Quarterly Journal Defensive Future Studies
AJA Command and Staff University
http://www.dfsr.ir/
Online ISSN: 2645-7172
Print ISSN: 2588-428x

An Integrated Framework for Evaluating the readiness of countries in facing the fourth industrial revolution

Javad Hosseinzadeh[۱] | **Farid Ahmadi**[۲✉] | **Hashem Kalbkhani**[۳]

۱. Master Degree, Department of Computer Engineering and Information Technology, Faculty of Industrial Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran. E-mail: javad.hr@gmail.com

۲. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Computer Engineering and Information Technology, Faculty of Industrial Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran. E-mail: f.ahmadi@uut.ac.ir

۳. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran. E-mail: h.kalbkhani@uut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received:

۲۰۲۳ December۳۱

Received in revised form:

۲۰۲۴ May ۲۶

Accepted: ۲۰۲٤ July ۲

Published online:

۲۰۲۴ July ۲

Keywords:

Fourth Industrial Revolution, Optimization, Clustering, Classification

ABSTRACT

Objectives: The main goal of this research is to assess the readiness of countries for the Fourth Industrial Revolution. The study aims to provide a model using artificial intelligence algorithms, such as clustering and classification, to predict the movement of countries towards Industry ٤,٠.

Methodology: The research utilizes fast-density clustering (FDC) to categorize countries into distinct clusters. Subsequently, the *k*NN and SVM algorithms are employed for modeling and predicting countries' movements. Additionally, swarm intelligence algorithms are used to optimize the performance of the algorithms.

Findings and Results: One of the achievements of this research is the development of a composite index for the classification of countries and predicting their movement toward Industry ٤,٠. The countries are categorized into three clusters based on their readiness for the Fourth Industrial Revolution, and the characteristics and trends of each cluster are elucidated. Another finding is the optimization of the *k*NN and SVM algorithms, demonstrating their superior performance compared to other algorithms.

Originality: The proposed composite index outperforms similar algorithms, indicating the effectiveness of the proposed method in predicting countries' movement toward Industry ٤,٠. The study presented a comprehensive analysis of the Iran cluster, including its overall ranking and rankings within specific sub-indices. The findings offer insights into the strategic movement patterns of Iran and provide recommendations for advancing its technological capabilities. This research not only contributes to enhancing the country's readiness in technology but also aims to elevate the power and standing of the Islamic Republic of Iran, particularly in critical sectors such as national defense and security.

Cite this article: Hosseinzadeh, J., Ahmadi, F., & Kalbkhani, H. (۲۰۲٤). An Integrated Framework for Evaluating Nations' Preparedness for Industry ٤,٠ Adoption. Defensive Future Studies, ۹ (۳۲), ۱۵۹ - ۱۸۸.

DOI: ۱۰,۲۲۰۳٤/dfsr.۲۰۲٤,۲۰۱۹۱۷٤,۱۷٦۱

© The Author(s)

Publisher: AJA Command and Staff University

فصلنامه علمی آینده‌پژوهی دفاعی
دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا
http://www.dfsr.ir/
شاپای چاپی: X ۲۵۸۸-۴۲۸ شاپای الکترونیکی: ۲۶۴۵-۷۱۷۲

ارائه یک مدل جامع برای سنجش آمادگی کشورها در مواجهه با انقلاب صنعتی چهارم

جواد حسین‌زاده[۱] | فرید احمدی[۲] ✉ | هاشم کلب‌خانی[۳]

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، رایانامه: javad.hr@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، رایانامه: f.ahmadi@uut.ac.ir

۳. استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، رایانامه: h.kalbkhani@uut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت:
.....

تاریخ بازنگری:
.....

تاریخ پذیرش:
.....

تاریخ انتشار:
.....

کلیدواژه‌ها:
انقلاب صنعتی چهارم، بهینه‌سازی، خوشه‌بندی، طبقه‌بندی

چکیده

هدف: هدف اصلی این پژوهش، تعیین جایگاه کشورها به لحاظ آمادگی کشورها در مواجهه با انقلاب صنعتی چهارم است. این پژوهش سعی دارد با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، شامل خوشه‌بندی و طبقه‌بندی، مدلی آینده‌پژوهانه را ارائه دهد که بتواند حرکت کشورها به سمت فناوری‌های صنعت ۴.۰ را پیش‌بینی کند.

روش‌شناسی: در این پژوهش از الگوریتم خوشه‌بندی چگالی سریع (FDC) برای تقسیم کشورها به خوشه‌های مجزا و سپس از الگوریتم‌های *k*NN و SVM برای مدل‌سازی و پیش‌بینی حرکت کشورها به دیگر دسته‌ها استفاده شده است. هم‌چنین از الگوریتم‌های هوش‌جمعی برای بهینه‌سازی عملکرد الگوریتم‌ها بهره گرفته شده است.

یافته‌ها و نتایج: تشکیل یک شاخص ترکیبی برای دسته‌بندی کشورها و پیش‌بینی حرکت آن‌ها به سمت صنعت ۴.۰ از دستاوردهای این پژوهش است. در این پژوهش، کشورها بر اساس میزان آمادگی در مواجهه با انقلاب صنعتی چهارم، به سه خوشه بالغ، در حال رشد و کمتر بالغ افراز گردیده و ویژگی‌ها و روند حرکتی هر خوشه تبیین شد. بهینه‌سازی الگوریتم‌های *k*NN و SVM باعث بهبود عملکرد آن‌ها نسبت به سایر الگوریتم‌ها انجام شد.

نتیجه‌گیری: عملکرد بهتر شاخص ترکیبی پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های مشابه دیگر، نشان از اثربخشی روش پیشنهادی در پیش‌بینی حرکت کشورها به سمت فناوری‌های صنعت ۴.۰ دارد. با شناسایی خوشه ایران و رتبه کل و رتبه در هر یک از زیرشاخص‌ها، الگوی حرکتی ایران و پیشنهادات برای ارتقا ارائه شد. موضوعی که می‌تواند ضمن ارتقای آمادگی فناوری محور کشور به ارتقای قدرت و جایگاه ایران اسلامی در حوزه‌های مختلف از جمله حوزه دفاع و امنیت ملی یاری رساند.

استناد: حسین‌زاده، جواد؛ احمدی، فرید و کلب‌خانی، هاشم (۱۴۰۳). ارائه یک مدل جامع برای سنجش آمادگی کشورها در مواجهه با انقلاب صنعتی چهارم. آینده‌پژوهی دفاعی، ۹ (۳۲)، ۱۵۹ - ۱۸۸.

DOI: ۱۰,۲۲۰۳٤/dfsr.۲۰۲٤,۲۰۱۹۱۷٤,۱۷٦۱

ناشر: دانشگاه فرماندهی و ستاد ارتش جمهوری اسلامی ایران

© نویسندگان.

مقدمه

تقریباً همه پژوهشگران حوزه اقتصادی بر این باور هستند که موضوع اشتغال و کارآفرینی حداقل در صد سال اخیر به‌صورت مستقیم تحت تأثیر انقلاب‌های صنعتی بوده است. انقلاب‌های صنعتی چهارگانه‌ای که با فناوری‌هایی که با خود به ارمغان آورده‌اند عملاً شکل تولید و خدمات را در دوره‌های زمانی خود تغییر داده‌اند. نتیجه این تحولات، تغییرات بنیادین در ماهیت کارآفرینی، صنایع، مهارت‌های کار و اشتغال بوده است. هر یک از این انقلاب‌های صنعتی، برندگان و بازندگانی در سطح ملی و منطقه‌ای داشته‌اند (Groumpos, ۲۰۲۱). برخی تبدیل به غول‌های تولید و خدمات شده و برخی دیگر از گردونه کشورهای توسعه‌یافته کنار رفته‌اند. کشورمان ایران نیز که در حال حاضر موضوع اشتغال را به‌عنوان مهم‌ترین دغدغه حکمرانی پیش روی چشمان خود می‌بیند، به گواه آمار، در عرصهٔ این انقلاب‌های صنعتی، برنده نبوده است. بخشی از فاصله ما با جهان توسعه‌یافته نیز حاصل این عدم توفیق در انقلاب‌های صنعتی پیشین بوده است (احمدی و منصوری، ۱۳۹۸). در سطح خرد و سازمانی نیز ماهیت کسب‌وکار دچار تغییر شده و شاهد از بین رفتن بسیاری از کسب‌وکارها در عین زایش دسته‌های جدیدی از کسب‌وکارهای فناور محور هستیم (Schwab & Samans, ۲۰۱٦) .

در حال حاضر نیز جهان در حال تجربه نسل جدیدی از فناوری‌ها در قالب «انقلاب صنعتی چهارم» است. این انقلاب صنعتی دسته وسیعی از فناوری‌های نو از اینترنت اشیا گرفته تا واقعیت افزوده، هوش مصنوعی، هوش شناختی، فناوری‌های تحلیل داده‌های کلان، خودروهای بدون راننده، پول مجازی و چاپ سه‌بعدی را در برمی‌گیرد. بسیاری از متغیرهای اقتصادی، اجتماعی و سیاسی دستخوش تغییر خواهند شد و هویت، ماهیت کارآفرینی و مهارت‌های اشتغال نیز دچار بازآفرینی می‌شود. تفاوت این انقلاب صنعتی با انقلاب‌های پیشین در رشد نمایی کاربری آن از سطح خرد تا انبوه است که عقب‌افتادگی در بهره‌گیری از این انقلاب فاصله کشور با جهان توسعه‌یافته را به شکل نمایی افزایش خواهد داد (احمدی، ۱۳۹۹). بسیاری از کشورها خصوصاً کشورهای عضو اتحادیه اروپا متوجه اهمیت مقوله بهره‌گیری از این انقلاب صنعتی شده و سیاست‌های عملیاتی مناسبی را در این راستا اتخاذ کرده‌اند (Digital Transformation Monitor, ۲۰۱۷). البته پیش‌نیاز برنامه‌ریزی برای بهره‌گیری مناسب از این تحول جهان‌شمول، سنجش میزان آمادگی هر کشور در مواجهه با انقلاب صنعتی چهارم است. مقوله‌ای که به‌عنوان یک موضوع آینده‌پژوهی مورد توجه سیاست‌گذاران و پژوهش‌گران قرار گرفته است. در این مقاله پس از بررسی مدل‌های مختلف سنجش میزان آمادگی و بلوغ، ضمن ارائهٔ یک مدل جامع برای

سنجش میزان آمادگی کشورها، یک خوشه‌بندی نیز از کشورها در خصوص میزان آمادگی در برابر انقلاب صنعتی چهارم ارائه شده است. همان‌گونه که در ادامه هم آمده است، شاخص‌های آمادگی کشورها برای مواجهه با انقلاب صنعتی چهارم چندبعدی و دارای ماهیت بین‌بخشی است و به دلیل جامعیت و مانعیت از شاخص‌های سنجش آمادگی فناوری در سطح خرد متفاوت است.

