Journal of
Improvement Management
Vol. 20 No. 1, Spting 2026 (Serial 71)

Identification and Prioritization of Components of Industrial Cluster 4.0 Using Grey Delphi and Grey Best-Worst Method

Neda Shahrzad Haghighinejad [1], Seyed Hadi Mirghaderi [2☎], Ali Mohammadi [3], Mohammad Hossein Ronaghi [4]

1- Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

2- Assistant Prof, Department of Industrial Management, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

3- Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

4- Associate Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Economics, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Abstract:

Purpose: Industrial clusters serve as critical platforms for strengthening productivity, fostering innovation, and enhancing regional competitiveness. These clusters must transform in response to the emergence of the Fourth Industrial Revolution. This research aims to identify and prioritize the key elements involved in conceptualizing and theorizing Industrial Cluster 4.0.

Method: To accomplish the aim, a systematic review and the Grey Delphi method were conducted to identify and then classify 26 key components into five main categories. Subsequently, the Grey Best–Worst Method was applied to determine the weights and priorities of these components based on the evaluations of ten industry experts who were selected using purposive sampling.

Findings: The results showed that the "smart economic development" dimension has the highest weight (47%) in the industrial cluster 4.0 model; also, the "international smart value creation" component ranked first with a weight of 20%. The dimensions of smart human capital development, smart service provision, smart market development, and smart spatial focus were ranked next.

Conclusion: These findings indicated that implementing Industry 4.0 technologies in industrial clusters requires coordinated economic, human, and managerial infrastructure, along with multi-level interaction between the government, cluster managers, and supporting institutions.

Keywords: Industrial Cluster, Cluster 4.0, Grey Best-Worst Method, Grey Delphi Method, Industry 4.0
DOI: 10.22034/jmi.2026.554341.3253

1. haghighinejad.neda@gmail.com
2. ☎Corresponding author: mirghaderi@shirazu.ac.ir
3. amohamadi1347@shirazu.ac.ir
4. Mhronaghi@shirazu.ac.ir

شناسایی و اولویت‌بندی عناصر خوشه صنعتی چهار با استفاده از روش های دلفی خاکستری و بهترین– بدترین خاکستری

دوره ۲۰ شماره ۱ (پیاپی ۷۱)
بهار ۱۴۰۵

نوع مقاله: پژوهشی(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱) صفحات ۲۹ تا ۵۸

ندا شهرزاد حقیقی نژاد دانشجوی دکتری، بخش مدیریت، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
سید هادی میرقادری[1]☎ استادیار، بخش مدیریت، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
علی محمدی استاد، بخش مدیریت، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
محمدحسین رونقی دانشیار، بخش مدیریت، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

چکیده

هدف: خوشه‌های صنعتی به‌عنوان بسترهای کلیدی برای ارتقای بهره‌وری، تقویت نوآوری و افزایش رقابت‌پذیری منطقه‌ای شناخته می‌شوند و با ظهور صنعت ۴/۰ نیازمند تحول اساسی هستند. هدف این پژوهش شناسایی و اولویت‌بندی عناصر کلیدی دخیل در مفهوم‌پردازی و نظریه‌پردازی «خوشه صنعتی ۴/۰» است.

روش: در این پژوهش، ابتدا با استفاده از مرور نظام‌مند و روش دلفی خاکستری، ۲۶ مؤلفه کلیدی شناسایی و در قالب پنج بُعد اصلی طبقه‌بندی شد. سپس، به‌منظور تعیین وزن و اولویت این مؤلفه‌ها، روش بهترین–بدترین خاکستری با بهره‌گیری از نظرات ۱۰ نفر از خبرگان صنعتی که به‌صورت هدفمند انتخاب شده بودند، به‌کار گرفته شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد بُعد «توسعه اقتصادی هوشمند» با وزن ۴۷ درصد، بیشترین اهمیت را در مدل خوشه صنعتی ۴/۰ دارد. همچنین، مؤلفه «خلق ارزش هوشمند بین‌المللی» با وزن ۲۰ درصد در رتبه نخست قرار گرفت. پس از آن، ابعاد توسعه سرمایه انسانی هوشمند، ارائه خدمات هوشمند، توسعه بازار هوشمند و تمرکز فضایی هوشمند به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهد گذار به خوشه صنعتی ۴/۰ صرفاً به استقرار فناوری‌های صنعت ۴/۰ محدود نمی‌شود، بلکه مستلزم توسعه هماهنگ زیرساخت‌های اقتصادی، انسانی و مدیریتی و نیز تعاملات چندسطحی میان دولت، مدیران خوشه و نهادهای پشتیبان است.

واژگان کلیدی: خوشه صنعتی، خوشه ۴/۰، روش بهترین- بدترین خاکستری، روش دلفی خاکستری، صنعت ۴/۰.

۱. ☎مسئول مکاتبات: mirghaderi@shirazu.ac.ir

۱- مقدمه

در اقتصاد جهانی‌شده‌ی امروز، شرکت‌ها با رقابت شدید، تقاضای فزاینده برای محصولات با کیفیت، و تحولات فناورانه گسترده مواجه‌اند. همه‌گیری کووید-۱۹ نیز مسیرهای صنعتی‌شدن را دگرگون کرده و گذار به دیجیتالی‌شدن را تسریع بخشیده است. در این میان، صنعت ۴/۰ به‌عنوان موج جدیدی از انقلاب صنعتی، با گسترش ظرفیت‌های پردازش، ذخیره‌سازی و ارتباطات، زمینه‌ساز تحول دیجیتال در زنجیره‌های ارزش جهانی شده و ساختارهای اقتصادی و صنعتی را دگرگون کرده است (Olomu, Binuyo and Oyebisi 2023, 164-165). در این بستر، خوشه‌های صنعتی به‌عنوان تمرکز جغرافیایی شرکت‌های مرتبط، تامین‌کنندگان تخصصی، ارائه‌دهندگان خدمات و نهادهای پشتیبان، نقش مهمی در ارتقاء بهره‌وری، نوآوری و رقابت‌پذیری ایفا می‌کنند (Götz and Jankowska 2018, 384). در کشورهای در حال توسعه جهان، خوشه‌ها به دلیل تأثیر در اشتغال، تولید و صادرات به‌عنوان بخش مهمی شناخته می‌شوند (Olomu, Binuyo and Oyebisi 2023, 166). بین‌المللی‌شدن بسیاری از شرکت‌ها، به‌ویژه بنگاه‌های کوچک و متوسط، تا حد زیادی به حضور آن‌ها در ساختار خوشه‌ای نسبت داده می‌شود (Götz and Jankowska 2017, 1636).

با ظهور صنعت ۴/۰، خوشه‌ها می‌توانند به‌عنوان گره‌هایی در معماری پلتفرم‌های فناورانه عمل کرده و بستر مناسبی برای اجرای پروژه‌های پیشرفته و آزمون فناوری‌های صنعت ۴/۰ فراهم سازند. بنابراین، شرکت‌های فعال در خوشه‌های صنعتی، با بهره‌گیری از ظرفیت‌های شبکه‌ای و فضای اعتماد متقابل، آمادگی بیشتری برای مواجهه با چالش‌های صنعت ۴/۰ دارند. با وجود پیچیدگی‌های صنعت ۴/۰، خوشه‌های صنعتی می‌توانند در صنایع سنتی و پیشرفته نقش‌آفرینی کرده و به‌عنوان ساختارهایی منعطف، زمینه‌ساز توسعه فناورانه باشند (Götz and Jankowska 2018, 385). با این حال، با توجه به وابستگی خوشه‌ها به مکان و تمرکز صنعت ۴/۰ بر فعالیت‌های پراکنده و مبتنی بر فناوری اطلاعات، در نگاه نخست، این دو مفهوم ممکن است ناسازگار به نظر برسند (Götz 2021, 54).

خوشه‌های صنعتی بازتابی از درک جامع صنعت ۴/۰ هستند که فراتر از دیجیتالی‌سازی تولید، کل اکوسیستم شامل انسان‌ها، ماشین‌ها و سازمان‌ها را در بر می‌گیرند. در این چارچوب، اکوسیستم دیجیتال کارآفرینی به‌عنوان پیش‌نیاز کلیدی گذار موفق به صنعت ۴/۰ شناخته می‌شود و خوشه‌ها می‌توانند بستر مناسبی برای شکل‌گیری چنین محیطی فراهم سازند (Götz and Jankowska 2017, 1640). با گسترش رقابت بین‌المللی در عصر صنعت ۴/۰، خوشه‌های صنعتی به‌عنوان ساختارهایی حمایتی، زمینه‌ساز ارتقاء بهره‌وری، نوآوری و تشکیل شرکت‌های جدید شده و اثرات مثبت خود را به کل منطقه جغرافیایی منتقل می‌کنند. این ساختارها، به‌واسطه‌ی پیوند عمیق با نوآوری و اقتصاد دانش‌بنیان، به یکی از الگوهای رایج توسعه صنعتی در سطح جهانی تبدیل شده‌اند و بخش جدایی‌ناپذیر بسیاری از سیاست‌های ملی نوآوری محسوب می‌شوند. با این حال، چالش‌هایی چون ابهام در تعریف خوشه‌ها،

دشواری در ارزیابی عملکرد و فقدان سیاست‌های منسجم مبتنی بر داده‌های واقعی، مانعی در مسیر توسعه اثربخش خوشه‌های صنعتی محسوب می‌شوند (Tsakalerou and Akhmadi 2021, 320). همچنین، شرکت‌های فعال در خوشه‌ها در پذیرش فناوری‌های صنعت ۴/۰، با موانعی جدی به‌ویژه فقدان آگاهی نسبت به ویژگی‌ها و ظرفیت‌های این فناوری‌ها مواجه‌اند (Dyba and De Marchi 2022, 760). در کشورهای در حال توسعه، خوشه‌ها کمتر توانسته‌اند به اهداف مورد انتظار دست یابند و دستیابی به رشد پایدار همچنان چالشی اساسی است (سعادت یار, وظیفه و نورمحمد ۱۳۹۸, ۱۳۱). در ایران نیز تعداد ۳۵۸ خوشه کسب‌وکار با تعداد ۲۶۸ هزار بنگاه فعال شناسایی شده است که اشتغالی بالغ بر ۲ میلیون و ۷۲۰ هزار نفر را شامل می‌شوند (منوریان و همکاران، ۱۳۹۶، ۱۱). بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر ابزارهای صنعت ۴/۰ بر عناصر خوشه صنعتی و توسعه مدل بومی «خوشه صنعتی ۴/۰» انجام شده است. این مدل با تمرکز بر تحول دیجیتال، سطح آمادگی خوشه‌ها برای ورود به عصر فناوری‌های هوشمند را ارزیابی می‌کند. برخلاف مطالعات پیشین، پژوهش با تلفیق مفاهیم خوشه صنعتی و صنعت ۴/۰ چارچوبی عملیاتی برای توسعه منطقه‌ای و ارتقای رقابت‌پذیری ارائه می‌دهد. در نهایت، هدف پژوهش تدوین مدلی بومی برای خوشه صنعتی ۴/۰ است؛ مدلی که با شناسایی و اولویت‌بندی عناصر کلیدی تحول دیجیتال، چارچوبی عملی برای سیاست‌گذاری و مدیریت خوشه‌های صنعتی کشور فراهم می‌آورد. بر این اساس، پژوهش به دو پرسش اصلی پاسخ می‌دهد:

۱. عناصر قابل استفاده در مدل خوشه‌ی صنعتی ۴/۰ کدامند؟

۲. وزن عناصر قابل استفاده در مدل خوشه‌ی صنعتی ۴/۰ چگونه است؟

۱-۱- ضرورت پژوهش در بافت ایران

انتقال مستقیم الگوهای صنعت ۴/۰ بدون توجه به شرایط نهادی و اقتصادی ایران با محدودیت‌های جدی روبه‌رو است. خوشه‌های صنعتی کشور، به‌ویژه در استان فارس، نیازمند مدلی بومی هستند که ضمن همسویی با تحولات جهانی با زیرساخت‌ها و ظرفیت‌های داخلی سازگار باشد. بومی‌سازی این مدل علاوه بر ضرورت علمی، رقابت‌پذیری منطقه‌ای را ارتقا داده و سیاست‌گذاری صنعتی را در مسیر تحول دیجیتال هدایت می‌کند. شرایط خاص بازار داخلی، تحریم‌ها و نیاز به سرمایه انسانی متخصص اهمیت توجه به زمینه‌های بومی را دوچندان می‌سازد. در این بستر، خوشه‌های صنعتی موتور نوآوری و ارزش‌آفرینی‌اند، مشروط بر آنکه مدل توسعه با واقعیت‌های ایران هماهنگ شود. بنابراین، پژوهش حاضر مسیر عملی برای ارتقای توان رقابتی خوشه‌های صنعتی کشور ارائه می‌دهد.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این بخش، مبانی نظری صنعت ۴/۰ و خوشه‌های صنعتی مرور می‌شود، سپس پیشینه تجربی پژوهش‌های پیشین ارائه می‌گردد و در پایان مدل مفهومی پژوهش معرفی می‌شود.

