

Transition to Industry 4.0 from a Sustainable Development Perspective: A Meta-Synthesis of Opportunities, Challenges, and Policy Requirements

Mohadeseh Alaei ¹, Mostafa Safdari Ranjbar ^{*2}, Elham Faham ³

1. M.Sc. in Business Administration, Department of Management and Accounting, College of Farabi, University of Tehran, Qom, Iran
2. Associate Professor, Department of Management and Accounting, College of Farabi, University of Tehran, Qom, Iran
3. Assistant Professor, Research Institute for Information and Communication Technology, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Tehran, Iran

*. Corresponding Author: Mostafa.safdary@ut.ac.ir

Received: 23 May 2025

Revised: 4 January 2026

Accepted: 5 January 2026

Abstract

Industry 4.0, by leveraging digital technologies such as the Internet of Things and artificial intelligence, has created unprecedented opportunities for achieving the Sustainable Development Goals (SDGs). However, it has simultaneously introduced challenges such as inequality, the digital divide, and negative environmental impacts. Accordingly, this study employs a meta-synthesis approach, conducting a systematic review of 30 sources—including reputable scientific articles, international policy reports published by the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) and the World Economic Forum (WEF), and official documents released by other international entities—to identify opportunities, challenges, and policy requirements for aligning Industry 4.0 with sustainable development. The findings of this study indicate that, in the economic dimension, advanced technologies enhance productivity and competitiveness; however, high costs and dependence on foreign technology pose significant obstacles. In the social dimension, these technologies enhance access to education and public services, but they also exacerbate inequality, the digital divide, and unemployment induced by automation. In the environmental dimension, while energy consumption and pollutants are reduced, the generation of electronic waste and energy consumption by data centers remains challenging. The results underscore the necessity of strengthening digital infrastructure, developing workforce skills, establishing environmental standards, and expanding international cooperation both in technology development and in the governance and policymaking of emerging technologies. In Iran, it is essential to consider the role of sanctions, shortages in infrastructure, lack of human resource knowledge and skills, and regional inequalities when formulating policies for the transition to Industry 4.0.

Keywords: Sustainable Development, Industry 4.0, Policy Requirements, Digital Technologies, Meta-synthesis.

Citation: Alaei, M., Safdari Ranjbar, M., & Faham, E. (2026). Transition to Industry 4.0 from a Sustainable Development Perspective: A Meta-Synthesis of Opportunities, Challenges, and Policy Requirements. *Journal of Technology Development Management*, 13(1), 81–116. <https://doi.org/10.22104/jtdm.2026.7637.3415>

گذار به صنعت ۴/۰ از منظر توسعه پایدار؛ فراترکیبی از فرصت‌ها، چالش‌ها و الزامات سیاستی

محدثه علایی^۱، مصطفی صفدری رنجبر^{۲*}، الهام فهام^۳

۱. کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، قم، ایران

۲. دانشیار دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، قم، ایران

۳. استادیار پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات جهاد دانشگاهی، تهران، ایران