مبانی نظری و پیشینه‌های پژوهش

مبانی نظری

تعاریف متنوعی از انقلاب صنعتی چهارم توسط محققان بیان شده، هرچند هنوز تعریف جامعی از این انقلاب ارائه نشده است (Beier et al., ۲۰۲۰). لیکن برای ارائه تعریف جامع از این انقلاب فناوری، تشریح ویژگی‌های آن ضروری است. لذا در ادامه به ۱۳ مورد از ویژگی‌های انقلاب صنعتی چهارم که به‌اختصار صنعت ۴.۰ نیز نامیده می‌شود و در پژوهش‌های قبلی معرفی شده است، اشاره می‌شود. با استفاده از این ویژگی‌ها می‌توان تعریف جامعی از صنعت ۴.۰ ارائه کرد. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از:

- تعامل‌پذیری: سیستم‌های سایبر فیزیکال که به افراد و کارخانه‌های هوشمند کمک می‌کند تا به یکدیگر متصل شده و با هم تعامل داشته باشند (Stankovic et al., ۲۰۱۷)
- مجازی‌سازی[۱]: یک نسخه مجازی از کارخانه هوشمند که از طریق اتصال داده‌های سنسورها با مدل‌های تولید مجازی و مدل‌های شبیه‌سازی ایجاد می‌شود(Stankovic et al., ۲۰۱۷) .
- تمرکززدایی: سیستم‌های سایبرفیزیکالی[۲] که تصمیمات در خصوص خود و محصولات خود را به‌صورت توزیع‌شده می‌گیرند (Stankovic et al., ۲۰۱۷).
- قابلیت به‌هنگامی[۳]: ایجاد زمینهٔ جمع‌آوری و تحلیل داده و ایجاد بینش سریع در خصوص وضعیت
- سرویس محوری: اینترنت اشیا خدمات بالقوه‌ای را برای بهره‌گیری زنجیره ارزش فراهم می‌سازد. یکی از این موارد تبادل سرویس بین اجزای این زنجیره است و نشان می‌دهد که چرا اینترنت سرویس‌ها یک جزء مهم از صنعت ۴.۰ است (Gilchrist, ۲۰۱۶)

---

۱. Virtualization

۲. Cyber-physical

۳. Real-time capability

- رویکرد پیمانه‌ای[۱]: تطابق‌پذیری منعطف کارخانه‌های هوشمند برای تغییر در نیازمندی‌ها از طریق جایگزینی و یا توسعه پیمانه‌های مستقل
- همگرایی[۲]: یکپارچگی صنایع (اطلاعات، ارتباطات، سرگرمی)، یکپارچه‌سازی حوزه‌های علمی (ژن‌شناسی، نانو فناوری و رباتیک) و یکپارچگی بیولوژی، همگرایی فیزیکی و مجازی را میسر می‌سازد (Stankovic et al., ۲۰۱۷).
- کاهش هزینه و ارتقای کارآیی
- افزایش سرعت تولید: صنعت ۴.۰، امکان استفاده از بسیاری از فناوری‌ها در فرایند تولید را میسر می‌سازد که به مفهوم افزایش سرعت تولید و عرضه است.
- سفارشی‌سازی در مقیاس وسیع: با توسعه تولید دیجیتال مانند فناوری‌های چاپ سه‌بعدی، برش لیزری و سی ان سی و رباتیک امکان تولید محصولات به روش دیجیتال حتی برای تولیدکنندگان کوچک نیز میسر شده است (Gilchrist, ۲۰۱٦).
- ادغام عمودی سیستم‌های تولید هوشمند: ماهیت ادغام عمودی از مفهوم استفاده از سیستم‌های تولید سایبرفیزیکال نشأت می‌گیرد که این امکان را به کارخانه‌ها می‌دهد تا به متغیرهایی مانند سطوح تقاضا، عیوب ماشین و تأخیرهای غیر قابل پیش‌بینی به‌سرعت و به‌درستی واکنش نشان دهند.
- ادغام افقی شبکه‌های زنجیره ارزش: ادغام افقی، ایجاد، نگهداری و توسعه شبکه‌های ارزش‌آفرین را تسهیل می‌کند.
- مهندسی سرتاسر[۳] در کل زنجیره ارزش: تمام زنجیره ارزش تحت تأثیر این سؤال است که مهندسی سرتاسر در یک چرخه کامل تولید محصول تا بازیافت، چگونه ایجاد می‌شود. البته تمرکز اصلی باید بر روی کیفیت و رضایت مشتری باشد و کارخانه باید محصولی را بسازد که انتظارات مشتری را برآورده کند. این ویژگی‌ها در قالب محرک‌های پیاده‌سازی صنعت چهار در قالب شکل ۱ آمده است.

---

۱. Modularity

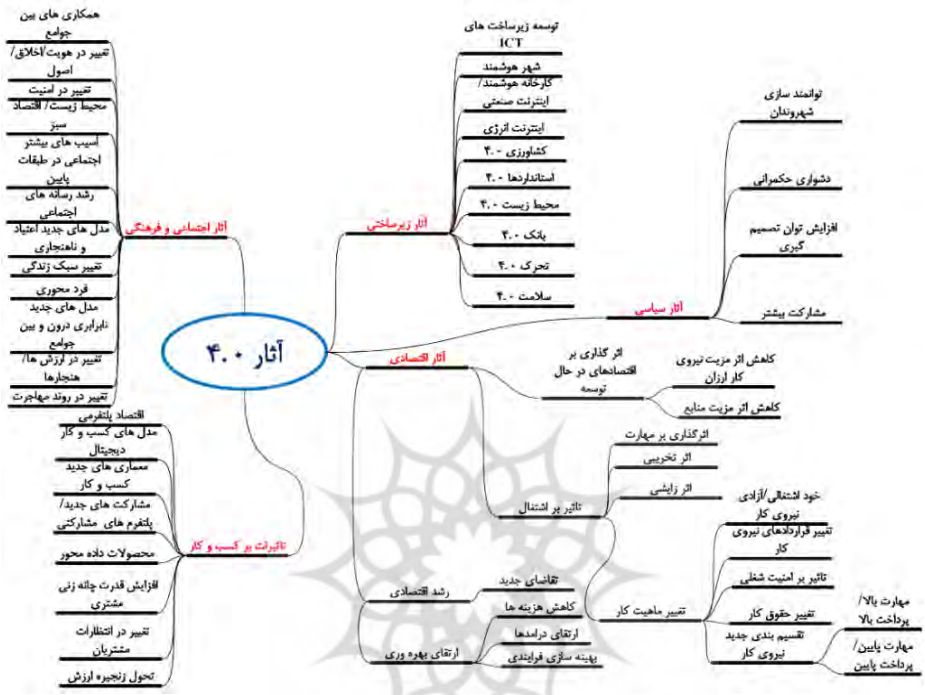
۲. Convergence

۳. Through-engineering

شکل (۱) محرک‌های پیاده‌سازی صنعت ۴.۰

انقلاب صنعتی چهارم آثار شگرف سیاسی، اقتصادی، زیرساختی و اجتماعی در پی دارد. تغییرات مرزشکن در اثر صنعت ۴.۰ منجر به تغییر ماهیت شغل‌ها و هم‌چنین تغییر در مهارت‌های مورد نیاز در مشاغل خواهد شد که این امر می‌تواند هم منجر به تغییر در سبک زندگی شود و هم در بعضی از موارد با توجه به تغییرات ایجاد شده و مهارت‌های مورد نیاز منجر به افزایش نرخ بیکاری در بعضی از خانواده‌های شغلی شود(World Economic Forum, ۲۰۲۱). با پیشرفت فناوری‌های جدید مانند فناوری ابر و اینترنت موبایل، محافظت از داده‌ها سخت‌تر خواهد شد و در نتیجه چالش‌های جدیدی در مورد امنیت اطلاعات و نگرانی از حریم خصوصی ایجاد می‌شود. در دهه‌های اخیر با ظهور فناوری‌هایی مانند اینترنت، گوشی‌های هوشمند و شبکه‌های اجتماعی نوع جدیدی از اعتیاد به نام اعتیاد به فناوری ایجاد شده است که انتظار

می‌رود با پیشرفت فناوری‌ها، مدل‌های جدیدی از اعتیاد و ناهنجاری نیز ایجاد شود. در شکل دو نظام تاثیرگذاری انقلاب صنعتی چهارم به‌صورت کامل ارائه شده است.



شکل (۲) مدل مفهومی آثار انقلاب صنعتی چهارم (احمدی، ۱۳۹۸)

سازمان ملل تخمین می‌زند که در سال ۱۴۰۰ اقتصادهای دانش‌بنیان حداقل هفت درصد از تولید ناخالص داخلی جهانی را تشکیل می‌دهند و سالیانه حداقل ده درصد رشد می‌کنند. علاوه بر این، پنجاه درصد از رشد بهره‌وری اتحادیه اروپا نتیجهٔ مستقیم استفاده از فناوری‌های نوین است (Technology and Innovation Report, ۲۰۲۱). با توجه به گستره اثرگذاری لازم است تا دولت‌ها و حکمرانان برای رونق و توسعه کسب‌وکارها از آمادگی لازم برای مدیریت مدل‌های کسب‌وکار و رهبری جدید همسو با تحولات فناورانه و تحول دیجیتال گام بردارند، لازمهٔ این کار استفاده از مدل‌ها و شاخص‌های متناسب آمادگی و بلوغ برای جهش صنعتی و همچنین انجام مطالعات آینده‌پژوهانه برای پیش‌بینی آمادگی آتی کشورها است.

پیشینه پژوهش

میزان آمادگی کشورها در مواجهه با انقلاب صنعتی چهارم و فناوری‌های مرتبط به‌عنوان شاخصی از قدرت کشورها محسوب می‌شود. قدرت ملی، دارای منابع و سرچشمه‌های متعددی از جمله علم و فناوری است. این مؤلفه قدرت ملی به دلیل کارکرد بسترساز آن در تولید و تقویت سایر ابعاد قدرت، همانند قدرت اقتصادی، نظامی و ... از نقش کلیدی و مهمی در این عرصه برخوردار است (موسوی زارع و همکاران، ۱۳۹۵). فناوری‌های دانش‌بنیان و دفاع دانش‌محور به‌عنوان دو مؤلفه مهم قدرت نرم معرفی شده است (زارع و همکاران، ۱۴۰۲). از عوامل مؤثر بر تمایل کشورها در توسعه روابط تجاری، سطح قدرت نرم کشور هدف و میزان تأثیرگذاری آن کشور بر معادلات بین‌المللی است (علایی‌پور و کاشیان، ۱۴۰۱). برتری علمی و فناوری عنصر مهمی از امنیت ملی است، زیرا در هنگام صلح عامل بازدارندگی محسوب می‌شود و در موقع بروز بحران امکان انتخاب-های گوناگون را فراهم می‌سازد و در هنگام جنگ عامل پیروزی است (محمودزاده و همکاران، ۱۳۹۶). با عنایت به نظام تأثیرگذار فناوری بر قدرت دفاعی کشور، تدوین سیاست‌های مؤثر در حوزهٔ توسعه فناوری‌های نوین در ایجاد بازدارندگی مؤثر و حصول اطمینان از امنیت پایدار در کشور مؤثر است (نجفی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین نیروهای نظامی به‌عنوان یکی از بهره‌برداران فناوری‌های نوین شناخته می‌شوند و فناوری به‌عنوان یکی از شش بُعد قدرت نظامی کشورها است (قاضی‌زاده، ۱۳۹۹). بخش قابل توجهی از جنگ‌های بین کشورها در سالیان اخیر به جنگ-های سایبری و فناورانه تغییر شکل داده است (سپهری، ۱۴۰۰). لذا میزان آمادگی در برابر فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم عنصر مهمی در تعیین قدرت نرم و سخت کشورها است.

دولت‌ها می‌توانند با استفاده از ابزارهای سنجش آمادگی، درکی از جایگاه خود در مسیر به‌کارگیری صنعت ۴.۰ و جایگاه خود در این مسیر به‌دست آورند. این ابزارها را می‌توان برای مقایسه و آینده‌پژوهی به کار برد و مسیر مطلوب دولت‌ها برای حرکت به سطوح بالایی از فناوری‌های صنعت ۴.۰ را ترسیم کرد. بنابراین مسیر حرکت موفق برای اتخاذ صنعت ۴.۰ را می‌توان با انجام ارزیابی آمادگی صنعت ۴.۰ آغاز کرد؛ این ارزیابی به شناسایی حوزه‌های تمرکز که نیازمند توجه هستند، کمک خواهد کرد. شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی میزان آمادگی کشورها در مواجهه با تحولات فناورانه معرفی و مورد استفاده کشورها قرار گرفته است. در ادامه به معرفی شاخص‌های مهم این حوزه پرداخته می‌شود.