۲-۱- تاریخچه و مفهوم صنعت چهار

اصطلاح صنعت ۴/۰ برای اولین بار در سال ۲۰۱۱ توسط یک ابتکار عمل دولت فدرال آلمان که شامل دانشگاه‌ها و شرکت‌های خصوصی بود، استفاده شد (Cannavacciuolo, et al. 2023, 1). پیشرفت-های سریع فناوری در چند دهه اخیر، انقلاب صنعتی چهارم را به وجود آورده است که در محاوره به‌عنوان صنعت ۴/۰ شناخته می‌شود (Saleem, et al. 2024, 1). صنعت ۴/۰ با یکپارچه‌سازی پیچیده دستگاه‌ها، ماشین‌ها و فن‌آوری‌های اطلاعاتی هوشمند برای ایجاد یک سیستم تولید دیجیتال مشخص می‌شود (Piron, et al. 2024, 2). محور اصلی صنعت ۴/۰، تولید مدرن یا کارخانه هوشمند است که بر شبکه‌سازی هوشمند میان سیستم‌های صنعتی، چابکی و تطبیق‌پذیری فرآیندهای صنعتی، همکاری با مصرف‌کنندگان و تامین‌کنندگان و اجرای مدل‌های خلاق کسب‌وکار دلالت دارد (Ruben, et al. 2023, 1-2).

۲-۲- فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم

برخی از رایج‌ترین فناوری‌های اصلی مرتبط با صنعت ۴/۰ عبارتند از: هوش مصنوعی[1]، بلاک‌چین، شبیه‌سازی[2]، اینترنت اشیا[3]، امنیت سایبری[4]، رایانش ابری[5]، ساخت افزودنی[6]، واقعیت افزوده[7]، تجزیه-وتحلیل کلان داده[8] (Rodrigues, Breda and Rodrigues 2024, 2). رباتیک، و چاپ سه بعدی[9] (Magagula and Awodiji 2024, 3). تعریف فناوری‌ها به شرح ذیل می‌باشد.

شبیه‌سازی: ابزارهای شبیه‌سازی امکان آزمون مدل‌های مجازی محصولات یا فرآیندها را پیش از اجرای واقعی فراهم می‌کنند و توسعه فناوری‌های جدید را بهینه می‌سازند (Dalmarco, et al. 2019, 3).

تجزیه‌وتحلیل کلان داده: مجموعه‌ای از فناوری‌ها و ابزارهایی که قادرند حجم عظیم داده‌های متنی، تصویری و چندبخشی را که به‌طور مداوم تولید می‌شود پردازش و تحلیل کنند (Dalmarco, et al. 2019, 3).

[1] Artificial Intelligence
[2] Simulation
[3] Internet of Things
[4] Cyber Security
[5] Cloud Computing
[6] Additive Manufacturing
[7] Augmented Reality
[8] Big Data Analytics
[9] 3D Printing

محاسبات یا رایانش ابری: خدماتی که دسترسی به ماشین‌ها، سیستم‌ها، نرم‌افزارها و ابزارها را از طریق شبکه‌هایی مانند اینترنت فراهم می‌کنند (Dalmarco, et al. 2019, 3).

سیستم‌های فیزیکی-سایبری[1]: دانشی دگرگون‌کننده برای کنترل سیستم‌های به‌هم پیوسته است که ویژگی‌های فیزیکی را با ظرفیت‌های محاسباتی ترکیب می‌کند (Mitra 2024, 1-2).

امنیت سایبری: خدمات و فناوری‌هایی با هدف محافظت از کاربران، سیستم‌ها، تجهیزات، شبکه‌ها و داده‌های صنعتی در برابر نفوذ غیرقانونی است (Dalmarco, et al. 2019, 3).

واقعیت افزوده: یکپارچه‌سازی اطلاعات مجازی با دنیای واقعی از طریق ترکیب عناصر سه بعدی با زمینه فضایی کارخانه (Dalmarco, et al. 2019, 3).

ساخت افزودنی: فرآیندی برای چاپ سه‌بعدی مدل‌های فیزیکی به‌منظور تجسم و پاسخ‌گویی به نیازهای مشتری است (Janmaijaya, et al. 2021, 2).

اینترنت اشیا: به معنای تجمع و اتصال اشیاء و وسایل به صورت فیزیکی و مجازی است (Janmaijaya, et al. 2021, 1).

رباتیک: انجام کارهای دشوار برای انسان را تسهیل کرده و چرخه تولید را سرعت می‌بخشد (Janmaijaya, et al. 2021, 2). رباتیک به طراحی، ساخت، برنامه‌ریزی و کنترل ربات‌ها می‌پردازد تا وظایف انسانی یا صنعتی را به صورت خودکار، هوشمند و ایمن انجام دهند.

هوش مصنوعی: توسعه سیستم‌های رایانه‌ای است که وظایف نیازمند هوش انسانی مانند یادگیری، حل مسئله، ادراک، تصمیم‌گیری و درک زبان را انجام می‌دهند (Malik, Muhammad and Waheed 2024, 1).

مرور پیشینه‌های تجربی نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی به معرفی فناوری‌های صنعت ۴/۰ در خوشه‌های صنعتی پرداخته‌اند (مانند (Mackiewicz and Götz 2024)، (Wang and Lin 2024)، (Olomu, Binuyo and Oyebisi 2023)، و (Dalmarco, et al. 2019))، این تحقیقات غالباً رویکردی توصیفی داشته و کمتر به اولویت‌بندی عناصر تحول دیجیتال یا سنجش آمادگی خوشه‌ها در ایران پرداخته‌اند؛ همچنین مدل‌های عملیاتی برای تلفیق فناوری‌ها ارائه نشده است. پژوهش حاضر با روش‌های چندمعیاره خاکستری این عناصر را شناسایی و در چارچوبی بومی اولویت‌بندی می‌کند تا شکاف میان ادبیات توصیفی و نیاز به مدل‌های کاربردی پر شود.

۲-۳- مفهوم، تاریخچه و نظریه‌های مرتبط با خوشه صنعتی

خوشه‌های صنعتی سازمان‌هایی هستند که از نظر جغرافیایی گروه‌بندی شده‌اند و به دنبال تسهیل تحول صنعتی هستند (Muzamwese, Franco-Garcia and Heldeweg 2024, 3). سابقه بحث و بررسی

[1] Cyber-Physical Systems

علمی در زمینه خوشه‌های صنعتی به حدود ۱۹۲۰ میلادی باز می‌گردد که آلفرد مارشال[1] در کتاب خود تحت عنوان «اصول علم اقتصاد» نشان داد تمرکز فعالیت‌های تخصصی در مناطق صنعتی باعث افزایش صرفه‌های بیرونی شرکت‌ها می‌شود، صرفه‌های بیرونی مارشال معروفند. با حضور این سه عامل در فضای کسب‌وکار، یک خوشه صنعتی به وجود می‌آید (میرقادری و همکاران، ۱۳۹۴، ۳).

بحث‌های مربوط به خوشه‌های صنعتی را می‌توان در بحث آدام اسمیت[2] در مورد تقسیم کار و تخصص، نظریه مناطق صنعتی مارشال، فضای صنعتی جدید اسکات و استورپر[3] و مدل الماس پورتر[4] مشاهده کرد. مارشال[5] (۱۸۹۰)، یک نظریه منطقه صنعتی را توسعه داد که پدیده‌ای را توضیح می‌دهد که در آن شرکت‌ها انباشته می‌شوند و یک اقتصاد یکپارچه را در سطح فضایی به‌دست می‌آورند، و پورتر و استراتژی[6] (۱۹۸۰)، نظریه خوشه را با مدرن‌سازی و تفسیر مجدد نظریه مارشال، نظام‌مند کرد. پورتر، خوشه‌ها را به‌عنوان مجموعه‌های جغرافیایی شرکت‌ها و مؤسسات مرتبط در یک صنعت خاص تعریف می‌کند. شرکت‌های خوشه‌ای، رشد قوی‌تر و نوآوری سریع‌تری را نسبت به شرکت‌های خارج از خوشه تجربه می‌کنند. این ویژگی‌ها، خوشه‌ها را پیش‌نیازی برای تقویت رقابت منطقه‌ای می‌سازد (Kim, et al. 2023, 3).

خوشه دارای پشتوانه نسبتاً متأخری است که متناسب با نظریه‌پرداز آن، در دو اندیشه‌ی مارشالی و پورتری بررسی می‌شود که به شرح ذیل می‌باشند (روحانی قادیکلایی ۱۳۹۹, ۸۷):

۱- اندیشه‌های مارشالی: پشتوانه‌ی نظری پدیده‌ی ایجاد خوشه یا تجمیع را اولین بار آلفرد مارشال در نظریه‌ی صرفه‌های اقتصادی ناشی از تجمیع، بیان کرد.

۲- اندیشه‌های پورتری: اگرچه بعضی از محققان ریشه‌ی تئوری خوشه‌ی صنعتی را از لحاظ تاریخی به نظریه‌ی مارشال ارتباط می‌دهند، برای اولین بار مایکل پورتر در کتاب مزیت نسبی ملل، نظریه‌ی خوشه‌های صنعتی را مطرح کرد. او نوع دیگری از نگرش را در مورد تحلیل مسائل مربوط به مناطق مطرح کرد که در آن، نحوه‌ی قرار گرفتن بنگاه‌های اقتصادی در طول و عرض یکدیگر و ارتباطات عمودی و افقی بین آنها در کنار نحوه‌ی تعامل با نهادهای ملی و محلی و تمامی عوامل درگیر در فرآیند تولید، به‌صورت یک کل به نام خوشه، بررسی می‌شود.

مرور ادبیات نشان می‌دهد خوشه‌های صنعتی از مارشال تا پورتر سازوکاری برای رقابت‌پذیری و نوآوری بوده‌اند؛ نظریه‌های کلاسیک بر صرفه‌های بیرونی و تمرکز جغرافیایی، و دیدگاه‌های جدید بر نوآوری، یادگیری جمعی و تعاملات شبکه‌ای تأکید دارند. خلأ اصلی، فقدان چارچوبی برای پیوند این نظریه‌ها با الزامات صنعت ۴/۰ است. پژوهش حاضر با شناسایی و اولویت‌بندی عناصر کلیدی خوشه

[1] Alfred Marshall
[2] Adam Smith's
[3] Scott and Storper's New Industrial Space
[4] Porter's Diamond Model
[5] Marshall
[6] Porter and Strategy

صنعتی ۴/۰، این شکاف را پر کرده و مدلی کاربردی برای توسعه منطقه‌ای و ارتقای رقابت‌پذیری ارائه می‌کند.

۲-۴- رابطه‌ی خوشه‌ها و صنعت ۴/۰

اصطلاح خوشه در مقایسه با صنعت ۴/۰ مفهومی قدیمی‌تر است. خوشه‌ها به‌عنوان مخازن شایستگی، علاوه بر برخورداری از منابع دانشی مانند دانشگاه‌ها، مؤسسات علمی و نیروی کار متخصص، سازوکارهایی برای توسعه و انتشار دانش از طریق همکاری‌ها و شبکه‌های اجتماعی فراهم می‌کنند. آن‌ها ابزار سیاستی نوین برای تحول دیجیتال و انقلاب صنعتی چهارم محسوب می‌شوند و شرکت‌های عضو را برای مواجهه با محیط پیچیده صنعت ۴/۰ توانمند می‌سازند. خوشه‌ها همچنین آزمایشگاهی برای آزمون فناوری‌های صنعت ۴/۰ هستند، زیرا فضای اعتماد ویژه‌ای برای خلق و انتشار دانش ایجاد می‌کنند (Götz and Jankowska 2018, 384-385).

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که خوشه‌های صنعتی به‌عنوان «مخازن شایستگی» بستر مناسبی برای پذیرش و انتشار فناوری‌های صنعت ۴/۰ و تقویت اعتماد، همکاری و آزمایش راه‌حل‌های دیجیتال هستند ((Götz and Jankowska 2018)، (Wang and Lin 2024)، و (Olomu, Binuyo and Oyebisi 2023)). با وجود این، بیشتر پژوهش‌ها بر مزایا و کارکردهای کلی خوشه‌ها تمرکز داشته و کمتر به تلفیق نظام‌مند عناصر خوشه با فناوری‌های صنعت ۴/۰ پرداخته‌اند. همچنین، مدل‌های بومی برای ارزیابی آمادگی خوشه‌ها در کشورهای در حال توسعه، به‌ویژه ایران، کمتر بررسی شده است. پژوهش حاضر با شناسایی و اولویت‌بندی عناصر کلیدی خوشه صنعتی ۴/۰ و ارائه مدلی بومی، می‌کوشد رابطه خوشه‌ها و صنعت ۴/۰ را از سطح مفهومی به چارچوبی عملی برای سیاست‌گذاری و مدیریت خوشه‌های صنعتی ایران ارتقا دهد.

۲-۵- پیشینهٔ تجربی

موید و همکاران (۱۴۰۴) با رویکرد داده‌بنیاد، راهکارهای مدیریت موفق پروژه‌های توسعه خوشه صنعتی در یزد را مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد راهبردهایی چون آگاه‌سازی و جلب همکاری ذینفعان، تأمین مشترک مواد اولیه، توسعه بازار و برندسازی، آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی، تدوین استانداردها، به‌روزرسانی فناوری، تأمین مالی و تقویت سرمایه اجتماعی به توسعه و موفقیت پروژه‌ها کمک کردند.