*. نویسنده مسئول: Mostafa.safdari@ut.ac.ir

پذیرش: ۱۵ دی ۱۴۰۴

بازنگری: ۱۴ دی ۱۴۰۴

دریافت: ۲ خرداد ۱۴۰۴

چکیده

صنعت ۴/۰ با بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال مانند اینترنت اشیا و هوش مصنوعی، فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار (SDGs) فراهم کرده است، اما در عین حال چالش‌هایی نظیر نابرابری و شکاف دیجیتال و اثرات منفی زیست‌محیطی را به همراه دارد. در همین راستا، این پژوهش به بهره‌گیری از رویکرد فراترکیب و بر پایه مرور نظام‌مند ۳۰ منبع شامل مقالات علمی معتبر، گزارش‌های سیاستی بین‌المللی منتشر شده توسط سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD) و مجمع جهانی اقتصاد (WEF) و اسناد رسمی منتشر شده توسط سایر نهادهای بین‌المللی انجام شده است، به شناسایی فرصت‌ها، چالش‌ها و الزامات سیاستی برای هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با توسعه پایدار پرداخته است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که در بعد اقتصادی، فناوری‌های پیشرفته بهره‌وری و رقابت‌پذیری را افزایش می‌دهند، اما هزینه‌های بالا و وابستگی به فناوری خارجی موانع جدی ایجاد می‌کنند. در بعد اجتماعی، این فناوری‌ها دسترسی به آموزش و خدمات عمومی را بهبود می‌بخشند، اما نابرابری و شکاف دیجیتال و بیکاری ناشی از اتوماسیون را تشدید می‌کنند. در بعد زیست‌محیطی، مصرف انرژی و آلاینده‌ها کاهش می‌یابد، اما تولید زباله‌های الکترونیکی و مصرف انرژی در مراکز داده چالش‌آفرین است. نتایج حاکی از ضرورت تقویت زیرساخت‌های دیجیتال، توسعه مهارت‌های نیروی کار، تدوین استانداردهای زیست‌محیطی و گسترش همکاری‌های بین‌المللی هم در زمینه توسعه فناوری و هم در زمینه حکمرانی و سیاستگذاری فناوری‌های نوظهور است. در ایران، توجه به نقش تحریم‌ها، کمبود زیرساخت‌ها، دانش و مهارت‌های نیروی انسانی و نابرابری‌های منطقه‌ای در سیاست‌گذاری برای گذار به صنعت ۴/۰ ضروری است.

کلمات کلیدی: توسعه پایدار، صنعت ۴/۰، الزامات سیاستی، فناوری‌های دیجیتال، فراترکیب.

مقدمه

صنعت ۴/۰ که از دهه ۲۰۱۰ میلادی به‌عنوان چهارمین انقلاب صنعتی مطرح شد، با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیا (IoT^1)، هوش مصنوعی (AI^2) و داده‌های کلان، تحولی عمیق در فرآیندهای صنعتی و اقتصادی ایجاد کرده است (کاگرمَن و همکاران^۳، ۲۰۱۳). اهداف توسعه پایدار (SDGs) سازمان ملل متحد (۲۰۱۵) چارچوبی برای توسعه متوازن در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ارائه می‌دهند. صنعت ۴/۰ می‌تواند در بعد اقتصادی با افزایش بهره‌وری (هدف ۸)، در بعد اجتماعی با بهبود دسترسی به آموزش (هدف ۴) و در بعد زیست‌محیطی با کاهش انتشار کربن (هدف ۱۳) به تحقق این اهداف کمک کند (قباخلو، ۲۰۲۰). بااین‌حال، چالش‌هایی مانند نابرابری دیجیتال، بیکاری ناشی از اتوماسیون و افزایش زباله‌های الکترونیکی، موانع جدی برای پایداری ایجاد می‌کنند (خان و حلیم^۴، ۲۰۲۱؛ الا و همکاران^۵، ۲۰۲۰).

پژوهش‌هایی مانند بایر و همکاران^۶ (۲۰۲۱) بر نقش صنعت ۴/۰ در دستیابی به اهداف توسعه پایدار، مولر و همکاران^۷ (۲۰۱۸) بر چالش‌های پایداری، و اولاه، عابورومان و پوپ (۲۰۲۰) بر تأثیرات زیست‌محیطی مانند زباله‌های الکترونیکی تمرکز کرده‌اند. اغلب مطالعات پیشین، مانند بونیلا و همکاران (۲۰۱۸) و الا و همکاران (۲۰۲۰)، به‌صورت جداگانه به ابعاد اقتصادی، اجتماعی یا زیست‌محیطی صنعت ۴/۰ پرداخته‌اند و کمتر چارچوبی یکپارچه برای هم‌راستایی آن با توسعه پایدار ارائه کرده‌اند. این شکاف، همراه با بررسی محدود نقش سیاست‌گذاری در مدیریت چالش‌هایی مانند نابرابری دیجیتال و زباله‌های الکترونیکی، سیاست‌گذاری مؤثر را دشوار ساخته است. در همین راستا، این پژوهش با هدف شناسایی الزامات سیاستی برای هم‌راستایی یکپارچه صنعت ۴/۰ با اهداف توسعه پایدار (SDGs) در سطح جهانی، به این سؤال‌ها پاسخ می‌دهد: (۱) چالش‌ها و فرصت‌های گذار به صنعت ۴/۰ از منظر توسعه پایدار کدامند؟ و (۲) الزامات سیاستی برای گذار به صنعت ۴/۰ در راستای توسعه پایدار کدامند؟. برای این منظور، با روش فراترکیب کیفی، داده‌های ۳۰ منبع شامل مقالات و اسناد منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ تحلیل مضمون شده‌اند تا چارچوبی مشتمل بر چالش‌ها، فرصت‌ها و الزامات سیاستی گذار به صنعت ۴/۰ با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به توسعه پایدار ارائه شود.