شاخص آمادگی شبکه‌ای

شاخص آمادگی شبکه‌ای (NRI[۱])، که به‌عنوان آمادگی فناوری نیز شناخته می‌شود، تمایل کشورها به بهره‌برداری از فرصت‌های ارائه‌شده توسط فناوری اطلاعات و ارتباطات را اندازه‌گیری می‌کند. این شاخص به‌عنوان بخشی از گزارش سالانه فناوری اطلاعات جهانی منتشر شده است. این گزارش به‌عنوان جامع‌ترین و معتبرترین ارزیابی تأثیرات فناوری اطلاعات و ارتباطات بر رقابت‌پذیری و رفاه کشورها محسوب می‌شود. شاخص آمادگی شبکه‌ای متشکل از چهار زیرشاخص، ۱۰ ستون و ۵۳ نشان‌گر است. سه زیرشاخص اول، محرک‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات و چهارمین زیرشاخص به‌عنوان تأثیرات فناوری اطلاعات و ارتباطات تعریف می‌شود. در شاخص آمادگی شبکه‌ای، عوامل محیطی از میزان استفاده و سطح آمادگی و نیز اندازه تأثیرات آن جدا می‌شوند. از دیگر منظر، اهمیت و وزن تمام زیرشاخص‌ها و ستون‌ها در محاسبه شاخص آمادگی شبکه‌ای یکسان فرض می‌شود (World Economic Forum, ۲۰۲۱). طراحی مجدد شاخص آمادگی شبکه‌ای در سال ۲۰۱۹ در مجموع ۱۲۱ اقتصاد را بر اساس عملکرد آن‌ها توسط ۶۲ متغیر رتبه‌بندی می‌کند. این رویکرد جامع به این معنا است که NRI مسائل مربوط به فناوری‌های آینده، مانند هوش مصنوعی و اینترنت اشیا (IoT[۲]) تا نقش اقتصاد دیجیتال در رسیدن به اهداف توسعه پایدار را پوشش می‌دهد.

شاخص رقابت‌پذیری جهانی

شاخص جدید رقابت‌پذیری (GCI[۳]) جهانی مجموعه جدیدی از عوامل مهم برای ارزیابی بهره‌وری در انقلاب صنعتی چهارم است. با در نظر گرفتن مفاهیم جدید و تلاش‌های وسیع برای جمع‌آوری داده، شاخص رقابت‌پذیری جهانی بینش‌های جدید و واضح‌تری را در مورد عواملی ارائه می‌دهد که همراه با رشد انقلاب صنعتی چهارم به‌صورت قابل توجهی رشد خواهند کرد. این عوامل عبارت‌اند از: سرمایه انسانی، نوآوری، انعطاف‌پذیری و چابکی. شاخص رقابت‌پذیری جهانی یک امتیاز برای میزان پیشرفت در محدوده ۰ تا ۱۰۰ در نظر می‌گیرد. هدف هر کشور باید بیشینه کردن این امتیاز در هر شاخص باشد و امتیاز نشان‌دهندهٔ پیشرفت فعلی و هم‌چنین میزان باقیمانده تا سر حدّ امتیاز است (احمدی و منصوری، ۱۳۹۹). به‌طور کلی زیر شاخص‌های شاخص رقابت‌پذیری جهانی، ۱۲ مورد هستند که منعکس‌کنندهٔ وسعت و پیچیدگی پیشران‌های کارایی

۱. Network readiness index (NRI)

۲. Internet of things (IoT)

۳. Global competitiveness index (GCI)

و اکوسیستم رقابت هستند. این ۱۲ مورد عبارت‌اند از: نهادها، زیرساخت‌ها، به‌کارگیری ICT، ثبات اقتصاد کلان، سلامت، مهارت‌ها، بازار محصول، بازار کار، سیستم مالی، اندازه بازار، پویایی کسب‌وکار و ظرفیت نوآوری (Schwab, ۲۰۱۹).

شاخص آمادگی برای آینده تولید

مجمع جهانی اقتصاد در گزارشی با عنوان «آمادگی برای آینده تولید» به معرفی و توسعه شاخصی برای سنجش میزان آمادگی کشورها برای مواجهه با تغییر تکنولوژیک عظیم در جریان پرداخته است. این شاخص خود دارای دو بخش شامل ساختار تولید و محرک‌های تولید است. شاخص آمادگی برای آینده تولید برای ۱۰۰ کشور مختلف محاسبه شده و بسته به ۱. اندازه و پیچیدگی ساختار تولید و ۲. مطلوب بودن یا مطلوب نبودن محرک‌های تولید، این کشورها به چهار دسته تقسیم شده‌اند.

شاخص نوآوری جهانی

شاخص نوآوری جهانی (GII[۱]) یک رتبه‌بندی سالیانه از کشورها بنا بر ظرفیت و موفقیت آن‌ها در نوآوری است (Wunsch-Vincent et al., ۲۰۲۰). این شاخص توسط دانشگاه کورنل، موسسه INSEAD، سازمان جهانی مالکیت فکری و با همکاری دیگر سازمان‌ها و نهادها منتشر شده است (Matthews and Brueggemann, ۲۰۱۵). این شاخص مبتنی بر داده‌های عینی و نسبی مشتق‌شده از چندین منبع از جمله اتحادیه بین‌المللی مخابرات، بانک جهانی و مجمع اقتصاد جهانی است (World Bank, ۲۰۱۰). این شاخص در سال ۲۰۰۷ توسط INSEAD و تجارت جهانی، یک مجله انگلیسی آغاز شد (Ghobakhloo, ۲۰۱۸). شاخص نوآوری جهانی معمولاً توسط مقامات دولتی و شرکت‌ها برای مقایسه کشورها توسط سطح نوآوری آن‌ها استفاده می‌شود. شاخص نوآوری جهانی با استفاده از میانگین سادهٔ امتیازات در دو زیرشاخص، زیرشاخص ورودی نوآوری و زیرشاخص خروجی نوآوری، محاسبه می‌شود که به ترتیب متشکل از پنج و دو ستون هستند. هر یک از این ستون‌ها یک ویژگی از نوآوری را توصیف می‌کنند و تا پنج شاخص را تشکیل می‌دهند و امتیاز آن‌ها با روش میانگین وزنی محاسبه می‌شود.

۱. Global innovation index (GII)

شاخص توسعه ICT

شاخص توسعه ICT (IDI[۱]) یک شاخص منتشر شده توسط اتحادیه بین‌المللی مخابرات سازمان ملل است. این شاخص ابزار ارزشمندی برای معیارسنجی مهم‌ترین شاخص‌های سنجش جامعه اطلاعاتی است. شاخص توسعه ICT ابزار استانداردی است که دولت‌ها، اپراتورها، آژانس‌های توسعه، محققان و دیگران می‌توانند برای اندازه‌گیری شکاف دیجیتالی و مقایسه عملکرد ICT در داخل کشور و در سطح بین‌المللی از آن استفاده کنند. شاخص توسعه ICT بر مبنای ۱۴ شاخص ICT است که در سه خوشه قرار می‌گیرند: دسترسی، استفاده و مهارت‌ها.

شاخص سازمان همکاری و توسعه اقتصادی

سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD[۲]) یک سازمان اقتصادی میان دولتی با ۳۷ کشور عضو است که در سال ۱۹۶۱ تأسیس شد تا محرکی برای پیشرفت اقتصادی و تجارت جهانی باشد. این انجمن متشکل از کشورهایی است که خود را متعهد به دموکراسی و اقتصاد بازار توصیف می‌کنند و یک پلتفرم برای مقایسه تجربیات سیاسی، یافتن پاسخ برای مشکلات مشترک، شناسایی بهترین روش‌ها و هماهنگ کردن سیاست‌های داخلی و بین‌المللی اعضایش ارائه می‌دهد. تابلوی امتیازات OECD چارچوبی برای نظارت بر روندها در شرکت‌های کوچک و متوسط و دسترسی کارآفرینان به امور مالی در سطح کشور و سطح بین‌المللی ارائه می‌دهد و از فرمول‌بندی و ارزیابی سیاست‌ها در این حوزه حمایت می‌کند. روندها در تأمین مالی صنایع کوچک و متوسط و کارآفرینان توسط ۱۷ شاخص اصلی نظارت می‌شوند که پرسش‌های خاص مربوط به دسترسی به امور مالی را ارزیابی می‌کنند (Grupp & Mogee, ۲۰۱۷).

شاخص آمادگی صنعت ۴.۰ رولاند برگر

شاخص آمادگی صنعت ۴.۰ رولاند برگر (RBI[۳]) روی یک محور عمودی نمایش داده می‌شود که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود: ابتدا پیچیدگی فرایند تولید، درجه اتوماسیون، آمادگی نیروی کار و کثرت نوآوری را در دسته‌ای دسته‌بندی می‌شوند که «برتری صنعتی» نامیده می‌شود. سپس ارزش‌افزوده، باز بودن صنعت، شبکه نوآوری و پیچیدگی اینترنت به گروهی به نام «شبکه ارزش» ترکیب می‌شوند. هر گروه با استفاده از یک مقیاس پنج درجه‌ای امتیازی اندازه‌گیری می‌شوند، با

۱. ICT Development Index (IDI)

۲. Organization for Economic Co-operation and Development (OCED)

۳. Roland Berger index (RBI)

مقدار پنج نشان می‌دهد که یک کشور به‌طور عالی برای چشم‌انداز صنعت ۴.۰ آماده است. ترکیب این دو دسته موقعیت کشور در شاخص آمادگی RBI را تعیین می‌کند (Berger ۲۰۱۸). جدول ۱ همپوشانی‌های پنج شاخص NRI، GCI، GII، IDI و FOP را بررسی می‌کند. شاخص‌های OECD و RBI به دلیل تعداد کم کشورهای تحت بررسی و محدود بودن به مناطق خاص جغرافیای از مقایسه حذف شدند.

شاخص آنکتاد

شاخص آمادگی برای فناوری‌های پیشرو شامل ظرفیت‌های فناورانه مرتبط با سرمایه‌گذاری فیزیکی، سرمایه انسانی و تلاش‌های فناورانه و ظرفیت‌های ملی برای بهره‌برداری، پذیرش و انطباق با فناوری‌های نوین است. پنج زیرشاخص اصلی این شاخص، میزان توسعه فناوری، مهارت-ها، فعالیت‌های تحقیق و توسعه، فعالیت صنعتی، دسترسی به تأمین مالی است (UNCTAD, ۲۰۲۳). این شاخص جدیدترین شاخص بین‌المللی ارائه شده در حوزه آمادگی برای فناوری‌های نوین است که در قالب دوره زمانی پانزده ساله به ارزیابی جایگاه کشورها از جمله ایران پرداخته است.

جدول (۱) مدل‌های موجود برای ارزیابی آمادگی صنعت ۴.۰

نماد	نام شاخص	تعداد زیرشاخص‌ها	تعداد کشورهای ارزیابی‌شده
NRI	شاخص آمادگی شبکه‌ای	۶۳	۱۳۹
GCI	شاخص رقابت‌پذیری جهانی	۱۲	۱۴۱
FOP	شاخص آینده تولید	۸	۱۰۰
NRI	شاخص آمادگی شبکه‌ای ۲۰۱۹	۵۱	۱۲۱
GII	شاخص نوآوری جهانی	۸۱	۱۲۷
IDI	شاخص توسعه ICT	۱۴	۱۷۶

با بررسی جدول بالا مشاهده می‌شود که اغلب زیرشاخص‌های مورد نیاز برای بررسی آمادگی صنعت ۴.۰ توسط چهار شاخص GCI، NRI، GII و IDI تحت پوشش قرار گرفتند. هم‌چنین تعدادی زیرشاخص در گزارش FOP موجود هستند که به دلیل عدم وجود تعداد کافی گزارش

منتشر شده از این شاخص، تصمیم بر آن شد که در شاخص ترکیبی جدید مورد بررسی قرار نگیرد. هم‌چنین شاخص آنکتاد به دلیل بروز بودن گزارش و رتبه‌بندی کشورها در دوره‌های زمانی طولانی‌تر به‌عنوان شاخص ارزیابی شاخص پیشنهادی و خوشه‌بندی ارائه‌شده در این پژوهش، استفاده شده است. مدل سنجش میزان آمادگی پیشنهادی شامل چهار دسته شاخص اصلی، ۱۸ زیرشاخص و ۱۷۰ زیرشاخص منحصر به فرد است. نهایتاً مقدار هر زیرشاخص منحصر به فرد مربوط به ایران و بهترین کشور در زیرشاخص مورد نظر مشخص شده است.