شهابی و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از رویکرد پویایی سیستم و تکنیک دیمتل فازی، تأثیر انقلاب صنعتی چهارم بر زنجیره تأمین خدمات بانکی را مدل‌سازی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که اتصال بازیگران جدید، همکاری بین سازمان‌ها، اشتراک اطلاعات مشتریان، سرمایه‌گذاری در فناوری اطلاعات

و توسعه زیرساخت‌های بانکداری دیجیتال بیشترین نقش را در ارتقای کارایی زنجیره دارند. این یافته‌ها بیانگر آن است که انقلاب صنعتی چهارم با تقویت همکاری‌ها و زیرساخت‌های فناورانه مسیر توسعه بانکداری دیجیتال را هموار می‌سازد.

اسعدی (۱۳۹۸) با تمرکز بر انقلاب صنعتی چهارم و اقتصاد دیجیتال، نقش آن‌ها را به‌عنوان پیشران‌های رشد اقتصادی پایدار بررسی کرده است. مطالعه با رویکرد نظری–اسنادی نشان می‌دهد که فناوری‌های نوین با کاهش هزینه‌های تولید و مبادله، رفاه اقتصادی را افزایش می‌دهند.

عارف، جعفرنژاد و کیانی بختیاری (۱۳۹۸) چارچوبی ترکیبی برای ارزیابی آمادگی بنگاه‌ها و شهرک‌های صنعتی در پیاده‌سازی مؤلفه‌های انقلاب صنعتی چهارم و توسعه سرمایه‌گذاری ارائه کرده‌اند. برای اعتبارسنجی و طراحی مدل فرایندی نیز از تکنیک دیمتل و مدل‌سازی تفسیری–ساختاری بهره گرفته شده است. شاخص‌های اصلی شامل هوشمندی کسب‌وکار، حمل‌ونقل و ارتباطات هوشمند، فرهنگ دوسوتوانی، استراتژی، منابع انسانی هوشمند، محیط زیست هوشمند، مدیریت لجستیک، هماهنگی سیاست‌های کلان و خرد، و سیستم ایمنی و بهداشت هستند.

مکیویچ و گوتز[1] (۲۰۲۴) نقش خوشه‌ها در پیشبرد راه‌حل‌های صنعت ۴/۰ در زمینه خودرو لهستان را بررسی کرده‌اند. این پژوهش با رویکرد ترکیبی، شامل تحلیل کمی داده‌های الگوبرداری پیمایشی خوشه‌ها و مطالعه موردی، رابطه میان پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴/۰ و ویژگی‌های مدیریتی و عملکردی شرکت‌های خوشه‌ای را تحلیل می‌کند. در کنار آزمون همبستگی پیرسون، داده‌های کیفی حاصل از مصاحبه با مدیران و اسناد سازمانی نیز استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد خوشه‌ها با فراهم‌کردن دسترسی به تحقیق و توسعه، تسهیل تبادل اطلاعات، صرفه‌جویی در مقیاس، اعتماد و سرریز دانش، رقابت منطقه‌ای و نوآوری را تقویت می‌کنند. همچنین توسعه مهارت‌های دیجیتالی کارکنان دفاتر هماهنگ‌کننده در مدیریت داده‌ها و تجسم اطلاعات، سطح دیجیتالی‌سازی زنجیره‌های ارزش خوشه را افزایش می‌دهد.

مک‌کرنان و مک‌درموت[2] (۲۰۲۴) با تمرکز بر اکوسیستم صنعت تجهیزات پزشکی در ایرلند، از رویکرد کیفی مبتنی بر مصاحبه‌های نیمه‌ساخت‌یافته بهره گرفته‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد که موفقیت خوشه‌های صنعتی به عواملی چون سرمایه انسانی (آموزش تخصصی و ایجاد شبکه متخصصان)، منابع مالی (سرمایه‌گذاری در تحقیقات، صندوق ملی و مشوق‌های مالیاتی)، محصولات و نوآوری، زیرساخت‌های بالینی و حمایتی، و فرهنگ و مشوق‌ها وابسته است.

وانگ و لین[3] (۲۰۲۴) با رویکرد توصیفی–تحلیلی، سازوکارهای توسعه خوشه‌های دیجیتال در ونژو چین را بررسی کرده‌اند. این مطالعه با تحلیل اسناد، داده‌های ثانویه و روندهای سیاستی، پنج سازوکار

[1] Mackiewicz and Götz
[2] McKernan and McDermott
[3] Wang and Lin

کلیدی را شناسایی می‌کند: خودمختاری بنگاه‌ها و بازار، نوآوری‌محوری، حمایت سیاستی، اثر شبکه‌ای و هم‌افزایی، و جذب و آموزش نیروی انسانی متخصص. راهبردهای پیشنهادی شامل تقویت زیرساخت‌ها، بهینه‌سازی زیست‌بوم نوآوری و پرورش استعدادهای تخصصی است.

اولمو، بینیو و اوبیسی[1] (۲۰۲۳) با رویکرد کمی و مدل‌سازی معادلات ساختاری مبتنی بر حداقل مربعات جزئی، پذیرش نوآوری‌های فناورانه اینترنت‌محور در خوشه‌های صنعتی را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد این فناوری‌ها عملکرد مالی را بهبود می‌دهند، بهره‌وری را افزایش می‌دهند، هزینه‌ها را کاهش می‌دهند و دسترسی به بازارهای جدید را فراهم می‌کنند. پژوهش همچنین بر نقش زیرساخت‌های فناورانه و سازمان‌دهی خوشه‌ای در ارتقای نوآوری و رقابت‌پذیری جهانی تأکید دارد.

فرناندز-اسکوبدو و کوواس-وارگاس[2] (۲۰۲۳) با رویکرد مفهومی–نظری، نقش صنعت ۴/۰ در شکل‌گیری خوشه‌های دیجیتال را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که یکپارچه‌سازی افراد، فرآیندها و اطلاعات از طریق پلتفرم‌های دیجیتال بدون بهره‌گیری از صنعت ۴/۰ ممکن نیست. خوشه‌های دیجیتال می‌توانند رقابت‌پذیری را ارتقا دهند، توسعه اقتصادی مناطق اجراپذیر را تقویت کنند و یکپارچه‌سازی انعطاف‌پذیر مناطق کمتر توسعه‌یافته را فراهم سازند.

انزمن و موسلی[3] (۲۰۲۲) با استفاده از تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی و الگوهای پویا، آمادگی خوشه‌ای آسه‌آن در مواجهه با انقلاب صنعتی چهارم را بررسی کردند. یافته‌ها نشان دادند سرمایه انسانی و تجارت محرک‌های اصلی تشکیل خوشه بوده و بیشترین اثر را بر قابلیت‌های فناوری داشتند. پژوهش بر اهمیت آموزش در جذب فناوری، هدایت سرمایه‌گذاری به ارتقای کیفیت نیروی انسانی و ضرورت همکاری منطقه‌ای برای آمادگی در برابر انقلاب صنعتی چهارم تأکید کرد.

کیوروگا[4] (۲۰۲۲) با مطالعه کیفی چندموردی در صنایع آمریکای لاتین، پذیرش فناوری‌های پیشرفته صنعت ۴/۰ را بررسی کرد. نتایج نشان داد این پذیرش با اصولی چون یکپارچه‌سازی فرآیند، چابکی، قابلیت همکاری، مدیریت داده‌های زمان‌واقعی، خودکارسازی، عدم تمرکز، مجازی‌سازی، انعطاف‌پذیری و خدمات‌گرایی همسو است. به‌عنوان نمونه، یکپارچه‌سازی فرآیند شامل فناوری‌هایی مانند حسگرها و عملگرها، شبکه‌های ارتباطی شناسایی از طریق امواج رادیویی- سیستم مکان‌یابی آنی، رایانش ابری و امنیت سایبری می‌شود.

اونتربرگر و مولر[5] (۲۰۲۱) با استفاده از روش یادگیری بدون‌نظارت و پیمایش ۹۴ شرکت آلمانی، خوشه‌بندی داده‌محور شرکت‌های تولیدی را بررسی کردند. نتایج نقش نوآوری، اعتماد، پایداری و جذابیت صنعت ۴/۰ آلمان را در تصمیم‌گیری‌های مکان‌یابی تولید برجسته کردند. ویژگی‌های کلیدی

[1] Olomu, Binuyo and Oyebisi
[2] Fernandez-Escobedo and Cuevas-Vargas
[3] Enzmann and Moesli
[4] Quiroga
[5] Unterberger and Müller

خوشه‌های صنعتی ۴/۰ شامل کنترل و نظارت بهتر، مشوق‌های دولتی، امنیت برنامه‌ریزی، کیفیت بالاتر، انعطاف‌پذیری بیشتر، بهبود خدمات مشتری از طریق نزدیکی جغرافیایی و ارتباط متقابل در زنجیره‌های ارزش بود.

تساکلر و اخمادی[1] (۲۰۲۱) با داده‌کاوی اطلاعات ثبت اختراع، خوشه‌های نوآوری در صنعت ۴/۰ را تحلیل کردند. یافته‌ها نشان دادند خوشه‌ها از نقش سنتی فراتر رفته و به قطب‌های نوآوری تبدیل شدند. این خوشه‌ها با کاهش سلسله‌مراتب و بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند، بهره‌وری، سهم اقتصادی، نوآوری و میزان یکپارچگی درون و برون‌خوشه‌ای را ارتقا دادند. همچنین، نقش آن‌ها در حمایت از رقابت شرکت‌های کوچک و متوسط و ایجاد اثرات سرریز منطقه‌ای برجسته شد.

گراشوف[2] و همکاران (۲۰۲۱) با رویکرد کمی و رگرسیون حداقل مربعات معمولی، اثرات تعاملی خوشه‌های صنعتی و دانش مرتبط با اینترنت اشیاء صنعتی بر نوآوری شرکت‌ها را بررسی کردند. یافته‌ها نشان دادند فناوری‌های کلیدی صنعت ۴/۰ در تولید دانش افزوده نقش مؤثری داشتند و اینترنت اشیاء صنعتی با ایجاد محرک‌های رادیکال، ظرفیت نوآوری خوشه‌ها را ارتقا داد و از طریق تقویت ارتباطات درون و برون‌سازمانی، انتقال دانش میان خوشه‌ها را تسهیل کرد.

یانکووسکا، دی ماریا و سیگلر[3] (۲۰۲۱) با روش کیفی، نقش خوشه‌های صنعتی در جذب و حمایت از شرکت‌های تابعه خارجی در عصر دیجیتال را بررسی کردند. یافته‌ها نشان دادند فناوری‌های صنعت ۴/۰ مانند اینترنت اشیاء، رباتیک، واقعیت افزوده و چاپ سه‌بعدی زنجیره‌های ارزش را بازپیکربندی کرده، همکاری‌های درون و برون‌خوشه‌ای را تسهیل و انعطاف‌پذیری تولید را ارتقا دادند. خوشه‌ها به‌عنوان آزمایشگاه‌های نوآوری، شرکت‌های خارجی را در توسعه راه‌حل‌های تخصصی، انتقال دانش و پاسخ به نیازهای صنعت یاری کردند. همچنین، صنعت ۴/۰ با نزدیک‌سازی تولیدکنندگان به بازار و مراکز تحقیق، نقش خوشه‌ها را در حفظ رقابت‌پذیری و پایداری محیطی تقویت نمود.

سیتکوفسکی[4] (۲۰۲۱) با مرور ادبیات، مدلی مفهومی برای مدیریت شایستگی‌های رابطه‌ای در خوشه‌های صنعتی ارائه داد. یافته‌ها بیانگر آن بود که توسعه همکاری‌ها و رشد نهادهای خوشه‌ای در کنار فشار رقابت جهانی، نیازمند راه‌حل‌های منطبق با صنعت ۴/۰ است. خوشه‌ها با زیرساخت‌های مادی و غیرمادی و شایستگی‌های ارتباطی گسترده، به‌عنوان اکوسیستم‌هایی مؤثر برای مواجهه با چالش‌های انقلاب صنعتی چهارم عمل کردند.

مک‌فیلیپس[5] (۲۰۲۰) با رویکرد ترکیبی و داده‌های حاصل از پیمایش ۳۱ خوشه در لهستان، موانع نوآوری باز در خوشه‌های صنعتی را بررسی کرد. پژوهش تأکید کرد نوآوری باز، در صورت وجود اعتماد

[1] Tsakalerou and Akhmadi
[2] Grashof
[3] Jankowska, Di Maria and Cygler
[4] Citkowski
[5] McPhillips

متقابل، سازگاری و همکاری نزدیک، می‌تواند به رکن تحول موفق در صنعت ۴/۰ تبدیل شود. ویژگی خوشه‌ها به‌عنوان ترکیبی از شرکت‌های رقیب و همکار، آن‌ها را برای ایفای این نقش مستعد ساخت.

گوتز[1] (۲۰۲۰) با تحلیل مفهومی و مرور ادبیات، نقش خوشه‌های صنعتی در تسهیل تحول دیجیتال و جذب سرمایه‌گذاری مستقیم خارجی را بررسی کرد. یافته‌ها نشان دادند خوشه‌ها از طریق ایجاد مراکز صلاحیت، اکوسیستم‌های انتقال فناوری، تقویت همکاری و اعتماد، و بهره‌گیری از شبکه‌ها و پلتفرم‌های منطقه‌ای، زمینه بین‌المللی‌سازی و نوآوری را فراهم کردند.

