم صنعت نسل ۴،۰ طراحی شده است، آمادگی شرکت‌ها را در شش بعد مختلف ارزیابی می‌کنند. با کمک نتایج این مطالعه و سیستم خودارزیاب،

شرکت‌ها، به‌خصوص شرکت‌های کوچک و متوسط (SMEs) در پرتغال، توانایی‌ها و ضعف‌های خود را شناسایی می‌کنند، روند دیجیتال‌سازی و فرایندهای خود را بهبود می‌دهند و استراتژی‌های مناسبی را برای پذیرش صنعت نسل ۴,۰ پیاده‌سازی می‌کنند.

پازی و همکاران^{۲۳} (۲۰۲۳) مطالعه‌ای با عنوان «فناوری‌های صنعت نسل ۴,۰: عوامل موفقیت حیاتی برای اجرا و بهبود در شرکت‌های تولیدی» را به چاپ رساندند که هدف آن شناسایی فاکتورهای کلیدی موفقیت در پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت نسل ۴,۰ و بهبودهای ناشی از آن بوده است. آنها تعدادی از کارخانه‌های تولیدی در ایتالیا، که حداقل یک‌بار پیاده‌سازی موفق فناوری‌های صنعت نسل ۴,۰ را انجام داده بودند، را بررسی کردند. همچنین داده‌های خود را از طریق بازدیدهای میدانی و مصاحبه‌های ساختاریافته، با مدیران و کارکنان این شرکت‌ها جمع‌آوری و تأثیرات و فرصت‌های فناوری‌های صنعت نسل ۴,۰ را بر آنها بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که فاکتورهای کلیدی موفقیت شامل «مدیریت ناب، آموزش و توانمندسازی کارکنان، تشکیل تیم‌های چندوظیفه‌ای و مدیریت کیفیت و بهبود مستمر» است و پیاده‌سازی فناوری‌های جدید و بهبودهای ناشی از این پیاده‌سازی‌ها تدریجی (کایزن) یا انقلابی (جهشی و یک‌باره/ نوآوری) و توجه به نیازهای مشتریان به‌عنوان پیش‌نیاز برای بهبودهای انقلابی (جهشی و یک‌باره/ نوآوری) مطرح شده است. راجنی و کوکسیس^{۲۴} (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای با عنوان «ارزیابی آمادگی شرکت‌ها در صنعت ۴,۰»، جنبه‌های مختلف صنعت نسل ۴,۰ را بررسی کردند. آنها آمادگی شرکت‌ها برای پذیرش این صنعت، تغییر و تحولات ناشی از دیجیتالی‌شدن، مدل‌های ارزیابی و بلوغ، تهدیدها و فرصت‌های صنعتی‌شدن و اهمیت تدوین استراتژی را برای حفظ رقابت‌پذیری بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، سازمان‌ها با تمرکز بر سطح آمادگی خود و با استفاده از مدل‌های آمادگی و بلوغ، سطح بلوغ خود را ارزیابی و توانایی‌ها و ضعف‌های خود را شناسایی کنند و با توجه به فرهنگ سازمانی و فناوری‌های نوین، استراتژی‌های مناسبی را برای دیجیتالی‌کردن فرآیندهای خود تدوین کنند، با شناخت تهدیدها و فرصت‌های صنعتی‌شدن و ارزیابی خود، تهدیدها را به فرصت‌های بهبود و نوآوری تبدیل و بهترین تصمیمات استراتژیک را اتخاذ کنند. سازمان‌ها باید با کمک ابزارها و مدل‌های ارزیابی، برای هدایت فرآیندهای تحول استفاده کنند. شوماخر و همکاران (۲۰۱۶) در مقاله‌ای با عنوان «مدل بلوغ برای ارزیابی آمادگی و بلوغ صنعت نسل ۴,۰ بنگاه‌های تولیدی»، آمادگی و بلوغ شرکت‌های تولیدی را برای پذیرش مفاهیم و فناوری‌های صنعت ۴,۰ نظیر اینترنت اشیا، رایانش ابری و چالش‌های عمده‌ای بررسی و ارزیابی کردند که شرکت‌های تولیدی در مواجهه با مفاهیم جدید صنعت ۴,۰ با آن روبه‌رو هستند. آنها به کمک مطالعه سیستماتیک، مصاحبه‌های کارشناسی و مدل‌سازی مفهومی، مدل بلوغی را توسعه دادند که شامل ۹ بُعد کلیدی سازمانی و فناوری است (استراتژی، رهبری، مشتری، محصول، عملیات، فرهنگ، افراد و کارکنان، فناوری). هدف این مطالعه، کمک به شرکت‌ها در شناسایی توانایی‌ها و ضعف‌های خود در زمینه تحول دیجیتال و بهبود تدوین استراتژی‌های مرتبط با صنعت نسل ۴,۰ است. نویسندگان، نرم‌افزاری طراحی کردند که از طریق تکمیل پرسش‌نامه‌ای استاندارد و پردازش و ارزیابی خودکار در نرم‌افزار و اعلام نتیجه سطح بلوغ، در قالب گزارش‌های شفاف و کاربردی به شرکت‌ها کمک می‌کند تا سطح بلوغ خود را اندازه‌گیری و برای اتخاذ تصمیمات استراتژیک و برنامه‌های خود از این گزارش‌ها استفاده کنند.

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، انقلاب صنعتی ۴،۰ برای سازمان‌ها و صنایعی که با چالش‌های این انقلاب هم‌راستا شوند، فرصت خوبی برای رشد و تکامل فراهم کرده است. شرکت‌های نفت و گاز و صنایع پتروشیمی نیز، از این قاعده مستثنا نیستند. در این راستا، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ارزیابی آمادگی سازمان‌ها برای پذیرش فناوری‌های جدید، به‌ویژه فناوری‌های دیجیتال و بلاک‌چین، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فارسیجانی و اله کرم‌پور^{۲۵} (۲۰۲۲) در تحقیق کاربردی - پیمایشی خود، به نام «ارزیابی میزان آمادگی برای به‌کارگیری فناوری بلاک‌چین در شرکت ملی گاز ایران»، آمادگی شرکت ملی گاز ایران را برای پذیرش فناوری بلاک‌چین بررسی کردند. جمع‌آوری داده‌ها از روش‌های کتابخانه‌ای و میدانی انجام و در بخش میدانی، از پرسش‌نامه مقایسات زوجی برای جمع‌آوری داده‌ها استفاده شده است. تحلیل داده‌ها با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی (FAHP^{۲۶}) انجام شده است که شامل وزن‌دهی مؤلفه‌ها و زیرمؤلفه‌ها می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شرکت‌های نفت و گاز به دلیل نوسانات بازار و چالش‌های شدید اقتصادی، نیازمند به‌کارگیری فناوری‌های جدیدند تا در بازار رقابتی باقی بمانند. همچنین نشان دادند که عوامل سازمانی و فناوری، بالاترین میزان آمادگی را دارند؛ در حالی که عوامل محیطی و انسانی در سطح پایین‌تری قرار دارند.

با توجه به اینکه هوش مصنوعی یکی از محورهای اساسی تحول در صنایع مختلف شناخته شده است، صفری و ابراهیمی^{۲۷} (۲۰۲۲) در مقاله‌ای با عنوان «اولویت‌بندی حوزه‌های کاربردی به‌منظور جاری‌سازی فناوری هوش مصنوعی»، چالش‌ها و فرصت‌های پیاده‌سازی این فناوری را در حوزه‌های مختلف بررسی کردند. آنها از روش‌های تحلیلی و تصمیم‌گیری چندمعیاره، برای شناسایی و وزن‌دهی معیارهای مؤثر بر اولویت‌بندی حوزه‌های کاربردی هوش مصنوعی استفاده کردند. حوزه‌های کاربردی با کمک یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به نام COPRAS^{۲۸}، رتبه‌بندی شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که حوزه‌های اقتصاد، حمل‌ونقل و حکمرانی (حمایت مدیر ارشد) به ترتیب بیشترین اولویت را برای به‌کارگیری فناوری هوش مصنوعی دارند. رویکرد بیان‌شده در این پژوهش، مدل مفیدی برای ارزیابی و تحلیل میزان آمادگی صنایع پتروشیمی در سازگاری با تحولات صنعت نسل چهارم به کار می‌رود. خلاصه‌ای از آنچه در پیشینه تجربی ذکر شد، در جدول ۲ آمده است. در این جدول ابعاد ذکرشده در هر منبع با توجه به جدول ۳ و ابعاد اصلی و فرعی ابزار ارزیابی میزان آمادگی صنعت ۴،۰ ارائه‌شده از سوی دانشگاه وارویک، آمده است.