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، روشی بر مبنای الگوریتم خوشه‌بندی چگالی سریع (FDC[1]) (Mehta et al., ۲۰۱۹) برای دسته‌بندی کشورها از لحاظ میزان آمادگی آن‌ها برای به‌کارگیری صنعت ۴.۰ پیشنهاد شده است. این مدل شامل شاخص جامعی حاصل از ترکیب چهار شاخص مذکور در بخش قبل و روشی نو برای خوشه‌بندی کشورها است. برای حصول به این مدل، در گام نخست مجموعه داده مورد نیاز برای سنجش آمادگی کشورها در به‌کارگیری صنعت ۴.۰ جمع‌آوری شد. داده‌های جمع‌آوری شده با توجه به بررسی انجام شده شامل مقادیر امتیاز نهایی چهار گزارش شاخص آمادگی شبکه‌ای (NRI)، شاخص رقابت‌پذیری جهانی (GCI)، شاخص نوآوری جهانی (GII) و شاخص توسعه ICT (IDI) هستند. این مقادیر در طی چهار سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ و هم‌چنین سال ۲۰۱۹ به‌منظور کشف روند رشد و پیشرفت نمونه‌های موجود در پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دلیل انتخاب این بازه زمانی موجود بودن گزارش و مجموعه داده مورد نیاز برای تمامی گزارش‌های یاد شده در طی مدت مشخص است. نمونه‌های موجود شامل اجتماع کشورهای حاضر در هر گزارش است به‌طوری‌که برای هر نمونه (کشور) حداقل یکی از مقادیر امتیاز نهایی چهار گزارش شاخص آمادگی شبکه‌ای، شاخص رقابت‌پذیری جهانی، شاخص نوآوری جهانی و شاخص توسعه ICT در دسترس باشد. مقادیر یاد شده به‌عنوان ویژگی‌های[2] مورد استفاده در الگوریتم‌های خوشه‌بندی و طبقه‌بندی استفاده می‌شوند. این شاخص‌ها در ادامه شرح داده می‌شوند.

خوشه‌بندی

---

۱. Fast Density Clustering (FDC)

۲. Feature

خوشه‌بندی یکی از روش‌های یادگیری بدون نظارت است که عمل تقسیم نقاط داده به تعدادی گروه را انجام می‌دهد، به‌طوری‌که نقاط داده حاضر در یک گروه بیشترین تشابه با یکدیگر و کمترین تشابه را نسبت به نقاط حاضر در دیگر گروه‌ها داشته باشند. به عبارت ساده‌تر، هدف جداسازی گروه‌ها با ویژگی‌های مشابه و قرار دادن آن‌ها در خوشه‌های مجزا است.

خوشه‌بندی می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های مختلفی به دست آید که به‌طور قابل‌توجهی در نحوهٔ تخصیص نقاط به خوشه‌ها و یافتن مؤثر آن‌ها تفاوت دارند. مفهوم عمومی خوشه شامل گروه‌هایی با کمترین فاصله بین اعضا، مناطق متراکم از فضای داده، بازه‌ها یا توزیع‌های آماری خاص آن خوشه است. بنابراین خوشه‌بندی را می‌توان به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه بیان کرد. الگوریتم خوشه‌بندی مناسب و تنظیم پارامترها (از جمله پارامترهایی مانند تابع فاصله مورد استفاده، آستانه تراکم یا تعداد خوشه‌های مورد انتظار) به مجموعه داده و مورد استفاده از خوشه‌ها بستگی دارد. خوشه‌بندی فرایند تکراری کشف دانش یا بهینه‌سازی چندمنظوره تعاملی است که شامل آزمون و خطا می‌شود. اغلب لازم است اصلاح شود که داده‌ها پیش‌پردازش شوند و پارامترهای مدل تا زمانی که الگوریتم به نتیجه مطلوب برسد.

در این پژوهش، برای خوشه‌بندی از الگوریتم خوشه‌بندی چگالی سریع (FDC[۱]) از انواع الگوریتم‌های خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی استفاده می‌شود (Mehta et al., ۲۰۱۹). خوشه‌بندی چگالی سریع الگوریتمی برای خوشه‌بندی کارآمد داده‌هایی با ابعاد پایین است. عملکرد اصلی این الگوریتم بر اساس استفاده از نگاشت چگالی کرنل و گراف‌های تراکم است. این الگوریتم برای حل مسائل چندمقیاسی و برای خوشه‌بندی داده‌های غیر محدب به‌کار می‌رود. این روش از اعتبارسنجی متقابل[۲] استفاده می‌کند و بر اساس دو پارامتر اصلی عمل می‌کند: اندازه همسایگی و معیار آستانه نویز. پارامتر دوم مراکز خوشه نادرست را شناسایی می‌کند، درحالی‌که پارامتر اول تضمین می‌کند تنها اطلاعات محلی برای استنباط مراکز خوشه مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مزایای اصلی این الگوریتم این است که کاربر نیاز ندارد تعداد خوشه‌ها را انتخاب کند و معمولاً نسبت به تغییر پارامترها بسیار مقاوم است. نقطه قوت این الگوریتم خوشه‌بندی سریع و دقیق داده‌هایی با ابعاد پایین است (Mehta et al., ۲۰۱۹). دلیل انتخاب این تکنیک خوشه‌بندی ارائه نتایج بهتر در خوشه‌بندی بر روی انواع مشخص داده‌ها نسبت به روش‌های شناخته شده است.

---

۱. Fast density clustering (FDC)

۲. Cross-validation

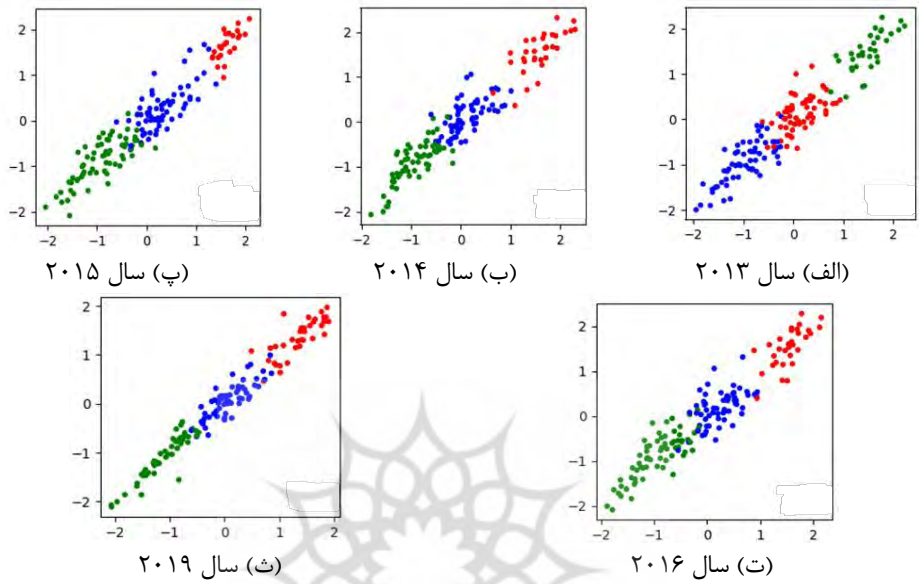
فرض می‌شود مجموعه داده شامل N نقطه به‌صورت $X \equiv \{\mathbf{x}_n\}_{n=1}^{N}$ است. همسایگی ε برای نقطه $\mathbf{x}_n$ به‌صورت مقابل تعریف می‌شود: $N_\varepsilon(\mathbf{x}_n) = \{\mathbf{x} \in X | d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_n) < \varepsilon\}$. مجموعه $N_\varepsilon(\mathbf{x}_n)$ شامل نقاط داده‌ای است که فاصله آن‌ها از $\mathbf{x}_n$ کمتر از ε است که فاصله بین دو نقطه به‌صورت فاصله اقلیدسی سنجیده می‌شود. بنابراین، $N_\varepsilon(\mathbf{x}_n)$ می‌تواند به‌عنوان یک تخمین خام از چگالی محلی در نظر گرفته شود. نقطه $\mathbf{x}_n$ به‌عنوان نقطه مرکزی شناخته می‌شود اگر به تعداد حداقل minPts نقطه در همسایگی ε آن باشند. minPts یک پارامتر آزاد الگوریتم است و مقیاس اندازه کوچک‌ترین خوشه‌ای که مورد انتظار است را تنظیم می‌کند. در نهایت، نقطه $\mathbf{x}_i$ به‌عنوان چگالی قابل دسترس شناخته می‌شود اگر در همسایگی ε از نقطه مرکزی باشد. با توجه به این تعاریف، الگوریتم خوشه‌بندی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

- تا زمانی که همه نقاط موجود در X بررسی شوند، موارد زیر انجام می‌شوند:
  - نقطه $\mathbf{x}_i$ که هنوز بررسی نشده است، انتخاب می‌شود
  - نقطه $\mathbf{x}_i$ به‌صورت نقطه بررسی شده، در نظر گرفته می‌شود
  - اگر $\mathbf{x}_i$، نقطه مرکزی باشد، موارد زیر انجام می‌شود:
    - مجموعه C، که شامل همه نقاط چگالی در دسترس از $\mathbf{x}_i$ است، تشکیل می‌شود.
    - مجموعه C اکنون یک خوشه را تشکیل می‌دهد. همه نقاط داخل این مجموعه به‌صورت بررسی شده در نظر گرفته می‌شوند.

تعداد k خوشه به‌صورت $C_1, \ldots, C_k$ تشکیل می‌شوند. نقاطی که به هیچ خوشه‌ای تخصیص نیافته‌اند، به‌صورت نویز یا داده پرت در نظر گرفته می‌شوند.

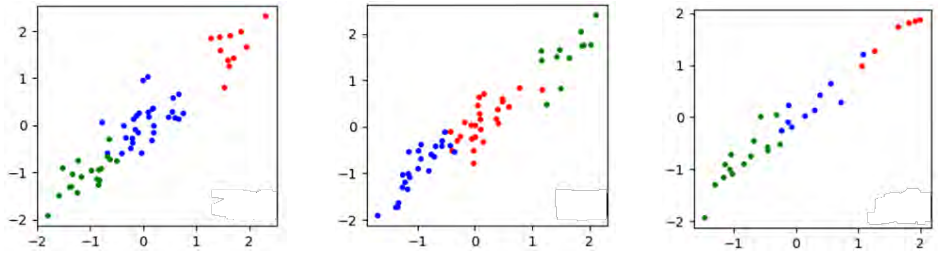
در مرحله اول خوشه‌بندی بر روی چهار مجموعه داده اصلی مربوط به سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ و ۲۰۱۹ انجام شد. از نقاط قوت الگوریتم یاد شده می‌توان به این مورد اشاره کرد که الگوریتم تعداد خوشه‌ها را به‌صورت بهینه تعیین می‌کند و نیازی به مشخص کردن تعداد خوشه‌های خروجی توسط کاربر نیست. پس از انجام فرایند خوشه‌بندی تعداد سه خوشه برای هر مجموعه داده شناسایی شد. تصویر خروجی الگوریتم خوشه‌بندی برای داده پنج سال مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. در مجموعه داده مربوط به سال ۲۰۱۳ تعداد ۱۵۴ نمونه، سال ۲۰۱۴ تعداد ۱۵۵ نمونه، سال ۲۰۱۵ تعداد ۱۵۶ نمونه، سال ۲۰۱۶ تعداد ۱۵۳ نمونه و سال ۲۰۱۹ تعداد ۱۴۲ نمونه حاضر بودند. دلیل این اختلاف در تعداد نمونه‌ها عدم وجود داده

برای برخی از نمونه‌ها در طی سال‌های یاد شده است. لازم به ذکر است خروجی این خوشه‌بندی به‌عنوان برچسب داده برای الگوریتم‌های طبقه‌بندی به کار می‌رود.