¹ Internet of Things

² Artificial intelligence

³ Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J.

⁴ Khan, S., Haleem, A., Khan, M. I.

⁵ Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J.

⁶ Grischa Beier, Silke Niehoff, Mandy Hoffmann

⁷ Müller, J. M., Kiel, D., Voigt

در بخش نخست مقاله، مبانی نظری و پیشینه پژوهش در حوزه صنعت ۴/۰ و توسعه پایدار بررسی می‌شوند. بخش دوم به روش‌شناسی فراترکیب و تحلیل داده‌ها اختصاص دارد. در بخش سوم، یافته‌ها مشتمل بر ملاحظات و الزامات سیاستی گذار به صنعت ۴/۰ در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ارائه شده و در نهایت، توصیه‌های سیاستی و مدیریتی برای سیاست‌گذاران و مدیران پیشنهاد می‌گردد. نتایج این پژوهش می‌تواند راهنمایی برای سیاست‌گذاری مؤثر در راستای گذار به صنعت ۴/۰ با در نظر داشتن ملاحظات توسعه پایدار باشد.

مبانی نظری

در این بخش، ابتدا به تشریح مبانی نظری مرتبط با صنعت ۴/۰ و توسعه پایدار پرداخته می‌شود. مفاهیم کلیدی شامل تعریف و ویژگی‌های صنعت ۴/۰، چارچوب توسعه پایدار و اهداف آن (SDGs)، و پیوند این دو مفهوم در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بررسی می‌گردد. سپس، ملاحظات سیاستی برای هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با توسعه پایدار ارائه شده و فرصت‌ها، چالش‌ها، و الزامات سیاستی در این زمینه تحلیل می‌شوند.

مفهوم و ویژگی‌های صنعت ۴/۰

صنعت ۴/۰ که در سال ۲۰۱۱ در آلمان به‌عنوان چهارمین انقلاب صنعتی معرفی شد، بر دیجیتالی‌سازی، خودکارسازی، و اتصال‌پذیری در فرآیندهای صنعتی تمرکز دارد (کاگرم‌ن و همکاران، ۲۰۱۳). این مفهوم با ویژگی‌هایی نظیر اتصال‌پذیری (از طریق اینترنت اشیا)، هوشمندی (با استفاده از هوش مصنوعی)، شفافیت اطلاعاتی (از طریق کلان داده‌ها)، و انعطاف‌پذیری (از طریق تولید هوشمند) شناخته می‌شود (لاسی و همکاران^۱، ۲۰۱۴). فناوری‌های کلیدی صنعت ۴/۰ شامل اینترنت اشیا^۲ (IoT)، هوش مصنوعی (AI)، کلان داده^۳، رباتیک پیشرفته، تولید افزودنی^۴ و سیستم‌های سایبر-فیزیکی است که امکان ایجاد سیستم‌های تولید کارآمد و متصل را فراهم می‌کنند (قباخلو، ۲۰۲۰). از منظر نظری، صنعت ۴/۰ بر پایه نظریه سیستم‌های سایبر-فیزیکی بنا شده است که تعامل بین دنیای فیزیکی و دیجیتال را از طریق حسگرها، شبکه‌ها، و الگوریتم‌ها تسهیل می‌کند. این نظریه بر افزایش بهره‌وری از طریق تعامل انسان، ماشین، و داده‌ها تأکید دارد، اما مدیریت پیچیدگی‌های ناشی از این اتصال‌پذیری را ضروری می‌داند. تعاریف مختلف صنعت ۴/۰ به شرح زیر ارائه شده‌اند: کاگرم‌ن و همکاران (۲۰۱۳) صنعت ۴/۰ را به‌عنوان چهارمین انقلاب صنعتی مبتنی بر دیجیتالی‌سازی و اتصال‌پذیری فرآیندهای صنعتی تعریف کرده‌اند. لاسی و همکاران (۲۰۱۴) آن را یکپارچگی زنجیره‌های ارزش از طریق فناوری‌های هوشمند با ویژگی‌های

¹ Lasi, H., Fettke, P., Kemper

² Internet of Things

³ Big Data

⁴ Additive Manufacturing

اتصال‌پذیری و انعطاف‌پذیری توصیف می‌کنند. همچنین، قباخلو (۲۰۲۰) صنعت ۴/۰ را پارادایمی از فناوری‌های پیشرفته برای تولید انعطاف‌پذیر، کارآمد، و داده‌محور می‌داند.