سونی و نایک[2] (۲۰۲۰) با مرور نظام‌مند ادبیات، عوامل کلیدی آمادگی سازمان‌ها برای ورود به صنعت ۴/۰ را شناسایی کردند. یافته‌ها نشان دادند اجرای موفق صنعت ۴/۰ نیازمند تحول در استراتژی، ارتقای زیرساخت‌های فناوری اطلاعات، توسعه مهارت‌های نوین کارکنان و ایجاد محیط کاری هوشمند است. نقش مدیریت ارشد در هدایت تغییرات و تأمین منابع حیاتی تلقی شد. همچنین، تأکید شد که تحول صنعت ۴/۰ علاوه بر نوآوری فنی، به سازگاری فرهنگی، منابع روان‌شناختی و یادگیری مادام‌العمر کارکنان وابسته است.

دالمارکو[3] و همکاران (۲۰۱۹) با روش مطالعه تک‌موردی خوشه فناوری‌های تولید پرتغال و مصاحبه با نمایندگان ده شرکت عضو، چالش‌ها و فرصت‌های پذیرش صنعت ۴/۰ را بررسی کردند. چالش‌ها شامل تحلیل داده‌های حجیم، ادغام فناوری‌های نوین با زیرساخت و نیروی انسانی موجود و محدودیت‌های محاسباتی بود؛ در مقابل، فرصت‌هایی چون افزایش بهره‌وری، انعطاف‌پذیری، کیفیت، امنیت سایبری و تصمیم‌گیری داده‌محور شناسایی شد. فناوری‌هایی مانند سیستم‌های سایبر–فیزیکی، واقعیت افزوده، اینترنت اشیاء، کلان‌داده و ساخت افزودنی در ارتقای کارایی، امنیت و مدیریت دانش نقش داشتند. خوشه‌ها نیز با ارتقای مهارت‌ها، بهبود زنجیره ارزش و تقویت امنیت اطلاعات، زمینه ارائه خدمات نوین را فراهم کردند.

گوتز (۲۰۱۹) با مرور ادبیات، نقش خوشه‌های صنعتی در توسعه مهارت‌های نوین و ارتقای چابکی سازمانی در عصر صنعت ۴/۰ را بررسی کرد. نتایج نشان داد خوشه‌ها با ایجاد محیطی برای تولید و انتشار دانش، به‌ویژه برای شرکت‌های کوچک و متوسط، بستری برای آزمایش فناوری‌های نوین، توسعه مهارت‌های بین‌رشته‌ای و همکاری فراهم می‌کنند. با وجود کاهش وابستگی به مجاورت فضایی، خوشه‌ها همچنان در تحریک چابکی، ورود به زنجیره‌های ارزش جدید و ارتقای انعطاف‌پذیری مؤثرند. این پژوهش همچنین بر مهارت‌های کلیدی صنعت ۴/۰ مانند خلاقیت، کارآفرینی، یادگیری سریع، همکاری انسان و ماشین و توجه به کیفیت تأکید کرد.

[1] Götz
[2] Sony and Naik
[3] Dalmarco

گوتز و یانکووسکا (۲۰۱۸) با مرور ادبیات، سازگاری خوشه‌های صنعتی با الزامات صنعت ۴/۰ را بررسی کردند. نتایج نشان داد ویژگی‌هایی مانند مجاورت فضایی، چارچوب نهادی حمایتی و تعاملات بین‌سازمانی پاسخ‌گوی نیازهای صنعت ۴/۰ هستند. خوشه‌ها به‌ویژه برای شرکت‌های کوچک و متوسط، بستری برای پیاده‌سازی فناوری‌های نوین و کاهش عدم‌اطمینان فراهم می‌کنند. همچنین، صنعت ۴/۰ موجب بازطراحی خوشه‌ها به ساختارهای افقی، بین‌بخشی و کمتر متمرکز شد.

پاپاگیانیدیس[1] و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تحلیل کلان‌داده و استخراج اطلاعات وب، روشی داده‌محور و اکتشافی برای شناسایی خوشه‌های صنعتی ارائه کردند. نتایج تأکید دارد که خوشه‌ها به سیاست‌گذاران و مدیران زنجیره تأمین در اتخاذ تصمیمات استراتژیک کمک کرده و به‌عنوان زیرساختی برای هشدار زودهنگام، تخصیص منابع کمیاب و ارتقای همکاری‌های بین‌سازمانی عمل می‌کنند.

پارک[2] (۲۰۱۸) با تحلیل مفهومی، تأثیر فناوری‌های کلیدی مانند هوش مصنوعی، کلان‌داده، رباتیک و اینترنت اشیاء بر زنجیره تولید جهانی را بررسی کرد. نتایج نشان داد خوشه‌های نوآور با حفظ نقش سنتی خود در نوآوری و تجاری‌سازی، و تطبیق با محیط دیجیتال، می‌توانند به ابزار مؤثری برای تحقق توسعه پایدار، رقابت‌پذیری جهانی و شمول اجتماعی تبدیل شوند. همکاری میان شرکت‌ها، دانشگاه‌ها و دولت‌ها نیز خوشه‌ها را به محرک‌های اصلی تحول صنعتی در عصر انقلاب صنعتی چهارم بدل ساخت.

گوتز و یانکووسکا (۲۰۱۷) با تحلیل مفهومی، تناسب خوشه‌های صنعتی با الزامات صنعت ۴/۰ را بررسی کردند. نتایج نشان داد خوشه‌ها به‌واسطه مزایایی چون پایگاه دانش، مکانیسم‌های اقتصاد تجمعی، نیروی کار متخصص، محیط پایدار و مبتنی بر اعتماد و همکاری، می‌توانند مراحل اولیه تحول دیجیتال را تسهیل کنند. در عصر انقلاب صنعتی چهارم، خوشه‌ها با ایجاد شایستگی‌های فناورانه، کاهش عدم‌اطمینان محیطی و تقویت روابط شبکه‌ای، بستر مناسبی برای توسعه و اجرای راه‌حل‌های صنعت ۴/۰ فراهم ساختند.

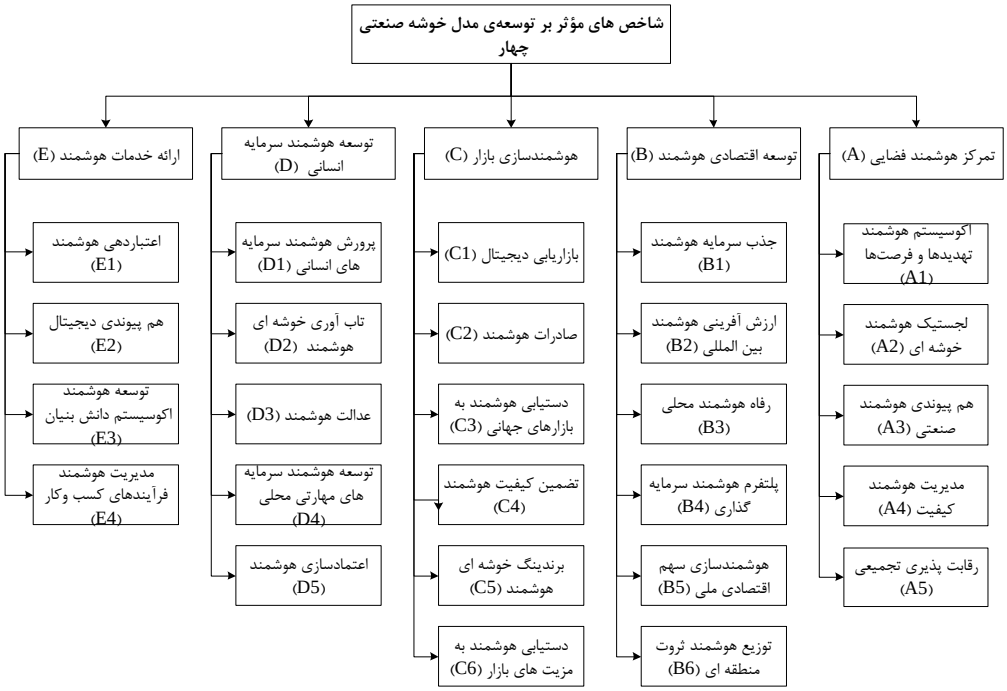
مرور پیشینه‌های تجربی نشان می‌دهد که مطالعات متعددی به بررسی نقش خوشه‌های صنعتی در پذیرش فناوری‌های صنعت ۴/۰ پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها بر اهمیت عواملی چون سرمایه انسانی، زیرساخت‌های فناورانه، همکاری‌های شبکه‌ای، نوآوری باز و سیاست‌های حمایتی تأکید داشته‌اند (مانند پژوهش‌های مکیویچ و گوتز (۲۰۲۴)، وانگ و لین (۲۰۲۴)، اولمو، بینیو و اوبیسی (۲۰۲۳)، فرناندز-اسکوبدو و کوواس-وارگاس (۲۰۲۳)، انزمن و موسلی (۲۰۲۲)، مک‌فیلیپس (۲۰۲۰)، و دالمارکو و همکاران (۲۰۱۹)). نتایج نشان می‌دهد خوشه‌ها بستر آزمایش و انتشار فناوری‌های نوین و ارتقای رقابت‌پذیری منطقه‌ای هستند، اما اغلب پژوهش‌ها رویکردی توصیفی داشته و کمتر به شناسایی و اولویت‌بندی نظام‌مند عناصر صنعت ۴/۰ پرداخته‌اند. همچنین، مدل‌های بومی برای کشورهای در حال

[1] Papagiannidis
[2] Park

توسعه، به‌ویژه ایران، کمتر ارائه شده است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (دلفی خاکستری و بهترین–بدترین خاکستری)، درصدد پر کردن این خلأ و ارائه چارچوبی بومی برای خوشه‌های صنعتی ایران است. در ایران نیز مطالعاتی درباره آمادگی بنگاه‌ها (عارف, جعفرنژاد و کیانی بختیاری ۱۳۹۸)، نقش اقتصاد دیجیتال (اسعدی ۱۳۹۸)، و اثر انقلاب صنعتی چهارم بر زنجیره‌های تأمین بانکی (شهابی و همکاران، ۱۴۰۰)، انجام شده، اما هنوز چارچوبی جامع برای تلفیق خوشه‌های صنعتی با الزامات صنعت ۴/۰ وجود ندارد.

۲–۶– مدل مفهومی

بر اساس اهداف پژوهش و مرور مبانی نظری، مدل مفهومی توسعه خوشه صنعتی ۴/۰ طراحی شد. این مدل شامل پنج شاخص اصلی و ۲۶ زیرشاخص مرتبط است که در ساختاری سلسله‌مراتبی جای‌گذاری شده‌اند. زیرشاخص‌ها به‌عنوان عوامل عملیاتی تحقق شاخص‌های اصلی را تسهیل کرده و دستیابی به هدف کلان توسعه خوشه صنعتی ۴/۰ را ممکن می‌سازند. مدل مفهومی به‌صورت گرافیکی ترسیم شده تا علاوه بر معرفی شاخص‌ها، روابط میان ابعاد نیز نمایش داده شود.



شکل ۱: شاخص‌های مؤثر بر توسعه‌ی مدل خوشه صنعتی چهار

۳- روش‌شناسی

این پژوهش، از نظر جهت‌گیری پژوهش، توسعه‌ای-کاربردی، از نظر نحوه گردآوری داده‌ها، توصیفی از نوع پیمایشی، و از نظر نوع داده، کمی بود. جامعه آماری این پژوهش شامل افراد متخصص در هفت خوشه صنعتی منتخب استان فارس است. خوشه‌های مورد بررسی عبارت بودند از: گلاب و عرقیات میمند، فرش دستباف فارس، سنگ شمال فارس، رب گوجه و ترشیجات، خرمای جنوب فارس، گیاهان دارویی و مسقطی لاری. با توجه به استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای وزن‌دهی عناصر مدل، از نظرات ۱۰ نفر از خبرگان پژوهش بهره گرفته شد. این افراد به‌صورت هدفمند انتخاب شدند و معیارهای گزینش آنان عبارتند از:

- تجربه کاری مرتبط با خوشه‌های صنعتی یا فناوری‌های نوین؛
- سابقه علمی و پژوهشی در حوزه مدیریت صنعتی یا صنعت ۴/۰؛
- رشته تخصصی مرتبط (مدیریت صنعتی، مهندسی صنایع، فناوری اطلاعات و رشته‌های مشابه)؛
- آشنایی عملی و نظری با مفاهیم و ابزارهای صنعت.