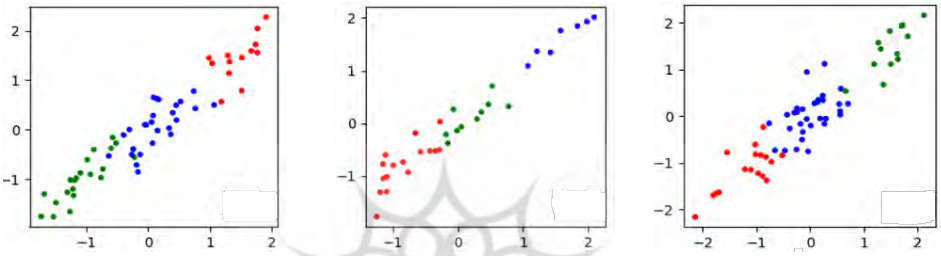
شکل (۳) نتایج خوشه‌بندی با استفاده از الگوریتم FDC

پس از اعمال خوشه‌بندی بر روی تمامی نمونه‌های موجود در مجموعه داده اولیه، به‌منظور کشف تفاوت بین نمونه‌ها در سطح هر خوشه و همچنین تعیین روند حرکتی به سمت خوشه‌های بالاتر، عملیات خوشه‌بندی بر روی هریک از خوشه‌های به‌دست‌آمده در مرحله قبلی اعمال شد. در این مرحله نیز از الگوریتم FDC برای انجام خوشه‌بندی استفاده شده و با توجه به نمونه‌های موجود در هر زیرخوشه، سه خوشه به‌عنوان خروجی هر مجموعه به‌دست‌آمده آمد. شکل‌های (۴)-(۸) نتیجه اجرای الگوریتم خوشه‌بندی FDC بر روی هر یک از زیرخوشه‌های به‌دست‌آمده در گام پیشین را نشان می‌دهند.



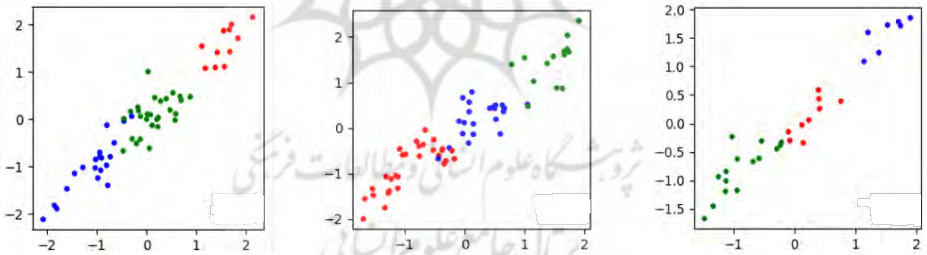
(الف) خوشه اول (ب) خوشه دوم (پ) خوشه سوم

شکل (۴) زیرخوشه‌های به‌دست‌آمده از خوشه‌های اصلی سال ۲۰۱۳



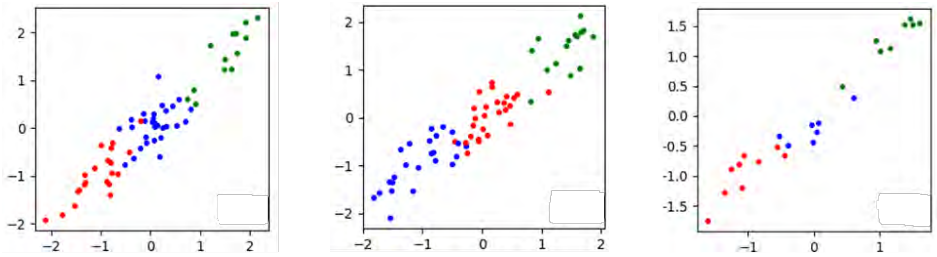
(الف) خوشه اول (ب) خوشه دوم (پ) خوشه سوم

شکل (۵) زیرخوشه‌های به‌دست‌آمده از خوشه‌های اصلی سال ۲۰۱۴



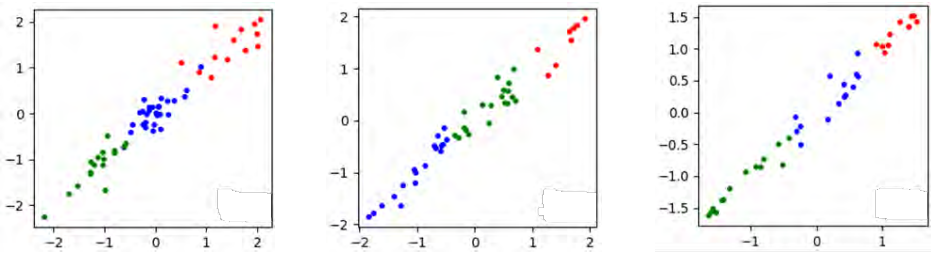
(الف) خوشه اول (ب) خوشه دوم (پ) خوشه سوم

شکل (۶) زیرخوشه‌های به‌دست‌آمده از خوشه‌های اصلی سال ۲۰۱۵



(الف) خوشه اول (ب) خوشه دوم (پ) خوشه سوم

شکل (۷) زیرخوشه‌های به‌دست‌آمده از خوشه‌های اصلی سال ۲۰۱۶



(الف) خوشه اول (ب) خوشه دوم (پ) خوشه سوم

شکل (۸) زیرخوشه‌های به‌دست‌آمده از خوشه‌های اصلی سال ۲۰۱۹

طبقه‌بندی

پس از طبقه‌بندی داده‌های مرتبط به سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ و سال ۲۰۱۹ با استفاده از الگوریتم FDC، خروجی این الگوریتم به‌عنوان برچسب داده‌ها در نظر گرفته و به مجموعه داده اضافه شد. پیشنهاد این پژوهش استفاده از دو روش طبقه‌بندی به نام‌های بردار پشتیبان ماشین (SVM[۱]) و k-نزدیک‌ترین همسایه (kNN[۲]) و بهینه‌سازی آن‌ها به‌منظور ایجاد دقت بالاتر و پیچیدگی محاسباتی کمتر است. سپس به‌منظور ایجاد یک شاخص ترکیبی جدید برای طبقه‌بندی نمونه‌ها، شاخص‌های موجود به‌صورت خطی با یکدیگر ترکیب شده و از طبقه‌بند SVM و kNN بهینه‌شده پیشنهادی برای طبقه‌بندی استفاده شد.

عملکرد SVM با کرنل گوسی و kNN به ترتیب به واریانس کرنل و تعداد همسایه‌ها وابسته است که باید مقدار بهینه آن‌ها به‌دست آید. برای یافتن واریانس کرنل گوسی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO[۳]) با هدف حداقل کردن خطای طبقه‌بندی استفاده شد. هم‌چنین، برای یافتن مقدار بهینه تعداد همسایه‌ها از روش Grid Search استفاده شد. برای اعتبارسنجی شاخص ابداعی، از معیار خطای طبقه‌بندی استفاده شد که به‌صورت نسبت نمونه‌هایی که درست طبقه‌بندی نشده‌اند به تعداد کل نمونه‌ها تعریف می‌شود و نتایج آن در بخش بعدی گزارش شده است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

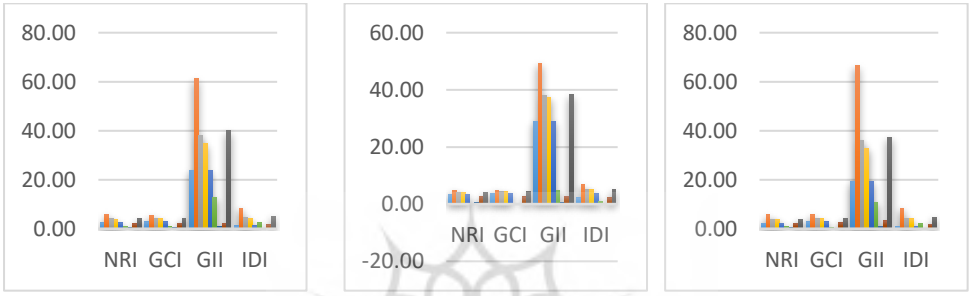
۱. Support Vector Machine (SVM)

۲. k-Nearest Neighbor (kNN)

۳. Particle Swarm Optimization (PSO)

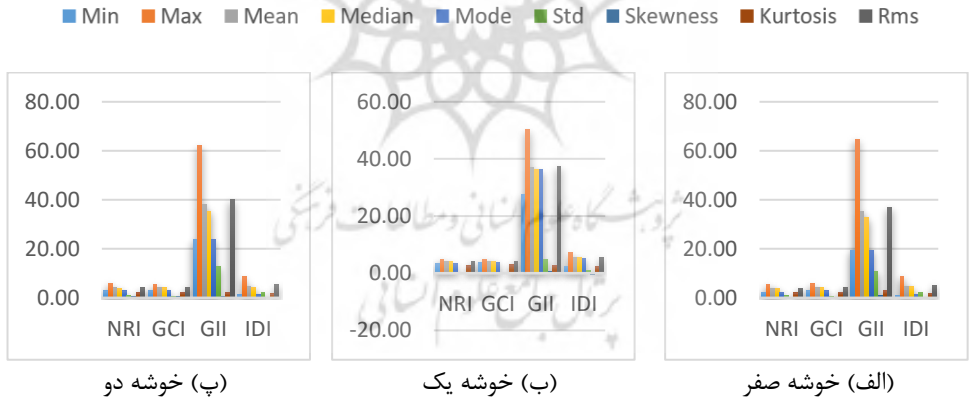
خوشه‌بندی

پس از انجام خوشه‌بندی نمونه‌های قرار گرفته در هر خوشه برای هر سال جدا شدند و مشخصه‌های آماری آن‌ها با استفاده از توابع کتابخانه‌های numpy و scipy پایتون محاسبه شد. نمودارهای (۱)-(۴) مشخصات آماری مربوط به مجموعه داده سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۶ و نمودار (۵) برای سال ۲۰۱۹ را نمایش می‌دهند. هم‌چنین مقادیر میانگین هر شاخص به ازای هر خوشه در طول زمان در نمودار (۶) نمایش داده شده‌اند.