توسعه پایدار و ابعاد آن

توسعه پایدار، طبق تعریف گزارش برانتلند (۱۹۸۷)، به دنبال ایجاد تعادل بین رشد اقتصادی، عدالت اجتماعی، و حفاظت از محیط‌زیست است تا نیازهای نسل حاضر بدون به خطر انداختن منابع نسل‌های آینده تأمین شود. اهداف توسعه پایدار (SDGs)، که در سال ۲۰۱۵ توسط سازمان ملل متحد تدوین شدند، شامل ۱۷ هدف و ۱۶۹ زیرهدف هستند که در سه بعد اصلی اقتصادی (رشد فراگیر و صنعتی‌سازی)، اجتماعی (آموزش و برابری)، و زیست‌محیطی (اقدام اقلیمی و حفاظت از اکوسیستم‌ها) تعریف می‌شوند. این اهداف بر اساس نظریه‌های اقتصاد سبز و عدالت اجتماعی بنا شده‌اند و بر ایجاد تعادل بین رشد اقتصادی، برابری اجتماعی، و حفاظت از محیط‌زیست برای نسل‌های کنونی و آینده تمرکز دارند (روگریو^۱، ۲۰۲۱). به‌عنوان یک چارچوب جهانی، SDGs به کشورها و سازمان‌ها کمک می‌کند تا سیاست‌ها و برنامه‌های خود را در راستای توسعه پایدار هم‌راستا کرده و از طریق همکاری‌های بین‌المللی، چالش‌های جهانی مانند فقر، تغییرات اقلیمی، و نابرابری را مدیریت کنند.

صنعت ۴/۰ با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی و کلان‌داده‌ها، پتانسیل بالایی برای پیشبرد اهداف توسعه پایدار دارد، زیرا می‌تواند بهره‌وری را در فرآیندهای صنعتی بهبود بخشد، دسترسی به خدمات آموزشی و اجتماعی را از طریق پلتفرم‌های دیجیتال افزایش دهد، و با مدیریت بهینه منابع، اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهد (قباخلو، ۲۰۲۰). با این حال، تحقق این پتانسیل‌ها نیازمند سیاست‌گذاری‌های دقیق و منسجم است، زیرا فناوری‌های صنعت ۴/۰ چالش‌هایی مانند نابرابری دیجیتال، بیکاری ناشی از اتوماسیون، و افزایش زباله‌های الکترونیکی را نیز به همراه دارند که می‌توانند اهداف توسعه پایدار را تضعیف کنند. به همین دلیل، سیاست‌گذاران باید با طراحی چارچوب‌های یکپارچه، از یک سو از فرصت‌های این فناوری‌ها بهره‌برداری کنند و از سوی دیگر، با مدیریت چالش‌ها، از تأثیرات منفی آن‌ها بکاهند تا توسعه پایدار به صورت جامع و متوازن محقق شود. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که محرک‌های گذار به صنعت ۴/۰ می‌تواند در ابعاد مختلفی دسته‌بندی شود. برای مثال، در حوزه بهداشت و درمان، ۲۳ محرک در قالب ۶ دسته اصلی شناسایی شده است که شامل فشار رقابتی، فشار عمومی و تشدید بیماری می‌شود (مزروعی نصرآبادی و حبیبی راد^۲، ۲۰۲۳).