جدول ۲- مقایسه ابعاد شناسایی شده در پیشینه پژوهش با ابعاد مدل ارائه‌شده دانشگاه وارویک

Table 2- Comparison of dimensions identified in the literature review with the dimensions of the model provided by the University of Warwick

منبع	ابعاد شناسایی شده	ارتباط با ابعاد دانشگاه وارویک
سونی و نایک (۲۰۲۰)	هم‌راستایی با استراتژی سازمانی	اهداف و استراتژی‌های کلی سازمان
	حمایت مدیر ارشد	نقش کلیدی مدیران در هدایت تغییرات
	آموزش و توانمندسازی کارکنان	ارتقا مهارت‌ها و دانش کارکنان
	توسعه فرهنگ نوآوری	ایجاد محیطی که تشویق به نوآوری را ممکن کند
	توسعه زیرساخت‌های دیجیتال	سرمایه‌گذاری در فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات
	مدیریت تغییر	فرایندهای مدیریت تغییر برای پذیرش فناوری‌های جدید
	یکپارچگی سیستم	ضرورت یکپارچه‌سازی فرایندها و سیستم‌ها
	تحلیل داده‌ها و تصمیم‌گیری مبتنی بر	استفاده از داده‌ها برای اتخاذ تصمیمات استراتژیک

منبع	ابعاد شناسایی شده	ارتباط با ابعاد دانشگاه وارویک
راماتن و همکاران (2022)	داده‌ها	
	همکاری با ذی‌نفعان	تعامل با ذی‌نفعان داخلی و خارجی
	توجه به جنبه‌های پایداری	توجه به جنبه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی
	استراتژی و سازمان	هم‌راستایی استراتژی با اهداف سازمان
	تجهیزات	ارزیابی و به‌روزرسانی تجهیزات
	سیستم‌های IT	زیرساخت‌های فناوری اطلاعات
	منابع انسانی	توانمندی‌ها و مهارت‌های کارکنان
	مدیریت زنجیره تأمین	یکپارچگی و کارایی زنجیره تأمین
	مدیریت کیفیت	فرایندهای کنترل کیفیت و بهبود مستمر
	مدیریت عملیات	بهینه‌سازی فرایندهای عملیاتی
اوستونداگ و همکاران (2018)	تعریف محصول	مشخصات و ویژگی‌های محصولات
	تحول دیجیتال	فرایندهای دیجیتال‌سازی و تغییرات ناشی از آن
	مدل‌های بلوغ و آمادگی	ارزیابی سطح بلوغ سازمانی
	فناوری‌های کلیدی	شناسایی و استفاده از فناوری‌های جدید
	مدیریت استراتژیک	تدوین استراتژی‌های مناسب برای تحول
کاسترو و همکاران (2020)	استراتژی	تطابق استراتژی با نیازهای صنعت ۴,۰
	تجهیزات	ارزیابی و به‌روزرسانی تجهیزات
	سیستم‌های IT	زیرساخت‌های فناوری اطلاعات
	منابع انسانی	آموزش و توانمندسازی کارکنان
	مدیریت زنجیره تأمین	بهبود فرایندهای زنجیره تأمین
پازی و همکاران (2023)	مدیریت کیفیت	کنترل و بهبود کیفیت محصولات و خدمات
	مدیریت ناب	بهینه‌سازی فرایندها و کاهش هدررفت
	آموزش و توانمندسازی کارکنان	ارتقای مهارت‌ها و دانش کارکنان
	تشکیل تیم‌های چندوظیفه‌ای	همکاری بین بخش‌ها و تخصص‌های مختلف
	مدیریت کیفیت و بهبود مستمر	فرایندهای کنترل کیفیت و نوآوری
راجنی و کوکسیس (2018)	آمادگی برای پذیرش صنعت ۴,۰	ارزیابی سطح آمادگی سازمان
	مدل‌های ارزیابی و بلوغ	استفاده از مدل‌های بلوغ برای شناسایی توانایی‌ها و ضعف‌ها
	تهدیدها و فرصت‌های صنعتی شدن	شناسایی و مدیریت تهدیدها و فرصت‌ها
	تدوین استراتژی	ایجاد استراتژی‌های مناسب برای رقابت‌پذیری
	استراتژی	تدوین استراتژی‌های مرتبط با صنعت ۴,۰
شوماخر و همکاران (2016)	رهبری	نقش رهبری در تحول دیجیتال
	مشتری	توجه به نیازهای مشتریان
	محصول	نوآوری در محصولات و خدمات
	عملیات	بهینه‌سازی فرایندهای عملیاتی
	فرهنگ	ایجاد فرهنگ سازمانی مناسب برای تحول
	افراد و کارکنان	توانمندسازی و آموزش کارکنان
	فناوری	استفاده از فناوری‌های نوین
	عوامل سازمانی	تدوین استراتژی‌های مرتبط با صنعت ۴,۰ و مؤلفه‌های مدیریتی
فارس‌جانی و اله کرم‌پور (۲۰۲۲)	عوامل فناوری	زیرساخت‌های فناوری اطلاعات
	عوامل انسانی	توانمندسازی و آموزش کارکنان
	عوامل محیطی	شناسایی و مدیریت تهدیدها و فرصت‌ها

منبع	ابعاد شناسایی شده	ارتباط با ابعاد دانشگاه وارویک
صفری و ابراهیمی (۲۰۲۳)	اقتصاد	بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و افزایش درآمدها
	حمل و نقل	بهینه‌سازی فرایندهای عملیاتی برای حمل و نقل و لجستیک
	حکمرانی (حمایت مدیر ارشد)	نقش کلیدی مدیران در هدایت تغییرات
	کشاورزی	نوآوری در محصولات و خدمات (کشاورزی)
	علم و فناوری	زیرساخت‌های فناوری اطلاعات
	اجتماع و فرهنگ	شناسایی و مدیریت تهدیدها و فرصت‌ها با توجه به فرهنگ سازمانی
	محیط زیست	توجه به جنبه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی
	صنعت و انرژی	ارزیابی و به‌روزرسانی تجهیزات برای استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی در بهینه‌سازی مصرف انرژی و بهبود فرایندهای تولید

با توجه به جدول فوق، ابعاد مشترک منابع مختلف، نشان‌دهنده اهمیت استراتژی، آموزش، مدیریت تغییر، فناوری و کیفیت در پیاده‌سازی موفق صنعت ۴,۰ در سازمان‌ها هستند که از ابعاد اصلی ذکر شده در دانشگاه وارویک‌اند. پرسش‌نامه ارزیابی دانشگاه وارویک در ادامه در جدول ۳ آمده است. تمرکز بر این ابعاد، به سازمان‌ها در راستای شناسایی میزان آمادگی‌شان برای سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ کمک بسزایی می‌کند.

۴- روش شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، توسعه‌ای - کاربردی و به لحاظ گردآوری داده، میدانی است. جامعه آماری آن، شرکت‌های صنایع پتروشیمی ایران‌اند. روش شناسی این پژوهش از دو مرحله شناسایی شاخص‌های ارزیابی میزان آمادگی و خوشه‌بندی شرکت‌های پتروشیمی با استفاده از الگوریتم آمیخته کای میانگین - الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تشکیل شده است. در مرحله نخست این پژوهش، با مطالعه مبانی نظری و مرور پیشینه تجربی و نیز مصاحبه با خبرگان، شاخص‌های ارزیابی آمادگی صنعت ۴,۰ که دانشگاه وارویک آن را ارائه داد، مبنای پژوهش حاضر قرار گرفت؛ سپس با استفاده از پرسش‌نامه استاندارد ارزیابی آمادگی صنعت ۴,۰ دانشگاه وارویک، داده‌های ۷۸ شرکت از صنایع پتروشیمی ایران جمع‌آوری شد. پرسش‌نامه الکترونیکی پژوهش حاضر از طریق سایت پرس لاین، طراحی، توزیع و جمع‌آوری شد.