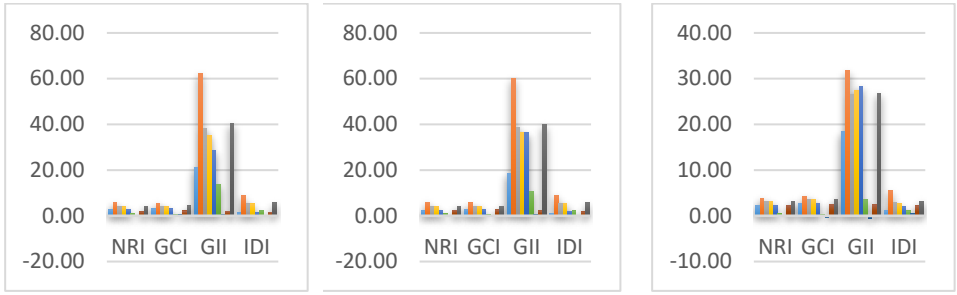
(پ) خوشه دو (ب) خوشه یک (الف) خوشه صفر

نمودار (۱) مشخصات آماری خوشه‌های مجموعه داده مربوط به سال ۲۰۱۳



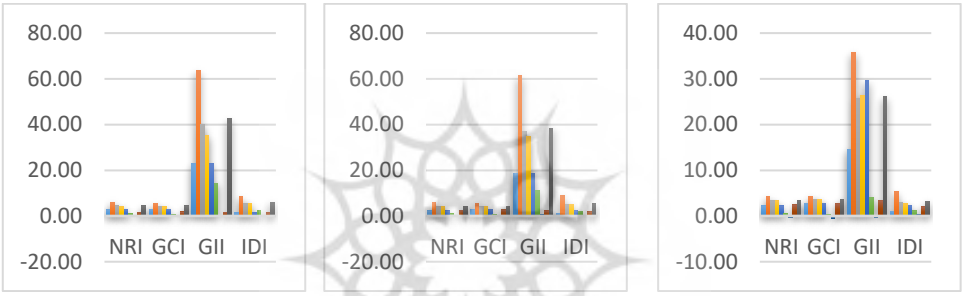
(پ) خوشه دو (ب) خوشه یک (الف) خوشه صفر

نمودار (۲) مشخصات آماری خوشه‌های مجموعه داده مربوط به سال ۲۰۱۴



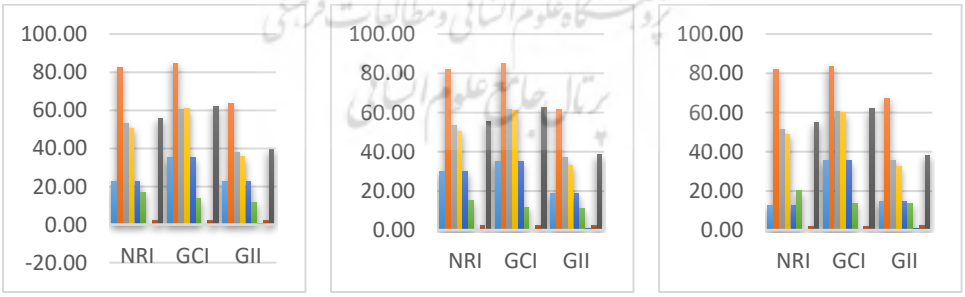
(پ) خوشه دو (ب) خوشه یک (الف) خوشه صفر

نمودار (۳) مشخصات آماری خوشه‌های مجموعه داده مربوط به سال ۲۰۱۵



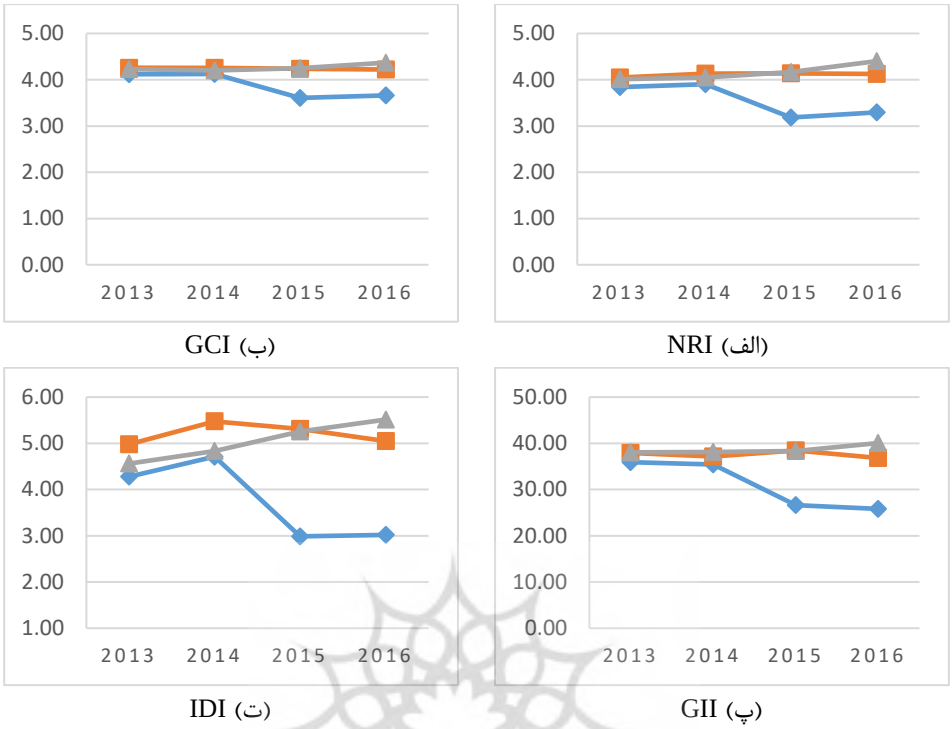
(پ) خوشه دو (ب) خوشه یک (الف) خوشه صفر

نمودار (۴) مشخصات آماری خوشه‌های مجموعه داده مربوط به سال ۲۰۱۶



(پ) خوشه دو (ب) خوشه یک (الف) خوشه صفر

نمودار (۵) مشخصات آماری خوشه‌های مجموعه داده مربوط به سال ۲۰۱۹



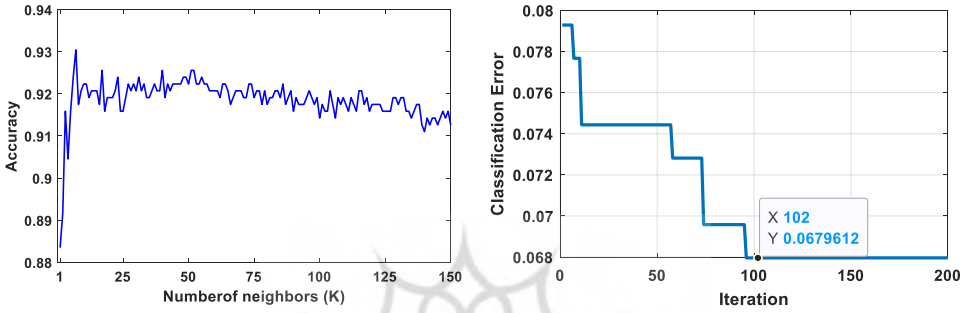
نمودار (۶) مقادیر تاریخی شاخص‌های مختلف برای هر خوشه

طبقه‌بندی

پارامترهای الگوریتم PSO، که برای بهینه‌سازی استفاده شده‌اند، در جدول (۱) نمایش داده شدند. هم‌چنین بازهٔ تغییر واریانس کرنل گوسی در بازه ۰.۰۰۱ تا ۰.۱ است نمودار (۷-الف) خطای طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم SVM را با در نظر گرفتن چهار شاخص در تکرارهای مختلف PSO نمایش می‌دهد که دقت طبقه‌بندی معادل ۹۳.۲٪ دارد. برای یافتن تعداد همسایه‌ها در طبقه‌بند kNN، مقدار آن در بازه ۱ تا ۱۵۰ تغییر داده شد. تغییرات دقت طبقه‌بندی بر حسب تعداد همسایگی‌ها در نمودار (۷-ب) نمایش داده شده است که بیشترین دقت طبقه‌بندی معادل ۹۳.۰۴٪ است و به ازای $k = ۷$ به دست می‌آید.

جدول (۲) پارامترهای الگوریتم PSO که برای بهینه‌سازی استفاده شده‌اند

پارامتر	مقدار
تعداد جمعیت	۵۰
حداکثر تعداد تکرار	۲۰۰
C۱	۱.۵
C۲	۲

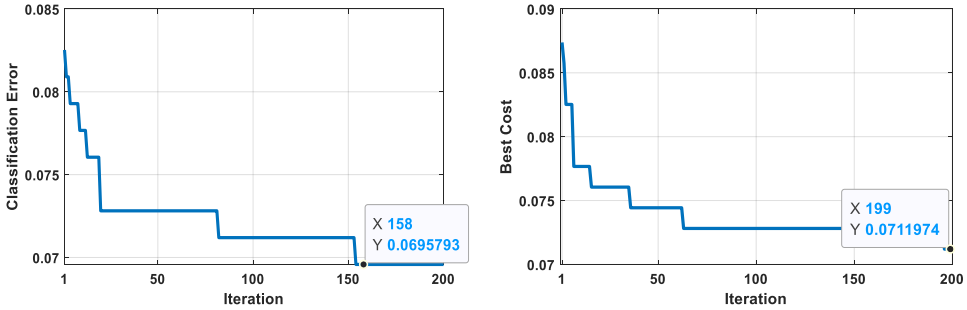


(ب) طبقه‌بند kNN (الف) طبقه‌بند SVM

نمودار (۷) عملکرد طبقه‌بندی‌های مختلف با استفاده از چهار شاخص

برای ایجاد شاخص ترکیبی، بازه تغییر ضرایب (وزن‌های) استفاده‌شده برای تولید شاخص ترکیبی در محدوده منفی ۵۰ تا مثبت ۵۰ در نظر گرفته شده است. به‌منظور استفاده از SVM برای این طبقه‌بندی از دو بهینه‌سازی استفاده شد، بهینه‌سازی وزن‌های ترکیبی و بهینه‌سازی پارامتر کرنل SVM. ابتدا الگوریتم PSO اجرا شد تا وزن‌های شاخص ترکیبی به‌روزرسانی شوند و سپس الگوریتم PSO دیگری به‌منظور یافتن بالاترین دقت طبقه‌بندی برای هر ترکیب وزنی یافت شده اجرا می‌شود. نمودار (۸-الف) خطای طبقه‌بند SVM با در نظر گرفتن شاخص ترکیبی در تکرارهای مختلف PSO را نشان می‌دهد که به‌دقت ۹۲.۹٪ رسیده است.

در طبقه‌بند kNN، به ازای هر ترکیب وزن، که با الگوریتم PSO به دست می‌آید، طبقه‌بند kNN با تعداد همسایگی در بازه ۱ تا ۱۵۰ اجرا می‌شود. سپس بهترین دقت به‌دست‌آمده به‌عنوان خطای آن تکرار PSO گزارش شد که در پژوهش حاضر خطای نهایی برابر ۰.۰۶۹ به دست آمد که معادل با دقت طبقه‌بندی ۹۳.۱٪ است. نمودار (۸-ب) خطای طبقه‌بند kNN بر اساس تعداد تکرارهای مختلف به‌روزرسانی شاخص ترکیبی را نمایش می‌دهد.