¹ Ruggerio

² Mazroui Nasrabadi, E., & Habibirad, A

صنعت ۴/۰ و توسعه پایدار

فناوری‌های صنعت ۴/۰، مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و کلان‌داده، از طریق دیجیتالی‌سازی و هوشمندسازی فرآیندها، قابلیت بالایی برای پیشبرد اهداف توسعه پایدار دارند، اما در عین حال چالش‌هایی را نیز به همراه می‌آورند (گریشا بایر، سیلک نیهوف، مندی هافمن، ۲۰۲۱). در ادامه، این پیوند در سه بعد توسعه پایدار بررسی می‌شود:

فناوری‌های صنعت ۴/۰ با بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌های تولید و ایجاد مدل‌های کسب‌وکار نوین، به رشد اقتصادی پایدار کمک می‌کنند. با این حال، در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، هزینه‌های بالای اولیه برای پیاده‌سازی این فناوری‌ها، وابستگی به شرکت‌های خارجی و تأثیر تحریم‌ها، موانع جدی ایجاد می‌کنند (طاهری، ۱۴۰۱). این چالش‌ها نیازمند سیاست‌گذاری‌های هدفمند برای حمایت از صنایع داخلی و کاهش وابستگی به فناوری‌های وارداتی است.

صنعت ۴/۰ از طریق پلتفرم‌های دیجیتال، دسترسی به آموزش و خدمات را بهبود می‌بخشد و فرصت‌هایی برای کاهش نابرابری‌ها فراهم می‌کند. فناوری‌هایی مانند آموزش آنلاین و واقعیت مجازی می‌توانند مهارت‌های دیجیتال را در مناطق محروم تقویت کنند (شارما و همکاران^۱، ۲۰۲۰). با این حال، اتوماسیون گسترده ممکن است به بیکاری در بخش‌های سنتی منجر شود که نیازمند برنامه‌های بازآموزی نیروی کار است. در ایران، نابرابری دیجیتال بین مناطق شهری و روستایی این چالش را تشدید می‌کند (حسین پور، ۱۴۰۳). فناوری‌های هوشمند صنعت ۴/۰، مانند سیستم‌های مدیریت انرژی مبتنی بر اینترنت اشیا، مصرف انرژی را بهینه کرده و انتشار کربن را کاهش می‌دهند (قباخلو، ۲۰۲۰). با این حال، افزایش استفاده از مراکز داده و تولید زباله‌های الکترونیکی، اثرات زیست‌محیطی منفی ایجاد می‌کند. گزارش آژانس بین‌المللی انرژی نشان می‌دهد که مراکز داده حدود یک درصد از مصرف جهانی برق را به خود اختصاص داده‌اند. در ایران، نبود زیرساخت‌های بازیافت زباله‌های الکترونیکی این چالش را جدی‌تر کرده است (طاهری، ۱۴۰۱). برای بهره‌برداری از فرصت‌های صنعت ۴/۰ و مدیریت چالش‌های آن، سیاست‌گذاری جامع و چندوجهی ضروری است (لاسی و همکاران، ۲۰۱۴). در ادامه، ملاحظات سیاستی در هر یک از ابعاد توسعه پایدار ارائه می‌شود:

در بعد اقتصادی، توسعه زیرساخت‌های دیجیتال از طریق سرمایه‌گذاری در شبکه‌های پرسرعت مانند فایو جی^۲ و مراکز داده برای پشتیبانی از فناوری‌های صنعت ۴/۰ اهمیت دارد، ضمن اینکه حمایت از شرکت‌های کوچک و

^۱ Sharma, Jabbour, and Jabbour

^۲ 5G

متوسط (SMEs) با ارائه مشوق‌های مالی نظیر وام‌های کم‌بهره و معافیت‌های مالیاتی می‌تواند پذیرش فناوری‌های جدید را تسهیل کند (طاهری، ۱۴۰۱)، و در عین حال تقویت امنیت سایبری از طریق تدوین چارچوب‌های نظارتی برای حفاظت از داده‌ها و زیرساخت‌های دیجیتال، به‌ویژه در شرایط تهدیدات سایبری، ضروری است (بونیا و همکاران، ۲۰۱۸).

در بعد اجتماعی، طراحی برنامه‌های آموزشی برای توسعه مهارت‌های دیجیتال نیروی کار، به‌ویژه در مناطق محروم، باید در اولویت قرار گیرد، و گسترش دسترسی به اینترنت و فناوری در مناطق روستایی می‌تواند شکاف دیجیتال را کاهش دهد (حسین‌پور، ۱۴۰۳). همچنین مدیریت اثرات اتوماسیون از طریق سیاست‌های حمایتی مانند بیمه بیکاری و برنامه‌های بازآموزی برای کارگران متأثر از این تغییرات ضروری است (شارما و همکاران، ۲۰۲۰).