حجم نمونه مناسب در فنون تصمیم‌گیری، عددی بین ۱۰ تا ۲۰ نفر می‌باشد. حجم کمتر از ۱۰ نفر از غنای خروجی‌ها می‌کاهد و حجم بالای ۲۰ نفر، باعث پایایی و سازگاری کم نتایج می‌شود (شیرویه پور, مرتضوی و بیات ۱۴۰۲, ۱۲۲). هدف اصلی پژوهش، طراحی مدل خوشه صنعتی ۴/۰ بود. برای دستیابی به این هدف، ابتدا با روش مرور سیستماتیک، کارکردها و ویژگی‌های خوشه‌های صنعتی، مؤلفه‌های مدل‌های موجود، و ابزارهای صنعت ۴/۰ استخراج شدند. سپس عناصر شناسایی‌شده با نظر خبرگان بومی‌سازی گردیدند و با استفاده از روش دلفی خاکستری پالایش شدند. در مرحله بعد، وزن‌دهی عناصر با روش بهترین–بدترین خاکستری انجام شد. داده‌های موردنیاز از طریق پرسش‌نامه و مصاحبه نیمه‌ساختاریافته جمع‌آوری شدند. برای بررسی روایی صوری و محتوایی پرسش‌نامه، ابتدا از ادبیات تحقیق و سپس از نظر استاد راهنما و مشاوران بهره گرفته شد. این پژوهش به صورت مقطعی و در سال ۱۴۰۴ انجام شد.

۳-۱- روش دلفی خاکستری

روش دلفی نخستین‌بار توسط دالکی و هلمر[1] (۱۹۶۳) در شرکت توسعه داده شد و به‌طور گسترده در بسیاری از حوزه‌های مدیریتی مانند پیش‌بینی، تحلیل سیاست‌های عمومی، و برنامه‌ریزی پروژه، به‌کار گرفته شد. روش دلفی خاکستری، تلفیقی از نظریه سیستم خاکستری و روش دلفی بود. در این روش، از تابع وزنی سفیدکننده خاکستری مبتنی بر پرسشنامه‌های دلفی برای انتخاب شاخص‌های ارزیابی استفاده شد. فرآیند روش دلفی خاکستری به شرح زیر بود (Ma, et al. 2011, 1510-1511):

[1] Dalkey and Helmer

مرحله ۱. با توجه به نیاز ارزیابی، کلاس‌های خاکستری s توسعه یافتند و محدوده انتخاب مقدار شاخص j $\left[a_j^1, b_j^s\right]$ به k کلاس خاکستری تقسیم شد.

مرحله ۲. برای k = 1 و s، تابع وزن نیمه ذوزنقه‌ای سفیدکننده استفاده شد. فرمول‌ها به شرح زیر بودند.

(۱)

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 1, & x \ll a_j^1, \\ \dfrac{b_j^1 - x}{b_j^1 - a_j^1}, & a_j^1 < x \ll b_j^1 \\ x > b_j^1, \end{cases}$$

(۲)

$$f_j^s(x) = \begin{cases} 0, & x < a_j^s, \\ \dfrac{x - a_j^s}{b_j^s - a_j^s}, & a_j^s \ll x < b_j^s, \\ 1, & x \gg b_j^s. \end{cases}$$

برای k = m (m = 2, 3, . . . , s- 1) از تابع وزن سفیدکننده مثلثی استفاده شد. فرمول آن به شرح زیر بود:

(۳)

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x \text{ not} \in \left[a_j^k, b_j^k\right], \\ \dfrac{x - a_j^k}{\lambda_j^k - a_j^k}, & x \in \left[a_j^k, \lambda_j^k\right], \\ \dfrac{b_j^k - x}{b_j^k - \lambda_j^k}, & x \in \left[\lambda_j^k, b_j^k\right], \end{cases}$$

که $\lambda_j^k = (a_j^k + b_j^k)/2$ نقطه شروع a_j^k مرزهای پایینی kامین کلاس خاکستری در نظر گرفته شد؛ نقطه پایان b_j^k مرزهای بالایی kامین کلاس خاکستری بود.

مرحله ۳. ضریب خوشه‌بندی مصنوعی σ_j^k محاسبه شد و فرمول آن به شرح زیر بود.

$$,\sigma_j^k = \sum_{l=1}^{m} f_j^k\,(\mathrm{x}).\,\mathrm{n}_j^l \qquad (۴)$$

که در آن f_j^k تابع وزن سفیدکننده k شاخص کلاس خاکستری j بود؛ m تعداد دسته‌های نظرات کارشناسان در نظر گرفته شد؛ n_j^l وزن شاخص j در خوشه مصنوعی بود، یعنی تعداد نظرات کارشناسان در دسته l.

مرحله ۴. بردارهای تصمیم شاخص‌های ارزیابی شناسایی شدند. از معیار $max_{1\le k\le s}^k\{\sigma_j^k\} = \sigma_j^k$ برای قضاوت در مورد اینکه آیا شاخص j به کلاس k* تعلق دارد یا خیر، استفاده شد.

۳-۲- روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین- بدترین خاکستری[1]

روش BWM توسط رضایی در سال ۲۰۱۵ ارائه شد. روش پیشنهادی، در مقایسه با سایر روش‌های طراحی وزن مانند فرایند تحلیل سلسله مراتبی[2]، توانست فرآیند تصمیم‌گیری را با تعداد کمتری از مقایسه‌های زوجی انجام دهد، زمان مقایسه را کاهش دهد، و سازگاری و قابلیت اطمینان فرآیند تصمیم‌گیری را بهبود بخشد؛ ویژگی‌هایی که این روش را برای سیستم‌های پیچیده با عوامل متقابل متعدد مناسب ساخت. در روش BWM، وزن هر معیار با نشان‌دادن اولویت مهم‌ترین معیار (بهترین) نسبت به سایر معیارها و اولویت سایر معیارها نسبت به کم‌اهمیت‌ترین معیار (بدترین)، با استفاده از مقیاس عددی ۱ تا ۹ محاسبه شد (Chen, et al. 2025, 5). در عین حال، هنگام مقایسه هر معیار، ارزیابی کارشناسان با درجه‌ی خاصی از عدم قطعیت همراه بود و تنها مشخص شد که نسبت اهمیت میان هر معیار در یک بازه مشخص قرار داشت. بنابراین، روش ارزیابی کارشناسی بازه خاکستری با در نظر گرفتن عدم قطعیت اطلاعات معرفی شد و هر معیار ارزیابی تصمیم با استفاده از روش BWM برای بدست‌آوردن یک بردار وزن مقایسه گردید. فرآیند پیاده‌سازی این روش به شرح زیر بود (Li, et al. 2021, 5-6):

۱) مهم‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین معیارها بر اساس معیارهای تعیین‌شده انتخاب شدند.

۲) تعیین وزن مهم‌ترین معیارها نسبت به سایر معیارها. این پژوهش از فواصل خاکستری برای بیان این ارزش وزنی استفاده کرد. اصطلاحات زبانی مورد استفاده برای مقایسه زوجی معیارها در جدول ۱ ارائه شدند.

جدول ۱: اصطلاحات زبانی برای مقایسه زوجی معیارها (Li, et al. 2021, 5)

اصطلاحات زبانی	کدها	فاصله خاکستری
به همان اندازه مهم	E	[۱ و ۲]
نسبتاً مهم	M	[۲ و ۴]
بسیار مهم	S	[۴ و ۶]
به شدت مهم	VS	[۶ و ۸]
فوق‌العاده مهم	EX	[۸ و ۹]

بردار B_T از مقایسه زوجی بدست آمد.

(۵)

$$B_T = (\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \tilde{b}_3, \tilde{b}_4) = ([b_{11}, b_{12}], [b_{21}, b_{22}], [b_{31}, b_{32}], [b_{41}, b_{42}])$$

۳) تعیین وزن سایر معیارها نسبت به کم‌اهمیت‌ترین معیارها. بردار نسبت خاکستری WT با مقایسه سایر معیارها با کم‌اهمیت‌ترین معیارها به‌دست آمد.

[1] Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making (BWM)
[2] Analytical Hierarchy Process

(۶)

$$W_T = (\widetilde{w}_1, \widetilde{w}_2, w_3) = ([w_{11}, w_{12}], [w_{21}, w_{22}], [w_{31}, w_{32}])$$

معادله (۶)، نسبت خاکستری میان معیارهای مهم و بدترین معیارها را حذف کرد، زیرا این مقایسه پیش‌تر در معادله (۵) لحاظ شده بود.

۴) بردار وزن بهینه برای هر معیار بدست آمد. بردار وزن خاکستری بهینه را می‌توان با محاسبه قدرمطلق نسبت خاکستری هر وزن به مهم‌ترین معیارها و سایر معیارها و نسبت سایر معیارها به کم‌اهمیت‌ترین معیارها حل کرد. این بردار با حل مقدار بهینه‌ی توابع غیرخطی زیر بدست آمد. اختلاف مجاز $\tilde{\theta}= [\theta,\theta]$ قابل تنظیم در نظر گرفته شد.

$$\begin{gathered} min\ \tilde{\theta} \\ s.t. \\ \left|\frac{[w_{b1},w_{b2}]}{[w_{j1},w_{j2}]} - [b_{j1},b_{j1}]\right| \le [\theta,\theta] \\ \left|\frac{[w_{j1},w_{j2}]}{[w_{w1},w_{w2}]} - [w_{j1},w_{j1}]\right| \le [\theta,\theta] \quad (۷) \\ \sum_{i=1}^{5}(0.5 * w_{j1} + 0.5 * w_{j2}) = 1 \\ 0 \le w_{j1} \le w_{j1} \\ j = 1,2,3,\dots,n \end{gathered}$$

۴– یافته‌ها

این پژوهش با هدف طراحی مدل بومی توسعه خوشه صنعتی ۴/۰ در فارس و با روش‌های دلفی و BWM خاکستری انجام شده بود. داده‌ها با Excel 2013 و Lingo 2017 تحلیل شده بودند. ترکیب نمونه شامل ۷۰٪ مرد و ۳۰٪ زن بود. از نظر سنی، ۶۰٪ در گروه ۳۰–۴۰ سال و ۴۰٪ در ۴۰–۵۰ سال قرار داشتند. از منظر تحصیلات، ۶۰٪ کارشناسی ارشد، ۲۰٪ کارشناسی و ۲۰٪ دکتری داشتند. سابقه کاری نشان داده بود که ۶۰٪ بین ۱۰–۱۵ سال، ۳۰٪ کمتر از ۱۰ سال و ۱۰٪ بیش از ۱۵ سال تجربه داشتند. جایگاه شغلی نیز شامل ۵۰٪ عامل خوشه، ۲۰٪ ناظر، ۱۰٪ کارشناس، ۱۰٪ مدیر توسعه صنعتی و ۱۰٪ معاون شرکت شهرک‌ها بود.

۴–۱– نتایج روش دلفی خاکستری

این پژوهش با روش دلفی خاکستری انجام شد و عوامل مؤثر بر توسعه خوشه صنعتی ۴/۰ از دیدگاه خبرگان شناسایی، تأیید و غربال‌گری شدند. در مرحله نخست، ۶۱ شاخص استخراج‌شده از پیشینه توسط خبرگان بومی‌سازی و به ۲۴ شاخص کاهش یافت؛ سپس دو شاخص «رقابت‌پذیری تجمیعی» و «تاب‌آوری خوشه‌ای هوشمند» افزوده شد. در مرحله دوم، ۲۶ شاخص امتیازدهی شد که شش شاخص به دلیل عدم توافق وارد مرحله سوم شدند. در نهایت، همه شاخص‌ها طی سه مرحله به اجماع رسیدند

و ۲۶ زیرشاخص در قالب پنج دسته اصلی نهایی و در جدول ۲ ارائه گردید. برای نمونه، در زیرشاخص «اکوسیستم هوشمند تهدیدها و فرصت‌ها (A1)» پس از جمع‌آوری نظرات ۱۰ خبره، مجموع مقادیر حد پایین و بالا بر تعداد خبرگان تقسیم گردید و مقادیر ۲ و ۵ به‌دست آمد. سپس، میانگین خاکستری محاسبه و با رابطه مربوطه به عدد قطعی ۳/۵ تبدیل شد که در جدول نتایج درج گردید.

$$\text{امتیاز}_{\text{قطعی}} = \frac{2+5}{2} = 3.5$$

جدول ۲: نتایج دور دوم روش دلفی خاکستری

معیار	نماد معیار	زیرمعیار	نماد زیرمعیار	میانگین نهایی
تمرکز هوشمند فضایی	A	اکوسیستم هوشمند تهدیدها و فرصت‌ها	A1	۳/۵
		لجستیک هوشمند	A2	۳/۸
		هم‌پیوندی هوشمند صنعتی	A3	۴/۴
		مدیریت هوشمند کیفیت	A4	۴/۱
		رقابت‌پذیری تجمیعی	A5	۴/۹
توسعه اقتصادی هوشمند	B	جذب سرمایه هوشمند	B1	۳/۹
		ارزش‌آفرینی هوشمند بین‌المللی	B2	۴/۵
		رفاه هوشمند محلی	B3	۳/۷
		پلتفرم هوشمند سرمایه‌گذاری	B4	۴/۳
		هوشمندسازی سهم اقتصادی ملی	B5	۴/۲
		توزیع هوشمند ثروت منطقه‌ای	B6	۳/۹
هوشمندسازی بازار	C	بازاریابی دیجیتال	C1	۳/۶
		صادرات هوشمند	C2	۳/۷
		دستیابی هوشمند به بازارهای جهانی	C3	۴/۰
		تضمین کیفیت هوشمند	C4	۴/۹
		برندینگ خوشه‌ای هوشمند	C5	۴/۳
		دستیابی هوشمند به مزیت‌های بازار	C6	۴/۲
توسعه هوشمند سرمایه انسانی	D	پرورش هوشمند سرمایه‌های انسانی	D1	۴/۸
		تاب‌آوری خوشه‌ای هوشمند	D2	۳/۹
		عدالت هوشمند	D3	۳/۵
		توسعه هوشمند سرمایه‌های مهارتی محلی	D4	۴/۰
		اعتمادسازی هوشمند	D5	۳/۶
ارائه خدمات هوشمند	E	اعتباردهی هوشمند	E1	۳/۷
		هم‌پیوندی دیجیتال	E2	۴/۸