(الف) طبقه‌بند SVM (ب) طبقه‌بند kNN

نمودار (۸) عملکرد طبقه‌بندی‌های مختلف با استفاده از شاخص ترکیبی

یافته‌ها

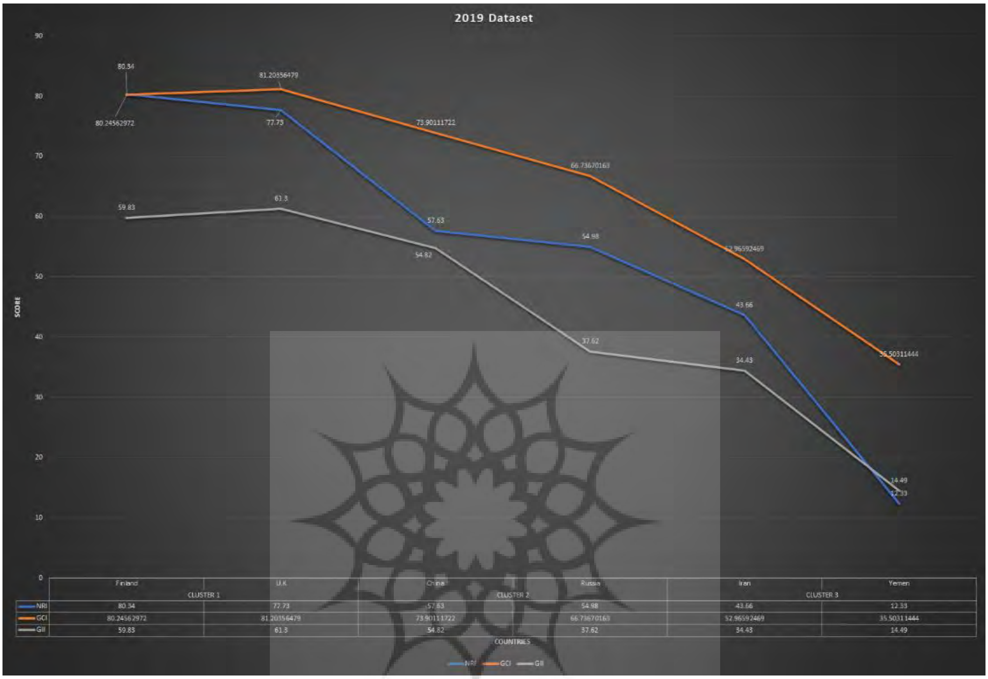
همان‌گونه که در بخش مربوط به روش‌شناسی اشاره گردید سنجه نهایی و جامع پیشنهادی میزان آمادگی کشورها در مواجهه با انقلاب صنعتی چهارم دارای شاخص‌های متعددی است. اولین شاخص، محیط توانمندساز است که شامل زیر شاخص‌های نهادها، زیرساخت، به‌کارگیری فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی، ثبات اقتصاد کلان، منابع طبیعی و مقرون‌به‌صرفه بودن فعالیت‌های فناورانه است. شاخص دوم، سرمایه انسانی است که دارای زیرشاخص‌های مهارت، سلامت و مهاجرت است. شاخص سوم، شاخص نوآوری است که دارای زیرشاخص‌های ظرفیت نوآوری و کسب‌وکارهای نوآورانه است. شاخص چهارم، سیستم اقتصادی است که شامل زیرشاخص‌های سیستم مالی، بازار کار، اندازه بازار، بازار محصول، سرمایه‌گذاری، پیچیدگی و مقیاس‌پذیری است. در اغلب شاخص‌ها و زیرشاخص‌های مرتبط، ایران رتبه‌های پایین‌تر از میانگین را کسب نموده است. البته در زیرسنجه‌هایی مانند سرمایه اجتماعی، کارایی نهادهای قانون‌گذاری، زیرساخت، دولت الکترونیک، مقرون‌به‌صرفه بودن فناوری، مهارت‌های دیجیتال، کیفیت تدریس ریاضیات و علوم، انتشارات علمی، کیفیت نهادهای پژوهشی، هزینه شروع کسب‌وکار، رشد شرکت‌های نوآور، رتبه‌های بالاتر از میانگین نیز مشاهده می‌شود که در این میان رتبه‌های حوزه کیفیت انتشارات علمی و نهادهای پژوهشی در چارک اول قرار دارد.

در بخش تجزیه‌وتحلیل داده‌ها اشاره شد که کشورها بر اساس خوشه‌بندی انجام شده به لحاظ میزان آمادگی در برابر انقلاب صنعتی چهارم، به سه خوشه صفر، یک و دو افزار شدند. برای کشورهای خوشه صفر (کشورهایی با سطح پایین آمادگی برای صنعت ۴.۰) شاخص NRI، GCI و GII طی سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ روند یکسانی را طی کرده‌اند، اما در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ با افت شدیدی روبرو شدند. درباره شاخص IDI در سال ۲۰۱۴ بهبودی جزئی نسبت به سال

۲۰۱۳ مشاهده گردید که باعث کاهش فاصله بین کشورهای این دسته و دسته بالاتر شده و طی سال‌های بعد مقادیر این شاخص با افت شدیدی روبرو شدند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کشورهای موجود در این دسته در طی سال‌ها در زیرشاخص‌هایی مانند ارتباط دانشگاه با صنعت، به‌کارگیری ICT در کسب‌وکار، میزان ثبت نام در تحصیلات عالی و تکمیلی، نه‌تنها با رشد مواجه نشده بلکه روندی نزولی به خود دیده‌اند. برای کشورهای خوشه یک (کشورهایی که دارای پیش‌نیازهای صنعت ۴.۰ هستند اما نیاز به بهبود آن‌ها دارند) مشاهده گردید که شاخص NRI در سال ۲۰۱۴ رشد چشمگیری نسبت به سال ۲۰۱۳ را تجربه کرد و باعث کاهش فاصله این کشورها با کشورهای خوشه بالاتر شد اما در سال ۲۰۱۵ این روند متوقف شد و بعد از سال ۲۰۱۶ روند نزولی به خود گرفت. برای شاخص GCI روند در طی چهار سال نزولی بوده و شاخص GII روندی نامنظم را تجربه کرده است. شاخص IDI برای کشورهای این خوشه روندی تقریباً یکسان دارد. بنابراین می‌توان پیشنهاد کرد، کشورهایی که در این خوشه قرار دارند نیاز به تقویت زیرشاخص‌هایی مانند تقویت قوانین مربوط به ICT، تقویت بیشتر زیرساخت مانند افزایش پهنای باند اینترنت، جذب فناوری در شرکت‌ها، استفاده از ICT در تراکنش‌های B۲B و ... دارند. هم‌چنین کشورهای این حوزه نیاز به بهبود در شاخص IDI دارند.

در کشورهای خوشه دوم (کشورهایی با سطح بالایی از پیش‌نیازهای صنعت ۴.۰) که استفاده از فناوری‌های صنعت ۴.۰ را آغاز کرده‌اند، شاخص‌های NRI، GII و IDI روندی کاملاً صعودی را طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ تجربه کردند. این بدان معنا است که این کشورها در زیرشاخص‌هایی مانند محیط سیاسی و رگولاتوری، محیط نوآوری، سرمایه انسانی و پژوهش، خدمات دولتی آنلاین، صادرات فناوری‌های پیشرفته، خروجی‌های خلاقانه و ... رشد بسیار سریع‌تری نسبت به دیگر کشورها داشته و باعث افزایش فاصله این کشورها با کشورهای حاضر در خوشه‌های پایینی شده است. همچنین مشاهده می‌شود که شاخص GCI در سال ۲۰۱۴ نسبت به ۲۰۱۳ با مقداری افت روبرو بود که فاصله این کشورها را در حوزه‌هایی مانند شاخص مشارکت الکترونیک، زیرساخت، به‌کارگیری ICT در زمینه‌های مختلف (سازمانی، کسب‌وکار، مدارس و ...) و ... با کشورهای خوشه دوم به حداقل رساند اما روند صعودی طی سال‌های بعد از ۲۰۱۶ باعث جبران این پسرفت و افزایش دوباره فاصله شد. با نگاهی کلی به نظر می‌رسد که کشورهای خوشه صفر در زمینه جایگاه خود در مسیر حرکت به سمت اتخاذ فناوری‌های صنعت ۴.۰ طی سال‌های اخیر نسبت به دو خوشه بالایی افت محسوسی را مشاهده کردند که این افت، به‌خصوص در شاخص IDI مشهودتر به نظر می‌رسد. بنابراین، بهبود در زیرشاخص‌های شاخص

IDI و همچنین GCI می‌تواند در جهت سرعت بخشیدن به حرکت این کشورها از سطح پایین (خوشه صفر) به سطوح بالاتر کمک شایان توجهی داشته باشد. در ادامه و در نمودار ۹ وضعیت دو کشور از هر خوشه مورد مقایسه قرار گرفته است.



نمودار (۹) بررسی شاخص‌های چندین کشور از خوشه‌های مختلف

نتایج رتبه‌بندی شاخص آنکتاد نیز نشان می‌دهد ایران از میان ۱۵۸ کشور در شاخص کل آمادگی برای فناوری‌های پیشرو رتبه ۷۵ جهان و رتبه دهم منطقه خاورمیانه را در سال ۲۰۲۲ میلادی کسب کرده است. برخی کشورهای منطقه مانند امارات متحده عربی و عربستان رتبه‌های بهتری را نسبت به ایران اخذ کرده‌اند. رتبهٔ ایران بین سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ کاهشی و پس از سال ۱۳۹۴ با رشد مواجه شده است. در زیرشاخص استقرار فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی، ایران رتبه‌ای پایین‌تر از میانگین داشته و در رتبهٔ هفتاد و هشتم جهان و دهم خاورمیانه قرار گرفته است. وضعیت ایران در زیرشاخص مهارت کمی بهتر بوده و در رتبه ۷۴ جهان و هشتم خاورمیانه قرار گرفته است. البته بین سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۱، ارتقای نسبی نمرات این شاخص را برای ایران شاهد هستیم. در زیرشاخص تحقیق و توسعه، ایران در رتبه پنجم منطقه خاورمیانه

و سی و پنجم دنیا قرار دارد، ولی متأسفانه به نسبت برخی کشورهای خاورمیانه مانند عربستان، ترکیه و امارات متحده عربی رتبه پایین‌تری به دست آورده است. در طول سال‌های بررسی نیز ارتقای نسبی رتبه از ۴۰ به ۳۵ را شاهد هستیم. در زیرشاخص فعالیت صنعتی، ایران در رتبه دوازدهم خاورمیانه و صد و هجدهم جهان قرار دارد. رتبه ایران در این زیرشاخص در طول سال‌های بررسی بهبود اندکی داشته است. در زیرشاخص تأمین مالی، ایران در رتبه دهم خاورمیانه و شصت و دوم جهان قرار دارد. کشورهایی مانند قطر، قبرس، اردن و کویت در صدر کشورهای خاورمیانه از منظر این شاخص قرار گرفته‌اند. ایران در طول سال‌های بررسی ارتقای رتبه معناداری در این زیرشاخص نداشته است.

نتیجه‌گیری

شاخص‌های مختلف آمادگی و مدل‌های بلوغ می‌توانند به دولت‌ها در تصمیم‌گیری آسان‌تر و همچنین سریع‌تر در مورد مسائلی کمک کنند که در چه حوزه‌هایی و با چه سرعتی باید صنعت را توسعه دهند. در این میان، هر دوی این مسائل، نه‌تنها موقعیت خود دولت‌ها، بلکه موقعیت رقابتی آن را نیز نشان می‌دهند. در این پژوهش از روشی کاملاً جدید و متفاوت برای دسته‌بندی کشورها و تعیین جایگاه آن‌ها در حرکت به سمت فناوری‌های صنعت ۴.۰ استفاده شد. در ابتدا کشورها بر اساس شاخص‌های NRI، GCI، GII و IDI و با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی FDC به خوشه‌های مجزا تقسیم شدند. این الگوریتم خوشه‌بندی عملکرد بهتری در تفکیک نمونه‌ها نسبت به الگوریتم‌های مشابه از خود به نمایش گذاشت. خروجی این الگوریتم شامل سه خوشه بود که نشان‌دهنده جایگاه کشورهایی است که در آن‌ها قرار می‌گیرند. این سه دسته به ترتیب شامل کشورهایی با سطح پایینی از پیش‌نیازهای صنعت ۴.۰ (خوشه صفر خروجی الگوریتم خوشه‌بندی)، کشورهایی که دارای پیش‌نیازهای صنعت ۴.۰ هستند اما نیاز به بهبود آن‌ها دارند (خوشه یک خروجی الگوریتم خوشه‌بندی) و کشورهایی با سطح بالایی از پیش‌نیازهای صنعت ۴.۰ (خوشه دو الگوریتم خوشه‌بندی) هستند. سپس، از خروجی خوشه‌بندی به‌عنوان برچسب گروه برای کشورها و از الگوریتم‌های kNN و SVM به‌عنوان الگوریتم مناسب برای مدل‌سازی و پیش‌بینی حرکت کشورها به دیگر دسته‌ها استفاده شد. هم‌چنین عملیات بهینه‌سازی روی الگوریتم‌های kNN و SVM انجام شد که خروجی این الگوریتم‌ها در مقابل الگوریتم‌های دیگر طبقه‌بندی از عملکرد مناسب‌تری برخوردار بود. پس از اعمال الگوریتم‌های طبقه‌بندی و تحلیل نتایج، یک شاخص ترکیبی برای دسته‌بندی بهینه کشورها و آینده‌پژوهی و پیش‌بینی حرکت

آن‌ها به سمت صنعت ۴.۰ معرفی گردید. سپس، از خروجی خوشه‌بندی به‌عنوان برچسب گروه برای کشورها استفاده شد. در مدل ترکیبی جدید با استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی سعی در بهینه‌سازی عملکرد به‌منظور ارائهٔ دقت بهتر در نتایج شد. طبقه‌بندی انجام شده با شاخص ترکیبی نیز عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های مشابه داشت.