شایان ذکر است مقایسه ارتباط بین ابعاد شاخص‌هایی که محققان آن را شناسایی کردند و ابعاد پرسش‌نامه دانشگاه وارویک، در جدول ۲ آمده است. هدف از این کار، شناسایی و تحلیل همپوشانی‌ها و تفاوت‌های موجود بین این دو مجموعه از شاخص‌هاست. این مقایسه به ما کمک می‌کند تا درک بهتری از عوامل مؤثر بر آمادگی صنعت ۴,۰ به دست آوریم و همچنین اعتبار و قابلیت اعتماد ابزار ارزیابی استفاده‌شده را تقویت کنیم. به علاوه، نتایج این مقایسه به توسعه نظری و عملی در زمینه ارزیابی آمادگی صنایع منجر می‌شود و مسیرهای جدیدی را برای تحقیقات آینده فراهم می‌آورد.

با توجه به اینکه در این پژوهش از پرسش‌نامه استاندارد دانشگاه وارویک استفاده شد و پرسش‌نامه مذکور به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف به کار رفت، روایی و پایایی آن در زمینه ارزیابی آمادگی صنعت ۴,۰ تأیید شده است.

ابزار ارزیابی ارائه‌شده از سوی دانشگاه وارویک برای ارزیابی میزان آمادگی سازگاری صنعت ۴,۰، در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- ابعاد اصلی و فرعی ابزار ارزیابی میزان آمادگی صنعت ۴,۰ ارائه شده از سوی دانشگاه وارویک (Agca et al., 2017)

Table 3- The main and sub-dimensions of the Industry 4.0 readiness assessment tool provided by the University of Warwick (Agca et al., 2017)

ابعاد	ابعاد فرعی
محصولات و خدمات	سفارشی سازی محصولات
	ویژگی های دیجیتال محصولات
	خدمات داده محور
	سطح استفاده از داده های محصول
	سهم درآمد
تولید و عملیات	اتوماسیون
	یکپارچه سازی ماشین و سیستم عملیاتی (M2M)
	آمادگی تجهیزات برای صنعت ۴,۰
	قطعات خودکار (ربات های صنعتی که وظایف مختلفی مثل جوشکاری و مونتاژ را به طور خودکار انجام می دهند)
	فرایندهای خودبهبود سازی
استراتژی و سازمان	مدل سازی دیجیتال
	جمع آوری داده های عملیاتی
	استفاده از داده های عملیات
	استفاده از راه حل ابری
	امنیت داده و فناوری اطلاعات
زنجیره تامین	درجه اجرای استراتژی
	اندازه گیری
	سرمایه گذاری ها
	قابلیت های افراد
	همکاری
مدل تجاری	رهبری
	تأمین مالی
	کنترل موجودی با استفاده از مدیریت داده بلادرنگ
	یکپارچه سازی زنجیره تامین
	رؤیت پذیری زنجیره تامین
ملاحظات حقوقی	انعطاف پذیری زنجیره تامین
	مدت زمان تحویل سفارش (LT ^{۲۹})
	مدل کسب و کار «به عنوان خدمات»
	تصمیمات مبتنی بر داده
	ردیابی در زمان واقعی
مالکیت معنوی	زمان بندی لحظه ای و خودکار
	کانال های بازاریابی یکپارچه
	کسب و کار پشتیبانی شده از فناوری اطلاعات
	مدل های قراردادی
	ریسک
ملاحظات حقوقی	حفاظت داده
	مالکیت معنوی

در ادامه، به منظور خوشه‌بندی داده‌ها به دلیل پیچیده بودن ماهیت مسئله و نیز غلبه بر ضعف‌های شناخته‌شده در روش‌های خوشه‌بندی کلاسیک، از الگوریتم آمیخته کای میانگین - الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. الگوریتم Kmeans-PSO یک ترکیب از دو الگوریتم K-means و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) است. در این الگوریتم، ابتدا تعداد خوشه‌ها (K) به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و سپس، مراکز اولیه خوشه‌ها تعیین می‌شوند. فرایند بهینه‌سازی با استفاده از PSO به شرح زیر است:

گام (۱) از میان N داده‌ای که باید خوشه‌بندی شود، تعداد k داده به صورت تصادفی انتخاب و مرکز خوشه‌ها به صورت $c_1, c_2, \dots, c_k$ در نظر گرفته می‌شود؛

گام (۲) برای t از یک تا t_{max} مراحل زیر انجام می‌شود:

۱-۲) برای ذره i ام، مقادیر V_i و X_i با استفاده از رابطه‌های (۴) و (۵) محاسبه می‌شود. هر ذره i، دارای یک موقعیت در فضای d بعدی مسئله است که در تکرار t ام، با بردار رابطه (۳) نشان داده می‌شود.

$$X_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{id}^t) \quad (۱)$$

همچنین، هر ذره دارای سرعتی است که هدایت حرکت ذره را بر عهده دارد و در تکرار t ام با بردار رابطه (۴) نمایش داده می‌شود.

$$V_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{id}^t) \quad (۲)$$

ذره در هر تکرار برای ذخیره‌کردن بهترین موقعیت پیشین خود، از حافظه‌ای با عنوان بردار P نمایانگر در رابطه (۵) استفاده می‌کند.

$$P_i^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{id}^t) \quad (۳)$$

در هر تکرار، مقادیر P_{best} یعنی بهترین موقعیتی که ذره تاکنون به آن رسیده و G_{best} بهترین موقعیتی محاسبه می‌شود که تاکنون با جمعیت ذرات به دست آمده است. در نهایت، سرعت و موقعیت هر ذره به روز می‌شود.

$$V_i(t+1) = W V_i(t) + C_1 r_{1,i}(t)(p_i(t) - x_i(t)) + C_2 r_{2,i}(t)(p_g(t) - X_i(t)) \quad (۴)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (۵)$$

در رابطه‌های بالا، t بیانگر شماره تکرار و پارامترهای C_1 و C_2 عامل‌های یادگیری و نیز r_1 و r_2 دو عدد تصادفی یکنواخت‌اند که در بازه [0,1] قرار دارند (Golmakani & Fazel, 2011). برای محاسبه ضریب اینرسی (W) از رابطه (۶) استفاده می‌شود.

$$W = \frac{2}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (۶)$$

φ با کمک رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (۷)$$

در رابطه فوق $\varphi_1 = \varphi_2$ و مقدار آنها برابر با ۲/۰۵ است. برای محاسبه ضریب یادگیری شخصی (C_1)، از رابطه ۸ و برای محاسبه ضریب یادگیری جمعی (C_2) از رابطه ۹ استفاده می‌شود (Clerc & Kennedy, 2002).

$$C_1 = \chi \varphi_1 \quad (۸)$$

$$C_2 = \chi \varphi_2 \quad (۹)$$

۲-۲) فاصله اقلیدسی X_i با مراکز همه‌ی ذرات محاسبه می‌شود.

۲-۳) داده X_i به خوشه‌ای نسبت داده می‌شود که با مرکز آن خوشه، کمترین فاصله را داشته باشد (رابطه ۱۰).

$$\|x_i - c_i\| < \|x_i - c_p\|, \quad p=1,2,\dots,k, \quad p \neq j \quad (۱۰)$$

که در آن c_j بیانگر مرکز خوشه j ام و c_p بیانگر مرکز خوشه p ام است.

۲-۴) در این الگوریتم، هر ذره یک مقدار شایستگی دارد. تابع شایستگی ذرات با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$J_i = \sum_{j=1}^k \sum_{X_{ij} \in C_{ij}} d(X_p, C_{ij}) \quad (۱۱)$$

در رابطه بالا X_p بیانگر موقعیت مکانی ذره و C_{ij} بیانگر مرکز خوشه است. همچنین d و k به ترتیب نمایانگر فاصله و تعداد خوشه‌ها هستند.

۲-۵) P_{best} و G_{best} به‌روز می‌شوند.

۲-۶) مراکز خوشه‌های مربوط به هر ذره با رابطه (۱۲) به‌روز می‌شوند.

$$c_i^* = \frac{1}{N_i} \sum_{x_j \in c_i} x_i \quad i=1,2,\dots,k \quad (۱۲)$$

گام ۳) شرط توقف بررسی می‌شود. اگر شرط برقرار بود، متوقف می‌شود و در غیر این صورت به گام ۲ برمی‌گردد.