معیار	نماد معیار	زیرمعیار	نماد زیرمعیار	میانگین نهایی
		توسعه هوشمند اکوسیستم دانش‌بنیان	E3	۳/۸
		مدیریت هوشمند فرآیندهای کسب‌وکار	E4	۳/۹

۴-۲- نتایج روش بهترین- بدترین خاکستری

در این بخش، روش BWM خاکستری برای وزن‌دهی و اولویت‌بندی شاخص‌های مؤثر بر توسعه‌ی مدل خوشه صنعتی چهار استفاده شد که نتایج آن در جدول ۳، ارائه گردید؛ وزن‌های خاکستری از حل مدل در نرم‌افزار لینگو به‌دست آمده‌اند و سپس، با محاسبه میانگین حد بالا و پایین به وزن قطعی تبدیل شدند. به‌عنوان نمونه، وزن خاکستری معیار «تمرکز هوشمند فضایی» به صورت [۰/۰۶۰۵، ۰/۰۵۵۶] محاسبه گردید که وزن قطعی آن برابر با $\frac{0.0556+0.0605}{2} = 0.0581$ در نظر گرفته شد. برای زیرمعیار اکوسیستم هوشمند تهدیدها و فرصت‌ها، وزن خاکستری [۰/۰۷۳۹، ۰/۰۵۰۵] به‌دست آمد و میانگین آن برابر با ۰/۰۶۲۲ محاسبه گردید؛ این مقدار به‌عنوان وزن قطعی زیرمعیار لحاظ شد. اوزان نهایی زیرمعیارها از ضرب وزن معیارهای اصلی در وزن نسبی زیرمعیارها حاصل شدند که در جدول (۳) ارائه گردید. برای مثال، وزن نهایی زیرمعیار «اکوسیستم هوشمند تهدیدها و فرصت‌ها» به‌صورت زیر محاسبه شد:

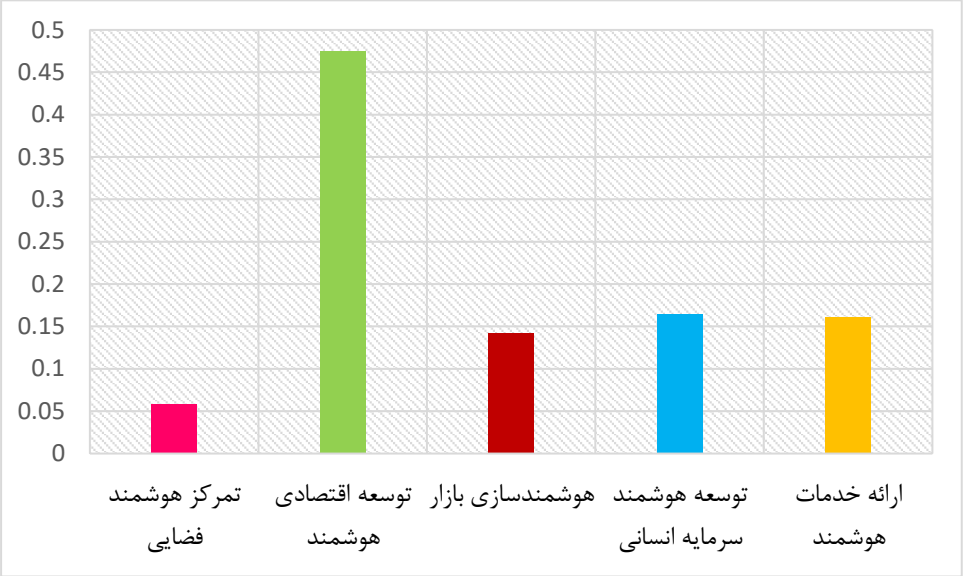
$$\text{امتیاز}_{\text{قطعی}} = 0.0581 \times 0.0622 = 0.003614$$

جدول ۳: وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها

معیار	وزن معیار	زیرمعیار	وزن نسبی زیرمعیار	وزن نهایی زیرمعیار	رتبه نهایی زیرمعیار
تمرکز هوشمند فضایی	۰/۰۵۸۱	اکوسیستم هوشمند تهدیدها و فرصت‌ها	۰/۰۶۲۲	۰/۰۰۳۶۱۴	۲۶
		لجستیک هوشمند	۰/۱۰۶۷	۰/۰۰۶۱۹۹	۲۵
		هم‌پیوندی هوشمند صنعتی	۰/۲۰۲۹	۰/۰۱۱۷۸۸	۲۰
		مدیریت هوشمند کیفیت	۰/۱۵۹۵	۰/۰۰۹۲۶۷	۲۳
		رقابت‌پذیری تجمیعی	۰/۴۶۸۸	۰/۰۲۷۲۳۷	۱۰
توسعه اقتصادی هوشمند	۰/۴۷۴۵	جذب سرمایه هوشمند	۰/۱۳۶۳	۰/۰۶۴۶۷۴	۵
		ارزش‌آفرینی هوشمند بین‌المللی	۰/۴۲۴۸	۰/۲۰۱۵۶۸	۱
		رفاه هوشمند محلی	۰/۰۵۰۲	۰/۰۲۳۸۲	۱۴
		پلتفرم هوشمند سرمایه‌گذاری	۰/۱۱۶۶	۰/۰۵۵۳۲۷	۸
		هوشمندسازی سهم اقتصادی ملی	۰/۱۴۲۶	۰/۰۶۷۶۶۴	۴

معیار	وزن معیار	زیرمعیار	وزن نسبی زیرمعیار	وزن نهایی زیرمعیار	رتبه نهایی زیرمعیار
		توزیع هوشمند ثروت منطقه‌ای	۰/۱۲۹۷	۰/۰۶۱۵۴۳	۶
هوشمندسازی بازار	۰/۱۴۲۲	بازاریابی دیجیتال	۰/۰۴۸۱	۰/۰۰۶۸۴	۲۴
		صادرات هوشمند	۰/۱۱۹۸	۰/۰۱۷۰۳۶	۱۹
		دستیابی هوشمند به بازارهای جهانی	۰/۱۳۶۰	۰/۰۱۹۳۳۹	۱۶
		تضمین کیفیت هوشمند	۰/۴۰۰۷	۰/۰۵۶۹۸	۷
		برندینگ خوشه‌ای هوشمند	۰/۱۲۰۲	۰/۰۱۷۰۹۲	۱۸
		دستیابی هوشمند به مزیت‌های بازار	۰/۱۷۵۴	۰/۰۲۴۹۴۲	۱۲
توسعه هوشمند سرمایه انسانی	۰/۱۶۴۳	پرورش هوشمند سرمایه‌های انسانی	۰/۵۳۰۷	۰/۰۸۷۱۹۴	۲
		تاب‌آوری خوشه‌ای هوشمند	۰/۱۰۶۶	۰/۰۱۷۵۱۴	۱۷
		عدالت هوشمند	۰/۰۶۲۱	۰/۰۱۰۲۰۳	۲۱
		توسعه هوشمند سرمایه‌های مهارتی محلی	۰/۱۵۷۵	۰/۰۲۵۸۷۷	۱۱
		اعتمادسازی هوشمند	۰/۱۴۳۲	۰/۰۲۳۵۲۸	۱۵
ارائه خدمات هوشمند	۰/۱۶۱۱	اعتباردهی هوشمند	۰/۰۶۱۸	۰/۰۰۹۹۵۶	۲۲
		هم‌پیوندی دیجیتال	۰/۵۱۳۸	۰/۰۸۲۷۷۳	۳
		توسعه هوشمند اکوسیستم دانش‌بنیان	۰/۱۴۹۵	۰/۰۲۴۰۸۴	۱۳
		مدیریت هوشمند فرآیندهای کسب‌وکار	۰/۲۷۵۰	۰/۰۴۴۳۰۳	۹

بر اساس نتایج روش BWM خاکستری، وزن و اهمیت این معیارها در شکل ۲، نمایش داده شد.



شکل ۲: وزن‌دهی و اولویت‌بندی معیارهای مؤثر بر توسعه‌ی مدل خوشه صنعتی چهار

در شکل ۳، وزن و اولویت زیرمعیارهای مؤثر بر توسعه‌ی مدل خوشه صنعتی چهار ارائه گردید.

شکل ۳: وزن‌دهی و اولویت‌بندی زیرمعیارهای مؤثر بر توسعه‌ی مدل خوشه صنعتی چهار

۵- بحث و نتیجه‌گیری

خوشه‌های صنعتی در سال‌های اخیر راهبردی برای ارتقای صادرات، جذب سرمایه‌گذاری و افزایش رقابت‌پذیری منطقه‌ای محسوب می‌شوند. با ظهور فناوری‌های صنعت ۴/۰، این خوشه‌ها با فرصت‌های تازه تحول روبه‌رو هستند. پژوهش حاضر بر خوشه‌های منتخب فارس تمرکز دارد و عناصر مؤثر بر توسعه

خوشه صنعتی ۴/۰ را شناسایی و اولویت‌بندی می‌کند. یافته‌های روش BWM خاکستری نشان می‌دهند «شاخص توسعه اقتصادی هوشمند» با وزن ۰/۴۷۴۵، مهمترین عامل در توسعه خوشه صنعتی چهار استان فارس است. در این دسته، «ارزش‌آفرینی هوشمند بین‌المللی» با وزن ۰/۲۰۱۵۶۸، برجسته‌ترین مؤلفه است. چرایی این نتیجه در ساختار اقتصادی منطقه، نیاز به ورود به زنجیره‌های ارزش بین‌المللی و کمبود زیرساخت‌های مالی و صادراتی دیده می‌شود. در واقع، بدون تقویت این بعد، سایر شاخص‌ها نیز اثرگذاری کامل ندارند. این یافته با نتایج مک‌کرنان و مک‌درموت (۲۰۲۴) و اولمو، بینیو و اوبیسی (۲۰۲۳)، همراستا است که بر نقش سرمایه‌گذاری بین‌المللی و ورود به بازارهای جهانی در موفقیت خوشه‌های صنعتی تأکید می‌کنند. همچنین، فرناندز-اسکوبدو و کوواس-وارگاس (۲۰۲۳)، بر اهمیت نوآوری فناورانه در کنار ارزش‌آفرینی اقتصادی تأکید دارد. تساکلر و اخمادی (۲۰۲۱)، گوتز (۲۰۲۰) و پارک (۲۰۱۸) بیشتر بر سیاست‌های حمایتی و زیرساختی تمرکز دارند. این مقایسه نشان می‌دهد پژوهش حاضر سرمایه‌گذاری، نوآوری و سیاست‌های حمایتی را ستون فقرات خوشه صنعتی ۴/۰ معرفی می‌کند. بر همین اساس، مدیران خوشه‌های صنعتی فارس و سیاست‌گذاران بر ایجاد صندوق‌های حمایتی و سرمایه‌گذاری، گسترش همکاری با نهادهای صادراتی و اتاق‌های بازرگانی، و تدوین سیاست‌های مشوق برای جذب سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی تمرکز می‌کنند.

شاخص «توسعه هوشمند سرمایه انسانی» با وزن ۰/۱۶۴۳ در رتبه دوم قرار دارد. زیرشاخص «پرورش سرمایه‌های انسانی هوشمند » با وزن ۰/۰۸۷۱۹۴، مهم‌ترین مؤلفه آن است. چرایی این یافته در شکاف مهارتی موجود در حوزه‌های دیجیتال و مدیریت داده دیده می‌شود. علاوه بر این، ضعف تاریخی در آموزش تخصصی و کمبود مهارت‌های نرم مانند کار تیمی و حل مسئله، اهمیت این شاخص را افزایش می‌دهد. در واقع، سرمایه انسانی موتور محرک تحول دیجیتال خوشه‌ها محسوب می‌شود. این نتیجه با یافته‌های (موید و همکاران، ۱۴۰۴)، همراستا است که بر ضرورت آموزش تخصصی و توانمندسازی نیروی انسانی در خوشه‌های صنعتی ایران تأکید می‌کنند. با نتایج مک‌کرنان و مک‌درموت (۲۰۲۴)، همخوانی دارد که نقش آموزش تخصصی در بهره‌برداری از فناوری‌های نوین را برجسته می‌سازند. مکیویچ و گوتز (۲۰۲۴)، بر اهمیت مهارت‌های ترکیبی (دیجیتال و مدیریتی) در رقابت‌پذیری خوشه‌ها تأکید می‌کنند و انزمن و موسلی (۲۰۲۲)، نیز نشان می‌دهند که سرمایه انسانی ماهر، عامل اصلی موفقیت در گذار به صنعت ۴/۰ است. پارک (۲۰۱۸) بیشتر بر سیاست‌های کلان آموزشی و همکاری دانشگاه–صنعت تأکید دارد. یافته پژوهش ضرورت برنامه‌های آموزشی تخصصی و همکاری با دانشگاه‌ها را برجسته می‌کند. مدیران خوشه‌های صنعتی فارس و سیاست‌گذاران بر آموزش فناوری‌های هوشمند، مدیریت داده و دیجیتال‌سازی تمرکز دارند. آموزش ترکیبی، مراکز توانمندسازی و همکاری دانشگاهی ظرفیت رقابت‌پذیری خوشه‌ها را ارتقا می‌دهد.