مقایسه نتایج حاصل از خوشه‌بندی پیشنهادی در دورهٔ زمانی شش‌ساله ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹ با نتایج بررسی شاخص آنکتاد نیز بر صحت این خوشه‌بندی و قابلیت پیش‌بینی مدل ارائه‌شده برای دوره‌های زمانی بیشتر اشاره دارد، به‌گونه‌ای که قرابت نتایج رتبه‌بندی آنکتاد با نتایج خوشه‌بندی و رتبه خوشه‌ها در مدل پیشنهادی، قابلیت تعمیم نتایج خوشه‌بندی و پیش‌بینی وضعیت کشورها تا سال ۲۰۲۲ و دوره‌های بعدی را نشان می‌دهد. تغییر رتبه‌های اغلب کشورهای قرار گرفته در سه خوشهٔ معرفی‌شده در این مقاله، آن‌قدر قابل توجه نیست که به تغییر خوشه و ارتقا و یا تنزل به خوشه‌های دیگر منجر شده باشد. هم‌چنین تفاوت سرعت رشد خوشه‌ها نسبت به یکدیگر خصوصاً خوشه اول نسبت به خوشه صفر، امکان تغییر خوشه برای کشورها را دشوار ساخته است. این موضوع ریشه در مشکلات مزمن زیرساختی، اقتصاد کلان و نهادی در کشورهای خوشه صفر دارد که در طول دوره بیست‌ساله گذشته مرتفع نشده و باعث کاهش رشد آمادگی این کشورها در مواجهه با فناوری‌های نوین شده است. بررسی وضعیت ایران در این خصوص نیز جالب توجه است. به‌رغم قرارگیری ایران در رتبه‌های نسبت مناسب در حوزه علمی و پژوهشی و رشد شرکت-های دانش‌بنیان، لکن اهمیت شاخص‌های اقتصادی، تأمین مالی و مشکلات زیرساختی در حدّی است که امکان رشد قابل توجه رتبه کلی ایران در شاخص‌های آمادگی در مواجهه با فناوری‌های نوین ۴.۰ را فراهم نمی‌کند. مقایسه نتایج مدل رتبه‌بندی و خوشه‌بندی پیشنهادی در این مقاله با یافته‌های بلندمدت شاخص آنکتاد نیز بر صحت این ادعا اشاره دارد. به‌گونه‌ای که حتی در شاخص آنکتاد نیز به‌رغم کیفیت بالای ایده‌سازی و تحقیق و توسعه دانش‌بنیان در بیست سال گذشته در کشور، به دلیل ضعف‌های سیستم نهادی و اقتصادی در تأمین مالی، هدایت و تجاری-سازی و صادرات فناوری، عملاً تلاش‌های دولت‌ها برای ارتقای جایگاه ایران به نتایج ارزشمند منجر نشده است. شرایط خوشه ایران و رشد بالای خوشه اول بر این نکته اشاره دارد که ایران برای ارتقای خوشه نیازمند ایفای اقدامات سریع و پایدار در حوزهٔ تحول زیرساختی، اقتصادی و نهادی برای تأمین مالی هدفمند، توسعه کاربری، رشد تجاری‌سازی و صادرات فناوری است. در این راستا تدوین یک بستهٔ حمایتی تحول‌بخش برای ارتقای سهم فناوری از اقتصاد کشور ضروری است. در این بسته حمایتی می‌بایست ضمن حمایت از فرایند توسعه پژوهش‌های فناوری‌محور

در کشور، نظام تأمین مالی مناسبی نیز برای تجاری‌سازی و جلب مشارکت‌های مردمی به حوزهٔ فناوری‌های نوین پیش‌بینی شود. در این راستا تعیین یک بانک تخصصی حمایتی برای حوزه فناوری، افزایش سرمایه و بهبود کارکردی صندوق نوآوری و شکوفایی و صندوق‌های پژوهش و فناوری، توسعه بازار اولیه کسب‌وکارهای فناور محور در بازار سرمایه ایران، انتشار هدفمند اوراق بدهی برای تأمین مالی حوزه فناوری، ایجاد امکان توکنایز کردن فناوری و نشر و بازارسازی برای توکن‌های مربوطه، تعیین یارانه‌های حمایتی در مناطق آزاد اقتصادی و تجاری کشور برای میزبانی کسب‌وکارهای فناور و ایجاد بازارهای منطقه‌ای فناوری با توجه به سهولت فعالیت‌های بازرگانی بین‌الملل در این مناطق، توسعه کاربری فناوری‌های نوین در سازمان‌های دولتی به‌عنوان یک تکلیف حاکمیتی، سیاست‌گذاری برای ارائهٔ معافیت‌های مالیاتی و کمک‌های بلاعوض، ایجاد کنسرسیوم‌های صنعتی و تجاری با بخش خصوصی برای تزریق فناوری‌های نوین در صنایع، خصوصاً صنایع کوچک و متوسط و تغییر رویکرد دانشگاه‌ها از نهادهای آموزشی صِرف به پلتفرم-های توسعهٔ فناوری در عین سیاست‌گذاری برای توسعه قوانین حمایت از مالکیت معنوی، می‌تواند به بهبود پایدار جایگاه کشور در حوزهٔ مواجهه با فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم در میان‌مدت ختم شود. موضوعی که به‌صورت غیرمستقیم بر بهبود قدرت کشور، توسعه امنیت ملی و روابط بین‌الملل نیز تأثیر خواهد گذاشت.

قدردانی

از همه خبرگان و اساتیدی که در طول پژوهش محقق را در گردآوری داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل و اعتبارسنجی یافته‌های پژوهش یاری رسانده‌اند سپاسگزارم.

پرتال جامع علوم انسانی

منابع

- احمدی، فرید و منصوری، عیسی. (۱۳۹۹). *نظام حکمرانی ۴.۰*، چاپ اول، ارومیه: انتشارات دانشگاه صنعتی ارومیه.
- احمدی، فرید. ۱۳۹۸. طرح پژوهشی "*تدوین سند ساختار حکمرانی کارآفرینی ۴.۰ و ارائه سیاست‌ها و برنامه‌های عملیاتی در کشور*"، وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی.
- سپهری، محمد. (۱۴۰۰). تدوین راهبردهای دفاع سایبری کشور در برابر تهدیدهای آتی دشمن در افق چشم‌انداز ۱۴۰۵. *آینده‌پژوهی دفاعی*، ۶(۲۳).

- زارع گنجارودی، مالک، کاظمیان، غلامرضا، قربانی‌زاده، وجه‌الله و خان‌محمدی، هادی. (۱۴۰۲). مؤلفه‌های راهبردی توسعه پایدار با رویکرد قدرت ملی در ایران. *آینده‌پژوهی دفاعی*، ۸(۳۰).
- علایی‌پور، فرشته و کاشیان، عبدالمحمد. (۱۴۰۱). تأثیر مؤلفه‌های اقتصادی قدرت نرم جمهوری اسلامی ایران بر توسعه روابط تجاری با چین. *فصلنامه علمی مطالعات قدرت نرم*، ۱۲(۱).
- قاضی‌زاده، علیرضا. (۱۳۹۹). مبانی امنیت ملی، تهران: موسسه فرهنگی مطالعات و تحقیقات راهبردی- ابرار معاصر تهران.
- محمودزاده، ابراهیم، قاضی، حسن و قوچانی، محمدمهدی. (۱۳۹۶). نقش و جایگاه توسعه فناوری در بعد نظامی قدرت ملی. *فصلنامه مطالعات دفاعی استراتژیک*، ۱۵(۶).
- موسوی زارع، سیدجواد، زرقانی، سیدهادی و اعظمی، هادی. (۱۳۹۵). بررسی متغیرهای مؤثر بر قدرت علمی و فناوری و ارائه مدل ارزیابی قدرت علمی و فناوری کشورها. *پژوهش‌های جغرافیای سیاسی*، ۳(۱).
- نجفی، سجاد، یزدان‌پناه، کیومرث، پیشگاهی‌فرد، زهرا و بدیعی، مرجان. (۱۳۹۹). تبیین عوامل علمی و فناوری کلیدی تأثیرگذار بر قدرت دفاعی ایران در افق زمانی ۱۴۱۰. *فصلنامه مدیریت نظامی*، ۲۰(۷۹).

- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., & Habich, M. (۲۰۲۰). Industry ٤,٠: How it is defined from a socio-technical perspective and how much sustainability it includes–A literature review. *Journal of cleaner production*, ۲٥۹, ۱۲۰۸٥٦.
- Berger, R. (۲۰۱۸). Industry ٤,٠: The role of Switzerland within a European manufacturing revolution.
- Digital Transformation Monitor, Key lessons from national industry ٤,٠ policy initiatives in Europe. (۲۰۱۷). European Commission.
- Dutta, S., Lanvin, B., & Wunsch-Vincent, S. (Eds.). (۲۰۲۰). *Global innovation index 2020*. Johnson Cornell University.
- Gilchrist, A. (۲۰۱٦). *Industry 4.0: the industrial internet of things*. Apress.
- Ghobakhloo, M. (۲۰۱۸). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry ٤,٠. *Journal of Manufacturing Technology Management*, ۲۹(٦), ۹۱۰-۹۳٦.
- Groumpos, P. P. (۲۰۲۱). A critical historical and scientific overview of all industrial revolutions. *IFAC-PapersOnLine*, ٥٤(۱۳), ٤٦٤-٤۷۱.
- Grupp, H., & Mogee, M. E. (۲۰۱۷). Science, Technology and Industry Scoreboard ۲۰۱۷: The Digital Transformation.

- Matthews, C. H., & Brueggemann, R. (۲۰۱۵). *Innovation and entrepreneurship: A competency framework*. Routledge.
- Mehta, P., Bukov, M., Wang, C. H., Day, A. G., Richardson, C., Fisher, C. K., & Schwab, D. J. (۲۰۱۹). A high-bias, low-variance introduction to machine learning for physicists. *Physics reports*, ۸۱۰, ۱-۱۲٤.
- Stankovic, M., Ravi, G. & E. Figueroa, J. (۲۰۱۷). Industry ٤,۰ Opportunities behind the challenge, Unido General Conference ۱۷.
- Schwab, K. & Samans, R. (۲۰۱٦). The Future of Jobs, Employment, Skills and Workforce Strategy for the Fourth Industrial Revolution. *Global Challenge Insight Report. world economic forum.*
- Schwab, K. and Samans, R. (۲۰۱٦). The future of jobs: Employment, skills and workforce strategy for the fourth industrial revolution. *In World Economic Forum.*
- Schwab, K. (۲۰۱۹). Insight report-world economic forum. In *World Economic Forum*.
- UNCTAD Database: Frontier Technology Readiness Index.
- UNCTAD. (۲۰۲۳). Technology and Innovation Report ۲۰۲۳. New York: United Nations Publication.
- World Bank. (۲۰۱۰). *Innovation Policy: A guide for developing countries*. The World Bank.
- World Economic Forum. (۲۰۲۱). The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond.
- Wunsch-Vincent, S., Lanvin, B., & Dutta, S. (۲۰۱۵). *The Global Innovation Index 2015: effective innovation policies for development* (No. id: ۷٤۹۱).