در ادامه، به‌منظور تعیین تعداد بهینه خوشه از روش سیلهوت استفاده شد. این روش براساس میانگین فاصله هریک از نمونه‌های یک خوشه با تمام نمونه‌های موجود در همان خوشه و میانگین فاصله کل نمونه موجود در خوشه‌های دیگر با یک خوشه مشخص تعریف می‌شود. براساس این دیدگاه، برای هر خوشه میزان پراکندگی و همبستگی داده‌ها تعیین می‌شود که مقادیر بیشینه این شاخص برای تعیین تعداد بهینه خوشه به کار می‌رود. شاخص سیلهوت براساس رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

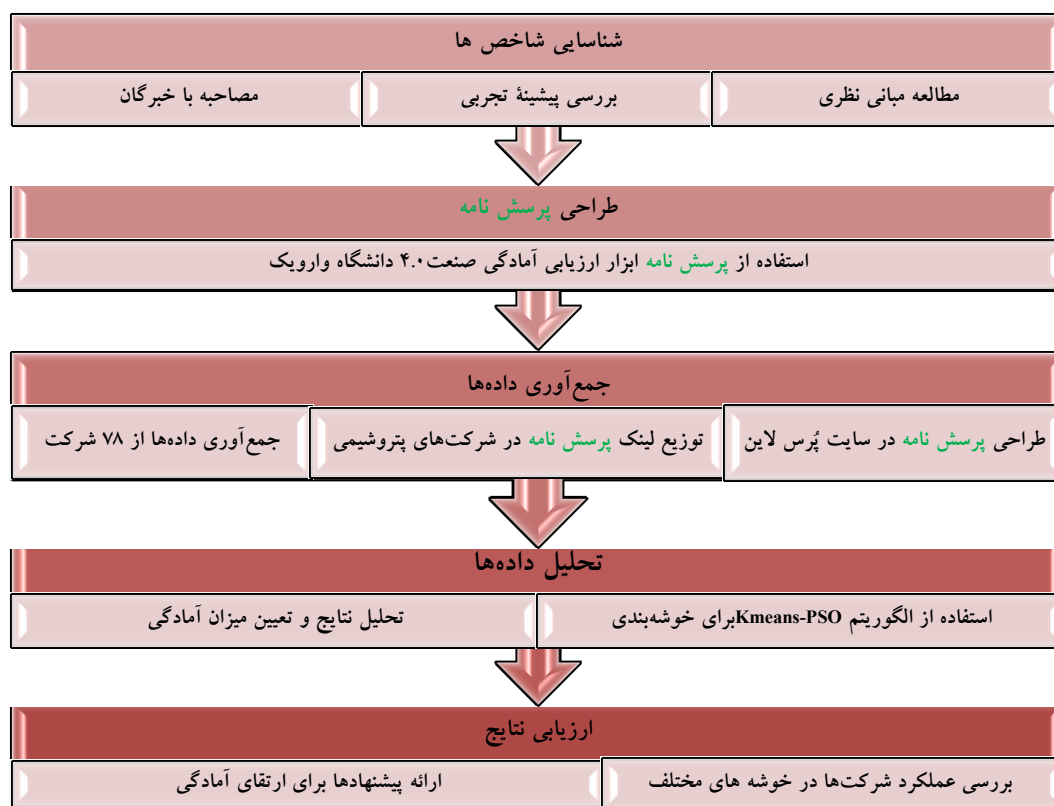
$$s(i) = \frac{(b(i) - a(i))}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (۱۳)$$

$a(i)$ نمایانگر تشابه‌داشتن درون خوشه‌ای و $b(i)$ نمایانگر تشابه‌داشتن با خوشه‌های دیگر است. مقدار این

شاخص بین ۱- تا ۱+ متغیر است. مقدار بیشتر عملکرد مطلوب‌تر خوشه‌بندی را نشان می‌دهد (Umargono et al., 2019).

۵- گام‌های اجرایی پژوهش

با توجه به اینکه هر مرحله از پژوهش به منظور دستیابی به اهداف مشخص و بهینه‌سازی نتایج طراحی شده است، گام‌های اجرایی این پژوهش به صورت خلاصه در شکل (۱) نشان داده شده است:



شکل ۱- مراحل اجرایی فرایند پژوهش

Fig. 1- Steps of conducting research

۵-۱ شبکه عصبی چندلایه (Multi layer Perceptron)

شبکه عصبی مصنوعی، از انواع مدل‌های غیرپارامتریک هوش مصنوعی با ساختار و عملکردی مشابه نورون‌ها در عصب مغز است. رایج‌ترین شبکه عصبی، شبکه عصبی چندلایه پرسپترون است. این شبکه مکمل شبکه عصبی پیش‌خور است که از سه نوع لایه (یک لایه نورون‌های ورودی، یک یا چند لایه نورون‌های پنهان و یک لایه نورون‌های خروجی) تشکیل شده است. لایه ورودی سیگنال ورودی را برای پردازش دریافت می‌کند. کار مورد نیاز، مانند پیش‌بینی و طبقه‌بندی از طریق لایه خروجی انجام می‌شود. تعداد دلخواه لایه‌های پنهان که بین لایه ورودی و خروجی قرار می‌گیرند، موتور محاسباتی واقعی MLP^{31} هستند. شبکه‌های عصبی چندلایه، مسائلی را حل می‌کنند که به صورت خطی تفکیک‌ناپذیر نیستند. طبقه‌بندی الگو، تشخیص، پیش‌بینی و تقریب از موارد استفاده این نوع شبکه‌هاست. محاسبات در لایه خروجی و لایه‌های میانی به‌ازای هر نورون به صورت رابطه ۱۴ و ۱۵ انجام می‌شود:

$$o(x) = Gb2 + W2h(x) \quad (14)$$

$$h(x) = \varphi(x) = sb1 + W1x \quad (15)$$

در روابط فوق $b1$ و $b2$ بردار بایاس و $W1$ و $W2$ و G و s تابع محرک است.

۶- مطالعه موردی و یافته‌های پژوهش

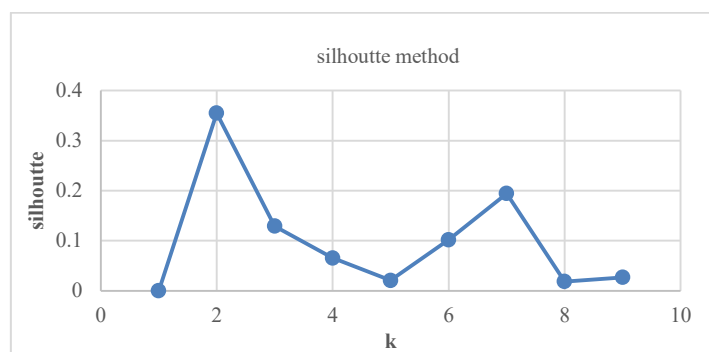
در این پژوهش در ابتدا با مطالعه کتابخانه‌ای و مصاحبه با خبرگان دانشگاهی و صنایع پتروشیمی، شاخص‌های ابزار ارزیابی میزان آمادگی شرکت‌ها شناسایی شدند؛ سپس با توجه به پرسش‌نامه که مبنای آن ابزار ارزیابی آمادگی صنعت ۴,۰ (دانشگاه وارویک) است، داده‌های ۷۸ شرکت صنایع پتروشیمی ایران جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شد. خلاصه‌ای از نتایج ارزیابی میزان آمادگی شرکت صنایع پتروشیمی ایران برای سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- خلاصه‌ای از نتایج ارزیابی آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی

Fig. 2- A summary of the results of the readiness assessment of petrochemical companies

در ادامه به منظور تعیین تعداد بهینه خوشه، از معیار سیلوئت استفاده شده است. شکل (۳) مقدار شاخص سیلوئت را به ازای مقادیرهای مختلف k نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقدار شاخص سیلوئت برای تعداد خوشه ۱ تا ۱۰

Fig.3- Silhouette index value for cluster number 1 to 10

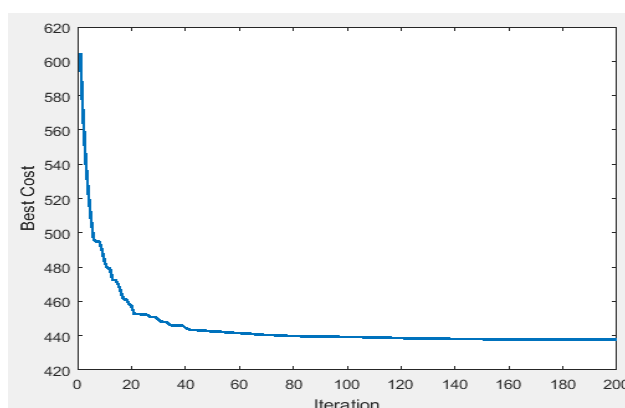
همان‌گونه در شکل فوق مشخص است، به‌ازای $k = 2$ ، مقدار سیلوئت بیشتری دارد و تعداد بهینه خوشه انتخاب می‌شود. در ادامه، الگوریتم تلفیقی به‌منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم چند بار اجرا شد. مقدار پارامترها و مقدار بهینه تابع هدف در هر اجرا در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴- مقدار پارامترهای الگوریتم Kmeans-PSO و مقدار بهینه تابع هدف