شاخص، «ارائه خدمات هوشمند» با وزن ۰/۱۶۱۱، در رتبه سوم قرار دارد. زیرشاخص «هم‌پیوندی دیجیتال» با وزن ۰/۰۸۲۷۷۳، برجسته‌ترین مؤلفه آن است. چرایی این نتیجه در نیاز به کاهش

هزینه‌های مبادله، تسهیل ارتباطات میان اعضای خوشه و افزایش شفافیت جریان داده‌ها نهفته است. نبود پلتفرم‌های هماهنگ‌کننده موجب کندی تصمیم‌گیری و کاهش چابکی خوشه‌ها می‌شود. این نتیجه با یافته‌های وانگ و لین (۲۰۲۴)، همراستا است که بر نقش پلتفرم‌های دیجیتال در تسهیل ارتباطات صنعتی تأکید می‌کنند. با اولمو، بینیو و اوبیسی (۲۰۲۳)، همخوانی دارد که اهمیت خدمات دیجیتال در افزایش رقابت‌پذیری خوشه‌ها را برجسته می‌سازند. اونتربرگر و مولر (۲۰۲۱)، نیز نشان می‌دهند که هم‌پیوندی دیجیتال را عامل کلیدی در نوآوری و همکاری معرفی می‌کنند. در حالی‌که، کیوروگا (۲۰۲۲)، بر نقش خدمات دیجیتال در ایجاد اعتماد و کاهش ریسک‌های تجاری تأکید دارد. دالمارکو و همکاران (۲۰۱۹)، پلتفرم‌های دیجیتال را محرک نوآوری و ارائه خدمات کسب‌وکار می‌دانند. همچنین، با سونی و نایک (۲۰۲۰)، همخوانی دارد که بر اهمیت دیجیتال‌سازی و هم‌پیوندی داده‌ها در موفقیت خوشه‌های صنعتی را برجسته می‌سازند. یانکووسکا، دی ماریا و سیگلر (۲۰۲۱)، نشان می‌دهند که خدمات هوشمند و پلتفرم‌های مشترک همکاری و رقابت‌پذیری خوشه‌ها را تقویت می‌کنند. یافته پژوهش همسویی با ادبیات جهانی و ضرورت پلتفرم‌های دیجیتال مشترک را نشان می‌دهد. مدیران و سیاست‌گذاران فارس باید بر توسعه پلتفرم‌های هماهنگ‌کننده و مراکز خدمات فناورانه تمرکز کنند تا جریان اطلاعات یکپارچه و رقابت‌پذیری خوشه‌ها تقویت شود.

شاخص «هوشمندسازی بازار» با وزن ۰/۱۴۲۲ در رتبه چهارم قرار دارد و زیرشاخص «تضمین کیفیت هوشمند» با وزن ۰/۰۵۶۹۸، مهم‌ترین مؤلفه آن است. چرایی این نتیجه در تغییر سریع نیازهای مشتریان، فشار رقابتی شدید و ضرورت استانداردسازی تولید دیده می‌شود. در حقیقت، بدون تضمین کیفیت هوشمند، خوشه‌ها توان جلب اعتماد بازار و دستیابی به جایگاه پایدار را ندارند. این نتیجه با یافته‌های وانگ و لین (۲۰۲۴)، همراستا است که نشان می‌دهند استفاده از کلان‌داده و هوش مصنوعی در تحلیل بازار، به هدف‌گذاری دقیق‌تر محصولات منجر می‌شود. با اونتربرگر و مولر (۲۰۲۱)، همخوانی دارد که بر نقش فناوری‌های هوشمند در کنترل کیفیت و استانداردسازی تولید تأکید می‌کنند. دالمارکو و همکاران (۲۰۱۹)، نیز نشان می‌دهند که تضمین کیفیت مبتنی بر فناوری، عامل کلیدی در افزایش اعتماد مشتریان و توسعه بازارهای خوشه‌ای است. پارک (۲۰۱۸) بیشتر بر بازخورد سریع مشتریان و مشارکت در بازارهای بین‌المللی تمرکز دارد. یافته پژوهش همسویی با ادبیات جهانی و ضرورت ترکیب فناوری‌های داده‌محور با سازوکارهای بازخورد بازار را نشان می‌دهد. مدیران خوشه‌های صنعتی فارس و سیاست‌گذاران دریافت بازخورد لحظه‌ای مشتریان، بهره‌گیری از داده‌کاوی برای فرصت‌های نوظهور و مشارکت در نمایشگاه‌های داخلی و خارجی را در دستور کار قرار می‌دهند تا اعتبار محصول و نفوذ بازار تقویت شود.

در رتبه پنجم، شاخص «تمرکز هوشمند فضایی» با وزن ۰/۰۵۸۱، کم‌اهمیت‌ترین شاخص در توسعه‌ی خوشه صنعتی چهار است. زیرشاخص «رقابت‌پذیری تجمیعی» با وزن نهایی ۰/۰۲۷۲۳۷، مهم‌ترین مؤلفه آن است. چرایی این نتیجه در تغییر الگوی رقابت از مجاورت فیزیکی به اتصال‌های

مجازی و دیجیتال دیده می‌شود. با این حال، برنامه‌ریزی فضایی برای ایجاد زیرساخت‌های لجستیک و انتخاب مکان‌های مناسب همچنان اهمیت دارد؛ تمرکز فضایی نقش پشتیبان شبکه‌های تولید و توزیع را حفظ می‌کند. این نتیجه با یافته‌های مکیویچ و گوتز (۲۰۲۴)، وانگ و لین (۲۰۲۴)، اولمو، بینیو و اوبیسی (۲۰۲۳)، انزمن و موسلی (۲۰۲۲)، یانکووسکا، دی ماریا و سیگلر (۲۰۲۱)، تساکلر و اخمادی (۲۰۲۱)، سیتکوفسکی (۲۰۲۱)، گوتز (۲۰۲۰)، دالمارکو و همکاران (۲۰۱۹)، گوتز (۲۰۱۹) و گوتز و یانکووسکا (۲۰۱۷) که بر کاهش وابستگی خوشه‌ها به مجاورت فیزیکی، نقش فناوری‌های هماهنگی مجازی، تلفیق زیرساخت‌های فیزیکی با پلتفرم‌های دیجیتال و اهمیت برنامه‌ریزی فضایی در کنار نوآوری فناورانه تأکید کرده‌اند، همراستا است. پاپاگیانیدیس و همکاران (۲۰۱۸) و پارک (۲۰۱۸)، بر نقش برنامه‌ریزی فضایی سنتی و انتخاب مکان‌های مناسب برای توسعه خوشه‌ها تأکید دارند. یافته پژوهش همسویی با ادبیات جهانی و ضرورت تلفیق برنامه‌ریزی فضایی با فناوری‌های دیجیتال و هماهنگی مجازی را نشان می‌دهد. مدیران خوشه‌های صنعتی فارس و سیاست‌گذاران با تدوین برنامه‌ریزی فضایی دقیق و بهره‌گیری از پلتفرم‌های دیجیتال و فناوری‌های هماهنگی مجازی وابستگی به مجاورت فیزیکی را کاهش می‌دهند و کارآمدی شبکه‌های تولید و لجستیک را ارتقا می‌بخشند.

۵-۱- پیشنهادهای سیاستی برای ایران

در سطح کلان، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که ستون‌های اصلی موفقیت خوشه‌های صنعتی در ایران، توسعه اقتصادی هوشمند و سرمایه انسانی هوشمند هستند. بنابراین، سیاست‌گذاران باید تمرکز ویژه‌ای بر ایجاد صندوق‌های حمایتی مالیاتی، جذب سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی، و طراحی برنامه‌های آموزشی تخصصی در حوزه‌های دیجیتال، مدیریت داده و فناوری‌های صنعت ۴/۰ داشته باشند. همکاری نزدیک میان دولت، دانشگاه‌ها و بخش خصوصی برای انتقال دانش و فناوری می‌تواند ظرفیت رقابت‌پذیری خوشه‌ها را به‌طور چشمگیری ارتقا دهد و مسیر توسعه پایدار را هموار سازد.

در سطح اجرایی، مدیران خوشه‌ها باید به ایجاد پلتفرم‌های دیجیتال مشترک برای تبادل داده و خدمات کسب‌وکار اقدام کنند. استفاده از فناوری‌های هوشمند در کنترل کیفیت و دریافت بازخورد لحظه‌ای از مشتریان، به ارتقای اعتبار محصولات ایرانی در بازارهای داخلی و خارجی کمک می‌کند. علاوه بر این، برنامه‌ریزی فضایی مبتنی بر داده و بهره‌گیری از فناوری‌های هماهنگی مجازی می‌تواند وابستگی به مجاورت فیزیکی را کاهش دهد و شبکه‌های تولید و لجستیک را کارآمدتر سازد. این اقدامات، مسیر توسعه خوشه‌های صنعتی ایران را در عصر صنعت ۴/۰ تقویت خواهد کرد.

۵-۲- محدودیت‌های پژوهش

با وجود طراحی دقیق پژوهش، محدودیت‌هایی وجود دارد که عبارتند از:

- تعداد محدود خبرگان: با اینکه به لحاظ علمی، حجم نمونه کافی بود ولی افزایش تعداد نمونه می‌توانست به اعتبار و تعمیم‌پذیری نتایج بیافزاید.
- تمرکز جغرافیایی: پژوهش صرفاً بر خوشه‌های صنعتی استان فارس متمرکز بوده و قابلیت تعمیم به سایر استان‌ها یا کل کشور محدود است.
- آشنایی محدود خبرگان با فناوری‌های نوین: برخی خبرگان شناخت کافی از فناوری‌های صنعت ۴/۰ مانند بلاک‌چین، اینترنت اشیاء و سیستم‌های فیزیکی–سایبری نداشتند که می‌تواند بر کیفیت داده‌ها اثرگذار باشد.
- محدودیت روش‌شناسی: تنوع روش‌های تصمیم‌گیری محدود بوده و وابستگی به یک رویکرد خاص، دامنه تحلیل را کاهش داده است.
- عدم مشارکت برخی خبرگان: تمایل پایین به همکاری، دسترسی به دیدگاه‌های متنوع را محدود کرده است.

۵–۳– مسیر پژوهش‌های آتی

با توجه به محدودیت‌های یادشده، مسیرهای آتی پژوهش می‌تواند در چند جهت توسعه یابد که عبارتند از:

استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری دیگر مانند فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، تحلیل شبکه‌ای یا تکنیک‌های مبتنی بر منطق فازی برای افزایش دقت و اعتبار نتایج.

انجام مطالعات تطبیقی در سایر استان‌ها یا مناطق صنعتی کشور برای بررسی قابلیت تعمیم مدل.

پژوهش با شناسایی و اولویت‌بندی عناصر کلیدی خوشه صنعتی ۴/۰، درک تازه‌ای از الزامات تحول دیجیتال ارائه می‌کند. این مدل نقشه راه مدیران و سیاست‌گذاران برای تخصیص منابع، طراحی آموزش و تدوین سیاست‌های حمایتی است. شاخص‌های شناسایی‌شده نیز معیار ارزیابی اثربخشی خوشه‌ها و مبنای تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده محسوب می‌شوند.

سپاسگزاری

نویسنده سپاس و قدردانی خود را از مدیران، کارشناسان و خبرگان خوشه‌های صنعتی استان فارس به‌دلیل مشارکت ارزشمند در گردآوری داده‌ها و ارزیابی شاخص‌ها ابراز می‌کند. همچنین، از حمایت نهادهای صنعتی، دانشگاهی و اجرایی استان که زمینه انجام این پژوهش را فراهم کردند، صمیمانه تشکر می‌شود.

منابع

اسعدی، مرضیه. ۱۳۹۸. "انقلاب صنعتی چهارم و اقتصاد دیجیتال: پیشران‌های رشد اقتصادی پایدار". *مطالعات کاربردی در علوم مدیریت و توسعه*، ۴(۳): ۹-۳۳.

روحانی قادیکلایی، محسن. ۱۳۹۹. "نقش خوشه‌ی صنعتی رقابت‌پذیر بر سازماندهی فضایی منطقه‌ای (موردپژوهی: شهرستان ساری)". *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۲۴(۲): ۸۵-۱۰۹.

سعادت یار، فهیمه سادات.، وظیفه، زهرا.، و یعقوبی، نورمحمد. ۱۳۹۸. "بررسی چالش‌های پیاده‌سازی خوشه صنعتی فرش استان سیستان و بلوچستان در سطح استانی: رویکردی کیفی". *بهبود مدیریت*، ۱۳(۲): ۱۳۰-۱۵۴.