Table 4- The parameters of the Kmeans-PSO algorithm and the optimal value of the objective function

اجرای اول	اجرای دوم	اجرای سوم	اجرای چهارم	
۲	۲	۲	۲	تعداد خوشه‌ها (K)
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	ماکزیمم تعداد تکرار (Max It)
۷۰	۷۰	۵۰	۵۰	تعداد اعضای جمعیت (Npop)
۰/۷۲۹۸	۰/۷	۰/۸	۰/۹	ضریب اینرسی (w)
۱/۴۹۶۲	۲	۱/۸	۱/۴	ضریب یادگیری شخصی (C_1)
۱/۴۹۶۲	۲	۱/۸	۱/۴	ضریب یادگیری جمعی (C_2)
۴۳۷/۷۲	۴۳۹/۹۱	۴۴۰/۹۸	۴۴۳/۹۷	مقدار بهینه تابع هدف (Bestcost)

جدول فوق نشان می‌دهد مقدار Bestcost در اجرای اول نسبت به دیگر اجراها کمتر است؛ بنابراین پارامترهای مدل براساس اجرای اول تنظیم و سپس خوشه‌بندی صنایع انجام شد. در نتیجه آن، تعداد ۴۴ تا از شرکت‌ها در خوشه اول و ۳۴ شرکت دیگر در خوشه دوم قرار گرفته است. در ادامه، میزان همگرایی الگوریتم محاسبه شد. شکل (۴) همگرایی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقدار بهینه تابع هدف الگوریتم تلفیقی Kmeans-PSO

Fig. 4- Optimum value of the objective function of the combined Kmeans-PSO algorithm

بعد از اجرای الگوریتم در تکرار اول، مقدار تابع هدف برابر ۶۱۱/۲۹ و در تکرار ۲۰۰ این مقدار به ۴۳۷/۷۲ کاهش پیدا کرده است. در ادامه، پیش‌بینی عملکرد صنایع با الگوریتم دسته‌بندی شبکه‌های عصبی انجام شده است. در این پژوهش، تعداد نمونه‌ها شامل ۷۸ و تعداد ویژگی‌ها برابر ۳۷ واحد انتخاب شده است. در ستون برچسب نیز، کد خوشه هریک از نمونه‌ها، که در مرحله قبل محاسبه شد، آورده می‌شود. به منظور اجرای الگوریتم دسته‌بندی، داده‌ها به سه قسمت داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و تست یا آزمایش تقسیم‌بندی شده‌اند. جدول (۵) اطلاعات مربوط به این داده‌های مطالعه‌شده را نشان می‌دهد که براساس داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش تقسیم شدند.

جدول ۵- اطلاعات مربوط به داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش

Table 5- Information about training, validation and testing data

داده‌ها	تعداد	درصد
داده‌های آموزش	۵۴	۷۰
داده‌های اعتبارسنجی	۱۲	۱۵
داده‌های آزمایش	۱۲	۱۵

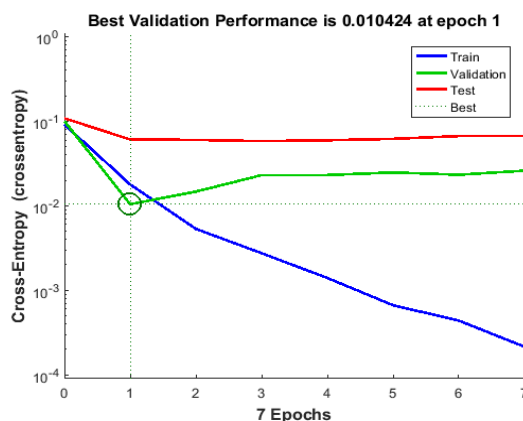
شبکه عصبی ایجادشده دارای مشخصات به شرح جدول (۶) است.

جدول ۶- اطلاعات مربوط به داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش

Table 6- Information about training, validation and testing data

مشخصات شبکه	تعداد نرون	تابع انتقال
لایه ورودی	۳۷	همانی
لایه پنهان	۱۰	sigmoid
لایه خروجی	۱	softmax

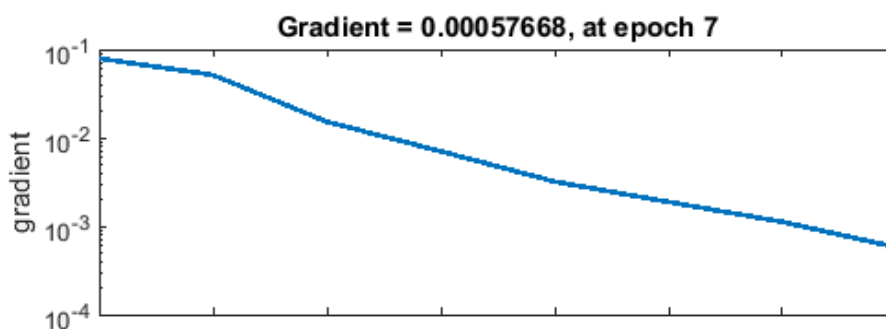
الگوریتم‌های استفاده‌شده در شبکه عصبی این پژوهش از تقسیم تصادفی^{۳۲}، آموزش با استفاده از گرادیان مزدوج مقیاس‌بندی‌شده^{۳۳} و آنتروپی متقاطع^{۳۴} استفاده شده است. از تقسیم تصادفی برای تقسیم داده‌ها به‌طور تصادفی در فرایندهای مختلف استفاده شد. از گرادیان مزدوج مقیاس‌بندی‌شده برای بهینه‌سازی و آموزش استفاده شد تا سرعت همگرایی افزایش یابد و بهینه‌سازی کارآمدتری فراهم شود. از آنتروپی متقاطع نیز، برای اندازه‌گیری فاصله بین توزیع پیش‌بینی‌شده و توزیع واقعی استفاده شد. در این پژوهش شبکه عصبی ۷۰ بار اجرا شد. خطاهای مربوط به آموزش، اعتبارسنجی و تست در قالب شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- خطاهای مربوط به آموزش، اعتبارسنجی و تست

Fig. 5- Errors related to training, validation and testing

مطابق شکل فوق، کمترین خطا و بهترین عملکرد اعتبارسنجی در تکرار ۱ و برابر با ۰/۰۱۰۴۲۴ است. در ادامه نمودار گرادیانت تابع خطا در قالب شکل (۶) آورده شده است. مشخص است که در این نمودار، کمترین مقدار گرادیانت در تکرار ۷ اتفاق افتاده است.



شکل ۶- گرادیانت تابع خطا

Fig. 6- Error function gradient

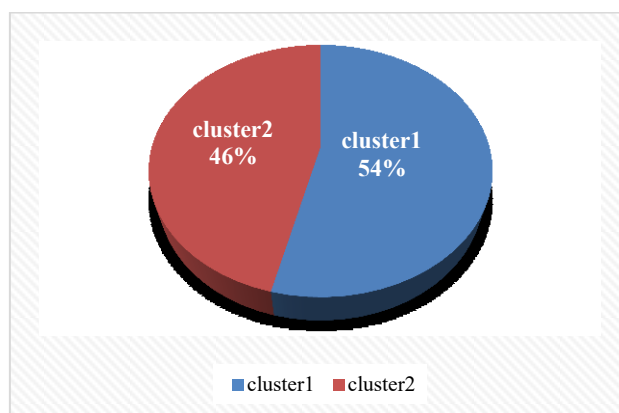
در ادامه، به منظور اندازه‌گیری شاخص‌هایی مانند دقت و صحت، مدل ماتریس سردرگمی^{۳۵} در قالب جدول (۷) محاسبه شد.

جدول ۷- ماتریس سردرگمی

Table 7- Confusion matrix

		Predicted		
		خوشه ۲	خوشه ۱	
actuale	خوشه ۱	۴۱	۱	۴۲
	خوشه ۲	۳	۳۳	۳۶
		۴۴	۳۴	۷۸

همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، در کل ۷۸ داده در مجموعه داده‌ها قرار دارد، ۴۲ داده در کلاس خروجی یک قرار دارد که ۴۱ نمونه به‌درستی و ۱ نمونه به‌اشتباه طبقه‌بندی شده است و ۳۶ داده در کلاس خروجی دو قرار دارد که ۳۳ نمونه به‌درستی و ۳ نمونه به‌اشتباه طبقه‌بندی شده است. شکل (۷) نتایج خوشه‌بندی صنایع نفتی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نتایج خوشه‌بندی صنایع پتروشیمی

Fig. 7- The results of clustering petrochemical industries

بنابراین، دقت طبقه‌بندی برای مجموعه داده‌ها ۹۴/۹٪ است. به منظور تعیین متوسط دقت تابع پیش‌بینی شبکه عصبی، الگوریتم هفتاد بار اجرا و دقت داده‌های تست در هر بار محاسبه شد. رابطه ۱۶ فاصله اطمینان میانگین دقت را محاسبه می‌کند.

$$P\left(\bar{X} - Z_{\alpha/2} S_{\bar{X}} \leq \mu_X \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} S_{\bar{X}}\right) = 1 - \alpha \quad (16)$$

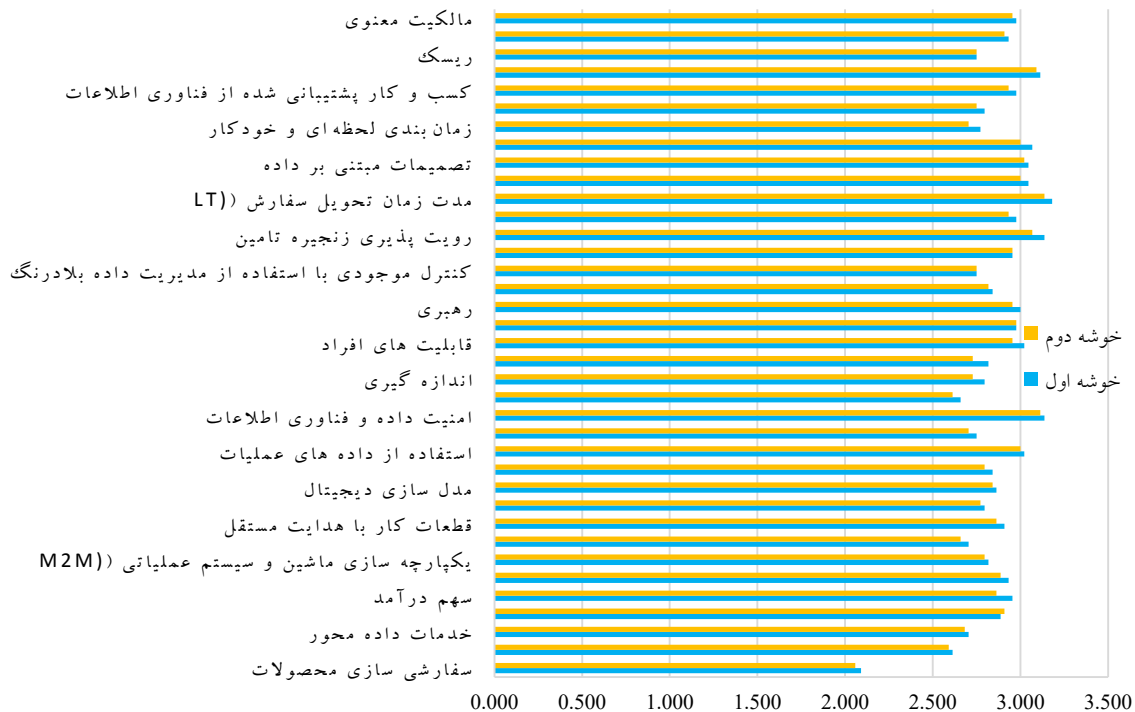
در رابطه فوق، $1 - \alpha$ سطح اطمینان، $\bar{X}$ میانگین نمونه، μ_X میانگین دقت شبکه عصبی، $S_{\bar{X}}$ انحراف معیار نمونه و n تعداد نمونه است.

$$P(89/78 \leq \mu_X \leq 92/86) = 0.95 \quad (17)$$

با ۹۵ درصد اطمینان، میانگین دقت شبکه عصبی ایجادشده در این مطالعه، بین ۸۹/۷۸ تا ۹۲/۸۶ درصد است.

۱-۶ عملکرد شرکت‌های صنایع پتروشیمی در هر خوشه

با توجه به یافته‌های الگوریتم Kmeans-PSO، صنایع پتروشیمی از حیث میزان آمادگی، در دو خوشه طبقه‌بندی شدند. مراکز خوشه‌ها در هریک از ابعاد فرعی (شاخص‌ها) در شکل (۸) نشان داده شده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که شرکت‌های صنایع پتروشیمی، متعلق به خوشه اول و خوشه دوم در بیشتر شاخص‌ها (ابعاد فرعی) دارای عملکردی پایین‌اند و تنها در شاخص‌هایی مانند استفاده از داده‌های عملیات، امنیت داده و فناوری اطلاعات، رؤیت‌پذیری زنجیره تأمین، مدت زمان تحویل سفارش (LT^{36})، مدل کسب و کار «به‌عنوان خدمات»، تصمیمات مبتنی بر داده، ردیابی در زمان واقعی و مدل‌های قراردادی عملکردی متوسط دارند.



شکل ۸- مراکز خوشه‌ها در هریک از ابعاد فرعی

Fig. 8- Cluster centers in each of the subdimensions

۶- بحث و مقایسه یافته‌ها

امروزه شرکت‌های تولیدی به دلیل پیشرفت‌های اخیر محیطی، اجتماعی، اقتصادی و فناوری با چالش‌های اساسی روبه‌رو هستند. برای رویارویی با این چالش‌ها، شرکت‌های تولیدی به قابلیت‌هایی جدید و به شیوه‌ای چابک و پاسخگو نیاز دارند. صنعت ۴،۰، انقلابی دیجیتالی است که نشان‌دهنده دیجیتالی شدن تمام سیستم‌ها و فرایندهای موجود در زنجیره ارزش سازمان است. این انقلاب بر یکپارچه‌سازی اشیای فیزیکی، ماشین‌ها، سیستم‌ها و فرایندها از طریق یک شبکه متصل تأکید دارد. فناوری‌های صنعت ۴،۰ این امکان را برای شرکت‌ها فراهم می‌آورد تا محصولات خود را با کیفیت بالاتر و هزینه پایین‌تر تولید کنند. با این حال برای دستیابی به این امکان، مستلزم تطبیق و تقویت رویکردهای تصمیم‌گیری صحیح و اجرایی در سازمان‌هاست؛ بنابراین، ارزیابی میزان آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی در سازگاری با تحولات صنعت نسل چهارم، همواره یک دغدغه اصلی است که در این مطالعه بررسی شده است.

در این پژوهش، ابتدا میزان آمادگی صنایع پتروشیمی برای سازگاری با تحولات صنعت ۴،۰ براساس ابزار ارزیابی ارائه شده از سوی دانشگاه وارویک ([Agca et al., 2017](#)) سنجش شد. همان‌طور که در شکل (۱) آمده است، وضعیت موجود صنایع پتروشیمی در ابعاد مختلف سنجش شده نشان می‌دهد که آمادگی شرکت‌های پتروشیمی ایران برای پذیرش تحولات در ابعاد استراتژی و سازمانی در سطح مبتدی (سطح یک) و در دیگر ابعاد، یعنی محصولات و خدمات، تولید و عملیات، زنجیره تأمین، ملاحظات حقوقی و مدل کسب‌وکار در سطح متوسط (سطح دو) قرار دارند. به عبارتی، آمادگی شرکت‌های پتروشیمی ایران برای پذیرش تحولات در ابعاد استراتژی و سازمانی در سطح مبتدی و در ابعاد دیگر، مانند محصولات و خدمات، تولید و عملیات، زنجیره تأمین و ملاحظات حقوقی در سطح متوسط قرار دارد. این وضعیت بیانگر این است که صنایع پتروشیمی ایران در مجموع، در شرایط مناسبی قرار ندارند. برای رسیدن به سطوح بالاتر آمادگی، یعنی رسیدن به سطح باتجربه (سطح سوم) و سطح متخصص (سطح چهارم)، به برنامه‌ریزی و اقداماتی مؤثر نیاز دارند.