شهابی، وحید.، آذر، عادل.، فائزی رازی، فرشاد.، و فلاح شمس، میر فیض. ۱۴۰۰. "مدلسازی تاثیر انقلاب صنعتی چهارم بر زنجیره تامین خدمات بانکی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم و تکنیک دیماتل فازی". *مدیریت کسب‌وکار بین‌المللی*، ۴(۱): ۶۷-۸۹.

شیرویه‌پور، شهریار.، مرتضوی، سید مرتضی.، و بیات، روح‌الله. ۱۴۰۲. "ارائهٔ مدل عوامل مؤثر بر توسعهٔ آیندهٔ شهرهای هوشمند پایدار با تأکید بر مدیریت بهینهٔ انرژی". *اقتصاد و برنامه‌ریزی شهری*، ۴(۴): ۱۱۶-۱۳۰.

عارف، محمدرضا.، جعفرنژاد، احمد.، و کیانی بختیاری، ابوالفضل. ۱۳۹۸. "ارائه چارچوب مناسب (شاخص‌های ترکیبی) ارزیابی آمادگی بنگاه‌ها و شهرک‌های صنعتی برای پیاده‌سازی مولفه‌های بنیادین انقلاب صنعتی چهارم و توسعه سرمایه‌گذاری". *دانش سرمایه‌گذاری*، ۸(۳۱): ۲۳-۴۸.

منوریان، عباس. عباسی، طیبه. سلیمانی، غلامرضا. و آقامحسنی فشمی، علی. ۱۳۹۶. "طراحی و تبیین مدل خط‌مشی‌گذاری توسعه خوشه‌های کسب‌وکار در ایران". *سیاست‌گذاری عمومی*، ۳(۴): ۹-۲۸.

موید، میترا.، طاهری، فاطمه.، صباغ‌زاده، محمدفؤاد.، حسینی، محمد.، و کشاورز، حمید. ۱۴۰۴. "مدلسازی راهکارهای مدیریت موفق پروژه‌های توسعه خوشه صنعتی با کمک تئوری داده‌بنیاد". *بهبود مدیریت*، ۱۹(۲): ۱۶۶-۱۸۴.

میرقادری، سید هادی. عالم تبریز، اکبر. فارسیجانی، حسن.، و فرزد، فرهاد. ۱۳۹۴. "شناسایی ابعاد عملکردی خوشه‌های صنعتی به روش تحلیل خوشه‌ای توافقی سلسله مراتبی". *فصلنامه علمی- پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی*، ۱۳(۳۸): ۱-۲۱.

Aref, M., Jafarinejad, A., and Kiani Bakhtiari, A. 2019. "Development of a Suitable Readiness Assessment Framework for Firms and Industrial Parks for the Adoption of the Fundamental Components of the Fourth Industrial Revolution (I4.0) and Investment Development". *Journal of Investment Knowledge*, 8(31): 23-48. [In Persian].

Asadi, M. 2019. "The Fourth Industrial Revolution and the Digital Economy: Drivers of Sustainable Economic Growth". *Applied Studies in Management Sciences and Development*, 4(3): 9-33. [In Persian].

Cannavacciuolo, L., Ferraro, G., Ponsiglione, C., Primario, S., and Quinto, I. 2023. "Technological innovation-enabling industry 4.0 paradigm: A systematic literature review". *Technovation*, 124: 102733.

Chen, L., Yu, W., Zhang, B., Wang, W., Dai, G., Zhu, J., ... and Zhao, X. 2025. "A BWM-TOPSIS Based Multi-Criteria Decision-Making Framework for Design of Cold Patching Asphalt Binder". *Case Studies in Construction Materials*, e04806.

Citkowski, M. 2021. "Managing relational competences of industrial cluster and the challenges of Industry 4.0—theoretical approach". *Marketing i Rynek*, (12): 3-16.

Dalkey, N., and Helmer, O. 1963. "An experimental application of the Delphi method to the use of experts". *Management science*, 9(3): 458-467.

Dalmarco, G., Ramalho, F. R., Barros, A. C., and Soares, A. L. 2019. "Providing industry 4.0 technologies: The case of a production technology cluster". *The journal of high technology management research*, 30(2): 100355.

Dyba, W., and De Marchi, V. 2022. "On the road to Industry 4.0 in manufacturing clusters: the role of business support organisations". *Competitiveness Review: An International Business Journal*, 32(5): 760-776.

Enzmann, P., and Moesli, M. 2022. "Seizing opportunities: ASEAN country cluster readiness in light of the fourth industrial revolution". *Asia and the Global Economy*, 2(1): 100021.

Fernandez-Escobedo, R., and Cuevas-Vargas, H. 2023. "The Digital Industrial Cluster (DIC) in a post-pandemic era: Exploring its theoretical deployment and potential benefits". *Procedia Computer Science*, 221: 1131-1138.

Gökşen, H., and & Gökşen, Y. 2021, March. "A review of maturity models perspective of level and dimension". *In Proceedings*, 74(1): p. 2. MDPI.

Götz, M. 2019. "The industry 4.0 induced agility and new skills in clusters". *Форсайт*, 13(2 (eng)): 72-83.

Götz, M. 2020. "Primer on the cluster impact on internationalisation in the form of FDI in the time of industry 4.0". *European Spatial Research and Policy*, 27(1): 195-220.

Götz, M. 2021. "Cluster role in industry 4.0–a pilot study from Germany". *Competitiveness Review: An International Business Journal*, 31(1): 54-82.

Götz, M., and Jankowska, B. 2017. Clusters and Industry 4.0–do they fit together?. *European Planning Studies*, 25(9): 1633-1653.

Götz, M., and Jankowska, B. 2018. "On the role of clusters in fostering the Industry 4.0". *In International Business in the Information and Digital Age*, 13: 379-390. Emerald Publishing Limited.

Grashof, N., Kopka, A., Wessendorf, C., and Fornahl, D. 2021. "Industry 4.0 and clusters: complementaries or substitutes in firm's knowledge creation?". *Competitiveness Review: An International Business Journal*, 31(1): 83-105.

Jankowska, B., Di Maria, E., and Cygler, J. 2021. "Do clusters matter for foreign subsidiaries in the Era of industry 4.0? The case of the aviation valley in Poland". *European research on management and business economics*, 27(2): 100150.

Janmaijaya, M., Shukla, A. K., Muhuri, P. K., and Abraham, A. 2021. "Industry 4.0: Latent Dirichlet Allocation and clustering based theme identification of bibliography". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 103: 104280.

Kim, M. K., Seo, J., Kim, N., and Chung, J. B. 2023. "Emerging industrial clusters of disaster safety industry in Korea". *Heliyon*, 9(7): 1-13.

Li, X., Ran, Y., Yu, H., Chen, Y., and Zhang, G. 2021. "Maintenance decision of meta-action unit based on Grey-BWM". *In IOP conference series: materials science and engineering*, 1043(3): 032032. IOP Publishing.

Ma, Z., Shao, C., Ma, S., and Ye, Z. 2011. "Constructing road safety performance indicators using fuzzy Delphi method and grey Delphi method". *Expert systems with applications*, 38(3): 1509-1514.

Mackiewicz, M., & Götz, M. 2024. "The role of clusters in advancing Industry 4.0 solutions: insights from the Polish automotive context". *Digital Policy, Regulation and Governance*, 26(4): 357-374.

Magagula, M. M., and Awodiji, O. A. 2024. "The implications of the fourth industrial revolution on technical and vocational education and training in South Africa". *Social Sciences & Humanities Open*, 10: 100896.

Malik, S., Muhammad, K., and Waheed, Y. 2024. "Artificial intelligence and industrial applications-A revolution in modern industries". *Ain Shams Engineering Journal*, 102886.

Marshall, A. 1890. ""Some aspects of competition." The address of the president of section F--Economic Science and Statistics--of the British Association, at the Sixtiet Meeting, held at Leeds, in September, 1890". *Journal of the Royal Statistical Society*, 53(4): 612-643.

McKernan, D., and McDermott, O. 2024. "Industrial clusters, creating a strategy for continued success". *Heliyon*, 10(7): 1-14.

McPhillips, M. 2020. "Trouble in paradise? Barriers to open innovation in regional clusters in the era of the 4th industrial revolution". *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(3): 84-97.

Mirghaderi, S.H., Alam Tabriz, A., Farsigani, H., and Farzad, F. 2015. "Identifying Performance Dimensions of Industrial Clusters Using Consensus Cluster Analysis". *Industrial Management Studies*, 13(38): 1-25. [In Persian].

Mitra, A. 2024. "Cellular Automata-based MapReduce design: migrating a big data processing model from Industry 4.0 to Industry 5.0". *E-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 100603.

Monavarian, A., Abbasi, T., Soleimani, G., and Aghamohseni Fashami, A. 2017. "Designing and explaining of policy-making model for business clusters development in Iran". *Iranian Journal of Public Policy*, 3(4): 9-28. [In Persian].

Moubed, M. Taheri, F., Sabbaghzade, M. F., Hosseini, M., and Keshavarz, H. 2025. "Modeling Successful Project Management Solutions for Industrial Cluster Development using Grounded Theory". *The Scientific Quarterly Journal of Improvement Management*, 19(2): 166-184. [In Persian].

Muzamwese, T. C., Franco-Garcia, L., and Heldeweg, M. 2024. "Industrial clusters as a vehicle for circular economy transition: A case study of networks in four industrial clusters in Zimbabwe". *Journal of Cleaner Production*, 141479.

Olomu, M. O., Binuyo, G. O., and Oyebisi, T. O. 2023. "The adoption and impact of Internet-based technological innovations on the performance of the industrial cluster firms". *Journal of Economy and Technology*, 1: 164-178.

Papagiannidis, S., See-To, E. W., Assimakopoulos, D. G., and Yang, Y. 2018. "Identifying industrial clusters with a novel big-data methodology: Are SIC codes (not) fit for purpose in the Internet age?". *Computers & Operations Research*, 98: 355-366.

Park, S. C. 2018. "The Fourth Industrial Revolution and implications for innovative cluster policies". *Ai & Society*, 33: 433-445.

Piron, M., Wu, J., Fedele, A., and Manzardo, A. 2024. "Industry 4.0 and life cycle assessment: Evaluation of the technology applications as an asset for the life cycle inventory". *Science of the Total Environment*, 916: 170263.

Porter, M. E., and Strategy, C. 1980. "Techniques for analyzing industries and competitors". *Competitive Strategy. New York: Free*, 1.

Quiroga, O. D. 2022. "Adoption of Advanced Technologies in Industrial Clusters. A Study in Latin American Industries". *IFAC-PapersOnLine*, 55(10): 1846-1851.

Rezaei, J. 2015. "Best-worst multi-criteria decision-making method". *Omega*, 53: 49-57.

Rodrigues, V., Breda, Z., and Rodrigues, C. 2024. "The implications of industry 4.0 for the tourism sector: A systematic literature review". *Heliyon*, 10: 1-20.

Roohani, M. 2020. "The Role of Competitive Industrial Clusters on Regional Spatial Organization". *Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 24(2): 85-109. [In Persian].

Ruben, R. B., Rajendran, C., Ram, R. S., Kouki, F., Alshahrani, H. M., and Assiri, M. 2023. "Analysis of barriers affecting Industry 4.0 implementation: An interpretive analysis using total interpretive structural modeling (TISM) and Fuzzy MICMAC". *Heliyon*, 9(12): 1-17.

Saadatyar, F. S., Vazife, Z., and Yaghoobi, N. M. 2019. "The study of Faults and Limitations of Successful Implementation of Carpet Industrial Cluster with Emphasis on Localization Role: A Phenomenography Study". *The Scientific Quarterly Journal of Improvement Management*, 13(2): 130-154. [In Persian].

Saleem, S., Dhuey, E., White, L., and Perlman, M. 2024. "Understanding 21st century skills needed in response to Industry 4.0: Exploring scholarly insights using bibliometric analysis". *Telematics and Informatics Reports*, 100124.

Shahabi, V., Azar, A., Faezy Razi, F., and Fallah Shams, M. 2021. "Modeling the Impact of the Industry 4.0 on the Banking Supply Chain Using Fuzzy DIMATEL Technique". Journal of International Business Administration, 4(1): 67–89. [In Persian].

Shirooyehpour, Sh., Mortazavi, S. M., and Bayat, R. 2024. "A Model of Factors Affecting the Future Development of Sustainable Smart Cities with an Emphasis on Optimal Energy Management". *Urban Economics and Planning*, 4(4): 116-130. [In Persian].

Sony, M., and Naik, S. 2020. "Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review". *Benchmarking: An International Journal*, 27(7): 2213-2232.

Tsakalerou, M., and Akhmadi, S. 2021. "Agents of innovation: clusters in industry 4.0". *Procedia Manufacturing*, 55: 319-327.

Unterberger, P., and Müller, J. M. 2021. "Clustering and classification of manufacturing enterprises regarding their industry 4.0 reshoring incentives". *Procedia computer science*, 180: 696-705.

Wang, X., and Lin, P. 2024. "Research on the Development Mechanism and Path of Wenzhou Digital Industrial Cluster under the Background of Digital Economy". *International Journal of Global Economics and Management*, 3(1): 431-438.