یافته‌های این پژوهش همچنین نشان می‌دهد که صنایع پتروشیمی در ابعاد فرعی، درجه اجرای استراتژی، سرمایه‌گذاری‌ها و تأمین مالی، از بعد استراتژی و سازمانی پایین است و آمادگی لازم برای سازگاری با تحولات انقلاب صنعتی چهارم را ندارد. این واقعیت، ضرورت ارزیابی و تجزیه و تحلیل دقیق هریک از ابعاد سازمانی را نمایان می‌کند. آگاهی از میزان آمادگی صنایع پتروشیمی در ابعاد مختلف، به شناسایی وضعیت موجود و ارائه برنامه‌های بهبود متوازن و واقع‌بینانه کمک شایانی می‌کند. به‌طور کلی، با توجه به ابزار ارزیابی میزان آمادگی دانشگاه وارویک، هریک از ابعاد سازمان، از زوایای مختلف ارزیابی و تجزیه و تحلیل می‌شود که در شکل (۱) نتایج ارزیابی هریک از ابعاد اصلی و فرعی در شرکت‌های صنایع پتروشیمی مطالعه شده، نشان داده شده است. سیاست‌ها و استراتژی‌ها و اولویت‌های برنامه‌های سازمان در راستای تعالی عملکرد، براساس آن تنظیم می‌شود.

بخش دیگری از پژوهش حاضر، شرکت‌های صنایع پتروشیمی را خوشه‌بندی می‌کند. نتایج خوشه‌بندی نشان می‌دهد که تعداد ۴۲ واحد از صنایع پتروشیمی در خوشه اول و ۳۶ واحد دیگر در خوشه دوم قرار گرفتند.

شرکت‌های خوشه اول از حیث میزان آمادگی برای سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ عملکرد پایین‌تری دارند؛ در حالی که واحدهای خوشه دوم عملکرد متوسطی در برخی ویژگی‌ها از خود نشان می‌دهند.

درنهایت، اشاره می‌شود که تاکنون پژوهش مشابهی درباره بررسی میزان آمادگی صنایع پتروشیمی ایران در سازگاری با تحولات و همچنین خوشه‌بندی آن با رویکرد یادگیری ماشین، انجام نشده است.

از طرفی مطالعات شوماخر و همکاران (۲۰۱۶)، ارزیابی آمادگی و بلوغ شرکت‌های تولیدی را برای پذیرش مفاهیم و فناوری‌های صنعت ۴,۰، نظیر اینترنت اشیا و رایانش ابری و چالش‌های عمده‌ای را بررسی کرد که شرکت‌های تولیدی در مواجهه با مفاهیم جدید صنعت ۴,۰ با آن روبه‌رو هستند. با توجه به اینکه یافته‌های این پژوهش نشان داد که آمادگی شرکت‌های پتروشیمی ایران برای سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ در ابعاد مختلف، در سطح پایینی قرار دارد، بنابراین نظر به یافته‌های شوماخر و همکاران (۲۰۱۶)، شرکت‌های تولیدی در مواجهه با مفاهیم جدید صنعت ۴,۰ با چالش‌های جدی روبه‌رو هستند و به ارتقای سطح آمادگی خود نیاز دارند.

راج و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی نشان دادند که «فقدان استراتژی دیجیتال در کنار کمبود منابع»، برجسته‌ترین مانع در اقتصادهای توسعه‌یافته و در حال توسعه ظاهر می‌شود. این یافته‌ها با وضعیت فعلی صنایع پتروشیمی ایران همخوانی دارد؛ جایی که پایین بودن سرمایه‌گذاری‌ها و تأمین مالی، یکی از نقاط ضعف کلیدی شناسایی شده است.

میتال و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه خود، مدل‌های آمادگی شرکت‌ها را برای پذیرش فناوری‌های صنعت ۴,۰ بررسی کرده‌اند. یافته‌های آنها نشان داده است که شرکت‌ها باید به‌طور فعال در زمینه ارتقای زیرساخت‌های دیجیتال و فرهنگ نوآوری کار کنند تا به سطوح بالاتری از آمادگی دست یابند. این موضوع نیز در پژوهش حاضر تأکید شده است و نیاز مبرم به برنامه‌ریزی و اقدامات مؤثر برای ارتقای آمادگی وجود دارد.

بنابراین، با توجه به مطالب فوق و نتایج این پژوهش، نیاز است که سازمان‌ها با ارتقای سطح آمادگی خود، سطح بلوغ خود را ارزیابی و توانایی‌ها و ضعف‌هایشان را شناسایی کنند. همچنین، با توجه به فرهنگ سازمانی و فناوری‌های نوین، باید استراتژی‌های مناسبی برای دیجیتالی کردن فرایندهای خود تدوین کنند. شناخت تهدیدها و فرصت‌های صنعتی شدن و ارزیابی دقیق وضعیت فعلی، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا تهدیدها را به فرصت‌های بهبود و نوآوری تبدیل و بهترین تصمیمات استراتژیک را اتخاذ کنند.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به نقش بسیار مهم صنایع پتروشیمی در توسعه اقتصادی و با توجه به نقش مهمی که در مواردی از جمله «تأمین نیازهای داخلی»، «ایجاد اشتغال»، «ایجاد ارزش افزوده اقتصادی»، «تأثیر در محیط‌زیست» دارند، ضروری است که شرکت‌های پتروشیمی و صنایع وابسته با رویکردی جامع‌تر، موضوع سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ را بررسی کنند. این پژوهش با ارزیابی میزان آمادگی شرکت‌های صنایع پتروشیمی در سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰، نشان می‌دهد که صنایع پتروشیمی، برای سازگاری با تحولات صنعت ۴,۰ در وضعیت مناسبی قرار ندارند و هنوز در مراحل ابتدایی آمادگی برای پذیرش سازگاری‌اند. مناسب نبودن سطح آمادگی در ابعاد استراتژی و سازمانی و کمبود سرمایه‌گذاری و تأمین مالی، چالش بررسی‌پذیر است و باید در کشور به آن توجه شود. از طرفی با توجه

به وضعیت تحریم‌ها علیه ایران که تأثیرات ژرفی بر صنایع پتروشیمی داشته است، به کاهش سرمایه‌گذاری‌های خارجی، کاهش صادرات و کاهش مواد اولیه ورودی (واردات) اشاره می‌شود؛ بنابراین، ضروری است که سازمان‌ها برای کاهش وابستگی خارجی و پیشگیری از عقب‌ماندگی اقتصادی و فناوری - تکنولوژیکی، با کمک دولت و تمرکز بر بهبود زیرساخت‌ها، سطح آمادگی خود را ارتقا دهند و به تسریع روند سازگاری شرکت‌ها، با تحولات صنعت نسل چهارم کمک کنند. در راستای تحولات صنعت ۴,۰، باید با شناسایی توانایی‌ها و ضعف‌های خود و استفاده از فرصت‌ها، همچنین با تکیه بر بازارهای داخلی و تمرکز بر نوآوری و خودکفایی، استراتژی‌های مناسبی را برای دیجیتالی کردن فرایندها و افزایش سرمایه خود، تدوین کنند. نتیجه این پژوهش، گواه آمادگی نداشتن صنایع برای سازگاری با صنعت نسل ۴,۰ است که به صنایع پتروشیمی و دیگر صنایع برای بررسی وضعیت آمادگی خود و تلاش برای بهبود وضعیت در مواجهه با چالش‌های صنعت ۴,۰، کمک شایانی می‌کند.

از محدودیت‌های این پژوهش، به استفاده از ابزار ارزیابی آمادگی صنعت ۴,۰ اشاره می‌شود که دانشگاه وارویک آن را ارائه کرده است. هرچند این ابزار اعتبار و روایی خود را در تحقیقات قبلی نشان داده است، اما ممکن است این نتواند تمام ابعاد خاص صنایع پتروشیمی را به‌طور جامع پوشش دهد؛ ولی سعی شد با شناسایی شاخص‌های ارزیابی براساس مطالعات پیشین و همچنین مصاحبه با خبرگان صنعت پتروشیمی و مقایسه‌ای که بین ابعاد شاخص‌های شناسایی شده با ابعاد شاخص‌های پرسش‌نامه دانشگاه وارویک انجام شد و نتایج آن نیز در جدول (۳) آمده است، این محدودیت تا حدودی مرتفع شود.

درنهایت با اشاره مجدد به اهمیت صنایع پتروشیمی در اقتصاد کشور و بهبود آمادگی آنها برای ارتقای سطح کیفی و کمی و توجه به یافته‌های پژوهش، پژوهش‌های آینده در ادامه این پژوهش و در موضوعات زیر انجام شود:

۱. صنایع پتروشیمی ایران با دیگر کشورهای پیشرفته مقایسه شوند تا از دستاوردهای آنها، با توجه به زیرساخت‌های کشور و توانایی‌ها و ضعف‌های صنایع داخلی، بهره‌برداری شود؛

۲. در این پژوهش صنایع پتروشیمی، جامعه آماری انتخاب شدند. با توجه به اینکه تعداد این واحدها محدود است، پیشنهاد می‌شود برای افزایش اعتبار بیرونی مدل، از نمونه‌های بیشتری در صنایع نفتی ایران استفاده شود؛

۳. پیشنهاد می‌شود از الگوریتم‌های دسته‌بندی دیگر از قبیل ماشین بردار پشتیبان و درخت تصمیم و غیره نیز استفاده شود و نتایج با خروجی الگوریتم تلفیقی این مطالعه مقایسه شود؛

۴. پژوهش‌های آینده از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر از قبیل الگوریتم ژنتیک برای کمینه‌سازی تابع هدف به‌جهت جلوگیری از قرارگرفتن در دام بهینه‌های محلی الگوریتم کلی میانگین استفاده کنند؛

۵. با توجه به اهمیت صنایع پتروشیمی در اشتغال نیروی انسانی، مطالعاتی درباره نیازهای آموزشی و توسعه مهارت‌های نیروی انسانی در این صنایع با توجه به تحولات صنعت ۴,۰ انجام شود؛

۶. با توجه به تأثیر صنایع بر محیط‌زیست، پژوهش‌هایی درباره نقش صنعت ۴,۰ بر پایداری محیط‌زیست و روش‌های کاهش آلاینده‌ها اشاره کرد؛

۷. مؤلفه‌های مؤثر بر پذیرش آمادگی صنایع پتروشیمی برای سازگاری با صنعت ۴,۰ را شناسایی و رتبه‌بندی کرد.

References

- Agca, O., Gibson, J., Godsell, J., Ignatius, J., Davies, C. W., & Xu, O. (2017). *An Industry 4 readiness assessment tool*.
https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/research/scip/reports/final_version_of_i4_report_for_use_on_websites.pdf
- Akdil, K.Y., Ustundag, A., Cevikcan, E. (2018). Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy. In: *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5_4
- Anderl, R., Picard, A., Wang, Y., Fleischer, J., Dosch, S., Klee, B., & Bauer, J. (2015). Guideline Industrie 4.0- Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses. *Vdma forum industrie*, 1(1),1-31.
- Castelo-Branco, I., Cruz-Jesus, F., & Oliveira, T. (2019). Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union. *Computers in industry*, 107, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.007>
- Castro, H.F., Carvalho, A.R.F., Leal, F., Gouveia, H. (2020). Assessing Industry 4.0 Readiness of Portuguese Companies. In: Almeida, H., Vasco, J. (eds) *Progress in Digital and Physical Manufacturing*. ProDPM 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29041-2_7
- Chemnitz, M.-D. Z. (2024). *Industry 4.0 Selbstecheck*. <https://digitalzentrum-chemnitz.de/portfolio-veranstaltungen/>.
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. (2017). Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges. *Ieee Access*, 6, 6505-6519. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2783682](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783682).
- Clerc, M., & Kennedy, J. (2002). The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 6(1), 58-73. DOI: [10.1109/4235.985692](https://doi.org/10.1109/4235.985692)
- Farsijani, H., & Alah karam pour, A. (2022). Assessing the readiness to use blockchain technology in the National Iranian Gas Company. *Research in Production and Operations Management*, 13(3), 1-23. DOI: [10.22108/jpom.2022.132345.1426](https://doi.org/10.22108/jpom.2022.132345.1426)
- Golmakani, H. R., & Fazel, M. (2011). Constrained portfolio selection using particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8327-8335. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.01.020>
- Gruftman, N., Lyons, S., & Sneiders, E. (2020). Exploring readiness of SMEs for industry 4.0. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly*, (25), 54-86. <https://doi.org/10.7250/csinq.2020-25.04>
- Hofmann, E., & Rüsche, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in industry*, 89, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E., & Schröter, M. (2015). *Industrie 4.0-Readiness [dt.]*. <https://impuls-stiftung.de/wp-content/uploads/2022/05/Industrie-4.0-Readiness-deutsch.pdf>
- Maisiri, W., & Van Dyk, L. (2019). Industry 4.0 readiness assessment for South African industries. *South African Journal of Industrial Engineering*, 30(3), 134-148. <https://doi.org/10.7166/30-3-2231>
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of manufacturing systems*, 49, 194-214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>
- Monshizadeh, F., Moghadam, M. R. S., Mansouri, T., & Kumar, M. (2023). Developing an industry 4.0 readiness model using fuzzy cognitive maps approach. *International Journal of Production Economics*, 255, 108658.
- Nouinou, H., Asadollahi-Yazdi, E., Baret, I., Nguyen, N. Q., Terzi, M., Ouazene, Y., Yalaoui, F., & Kelly, R. (2023). Decision-making in the context of Industry 4.0: Evidence from the textile and clothing industry. *Journal of cleaner production*, 391, 136184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136184>
- Popkova, E. G., Ragulina, Y. V., & Bogoviz, A. V. (2019). *Industry 4.0: Industrial revolution of the 21st century*, Vol. 169. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-94310-7>
- Pozzi, R., Rossi, T., & Secchi, R. (2021). Industry 4.0 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>
- Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective.

- International Journal of Production Economics*, 224, 107546. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>
- Rajnai, Z., & Kocsis, I. (2018). Assessing industry 4.0 readiness of enterprises. *IEEE 16th world symposium on applied machine intelligence and informatics (SAMI)*, IEEE, 225-230. DOI: [10.1109/SAMI.2018.8324844](https://doi.org/10.1109/SAMI.2018.8324844)
- Ramanathan, K., & Samaranayake, P. (2022). Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: a self-diagnostic framework and an illustrative case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(3), 468-488. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2021-0339>
- Safari, E., & Ebrahimi, K. (2022). Prioritizing application areas to deploy artificial intelligence technology using thematic analysis and COPRAS. *Research in Production and Operations Management*, 13(4), 91-110. <https://doi.org/10.22108/pom.2023.134630.1457>
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia Cirp*, 52, 161-166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Sony, M., & Naik, S. (2020). Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction. *Production Planning & Control*, 31(10), 799-815. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1691278>
- Umargono, E., Suseno, J. E., & Gunawan, S. (2019). *K-Means clustering optimization using the elbow method and early centroid determination based-on mean and median*. Proceedings of the International Conferences on Information System and Technology, SCITEPRESS—Science and Technology Publications Setubal, Portugal, 234-240. <https://doi.org/10.5220/0009908402340240>
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. *International journal of distributed sensor networks*, 12(1), 3159805. <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>

¹ Kmeans-PSO

² Hannover

³ Internet of Things

⁴ Internet of Services

⁵ Big Data

⁶ Cyber-Physical Systems

⁷ Autonomous Robots

⁸ Cloud Computing

⁹ Raj et al.

¹⁰ Mittal et al.

¹¹ Schumacher et al.

¹² Agca et al.

¹³ Chemnitz

¹⁴ Anderl et al.

¹⁵ Lichtblau et al.

¹⁶ University of Warwick

¹⁷ Sony & Naik

¹⁸ Ramanathan et al.

¹⁹ I4.0RAF ۱ Industry 4.0 Readiness Assessment Framework

²⁰ Castelo -Branco et al.

²¹ Ustundag et al.

²² Castro et al.

²³ Pozzi et al.

²⁴ Rajnai and Kocsis

²⁵ Farsijani & Alah karam pour

²⁶ Fuzzy Analytical Hierarchy Process

²⁷ Safari & Ebrahimi

²⁸ COMplex PROportional ASsessment

²⁹ Lead Time

³⁰ Kmeans-PSO

³¹ Multi Layer Perceptron

³² Random(dividerand)

³³ Scaled Conjugate Gradient(trainscg)

³⁴ Cross-Entropy(crossentropy)

³⁵ Confusion Matrix

³⁶ Lead Time