در بعد زیست‌محیطی، تدوین استانداردهای سبز برای مدیریت زباله‌های الکترونیکی و کاهش اثرات زیست‌محیطی فناوری‌های صنعت ۴/۰ پیشنهاد می‌شود و تشویق به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیندهای صنعتی می‌تواند پایداری زیست‌محیطی را تقویت کند. ضمن اینکه بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند برای مدیریت بهینه آب، انرژی و مواد خام نیز به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند (قباخلو، ۲۰۲۰).

پیشینه تحقیق

پژوهش‌های متعددی به بررسی ارتباط بین صنعت ۴/۰ و توسعه پایدار پرداخته‌اند و ابعاد اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی این ارتباط را تحلیل کرده‌اند. در بعد اقتصادی، بونیا و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که فناوری‌های صنعت ۴/۰ می‌توانند بهره‌وری تولید را بهبود بخشند و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهند، که این امر با هدف ۸ توسعه پایدار (کار شایسته و رشد اقتصادی) هم‌خوانی دارد. به‌طور مشابه، قباخلو، (۲۰۲۰) با بررسی نقش این فناوری‌ها در زنجیره تأمین، استدلال کرد که دیجیتالی‌سازی می‌تواند کارایی لجستیک را افزایش دهد و مدل‌های کسب‌وکار نوین، مانند اقتصاد اشتراکی دیجیتال، را ترویج کند. با این حال، مولر و همکاران (۲۰۱۸) به چالش‌های اقتصادی، از جمله هزینه‌های بالای اولیه برای پذیرش فناوری‌ها و تهدیدات سایبری، اشاره کردند و تأکید داشتند که این موانع نیازمند سیاست‌گذاری‌های هدفمند در سطح جهانی هستند. اسدی (۲۰۱۹) نیز در پژوهشی با تمرکز بر اقتصاد دیجیتال، بیان کرد که صنعت ۴/۰ می‌تواند با کاهش هزینه‌های تولید و مبادله، رفاه اقتصادی را افزایش دهد و رشد اقتصادی پایدار را از طریق تغییر ساختاری محیط کسب‌وکار تسریع کند. در صنایع تولیدی ایران مانند قطعه‌سازی خودرو، الگوی پذیرش فناوری‌های صنعت ۴/۰ با استفاده از روش‌های آمیخته اکتشافی شناسایی

شده که عوامل سازمانی، صنعتی، ملی و بین‌المللی را شامل می‌شود و می‌تواند در سیاست‌گذاری پایدار راهنما باشد (رشمی و همکاران^۱، ۲۰۲۳)

در بعد اجتماعی، شارما و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که فناوری‌های صنعت ۴/۰، مانند سکوه‌های آموزشی برخط، می‌توانند دسترسی به آموزش باکیفیت را بهبود بخشند (هدف ۴: آموزش باکیفیت)، به‌ویژه در مناطق محروم مانند آفریقای زیرصحرا و جنوب آسیا. با این حال، خان و حلیم (۲۰۲۱) به نابرابری دیجیتال به‌عنوان یک مانع کلیدی اشاره کردند و استدلال کردند که عدم دسترسی به زیرساخت‌های فناوری، شکاف‌های اجتماعی را در سطح جهانی تشدید می‌کند. عمار و همکاران^۲ (۲۰۲۴) نیز با تمرکز بر نقش هوش مصنوعی در آموزش، نشان دادند که ابزارهایی مانند چت جی پی تی^۳ می‌توانند یادگیری شخصی‌سازی شده را تقویت کنند، اما چالش‌های اخلاقی و نیاز به بازطراحی برنامه‌های درسی را نیز به همراه دارند. همچنین، قباخلو (۲۰۲۰) به بیکاری ناشی از اتوماسیون اشاره کرد و هشدار داد که این پدیده می‌تواند نابرابری‌های اجتماعی را در کشورهای با نیروی کار کم‌مهارت افزایش دهد.

در بعد زیست‌محیطی، مطالعات متعددی پتانسیل صنعت ۴/۰ را برای پایداری تأیید کرده‌اند و قباخلو (۲۰۲۰) نشان داد که فناوری‌های هوشمند، مانند سیستم‌های مدیریت انرژی مبتنی بر اینترنت اشیا، می‌توانند مصرف انرژی را بهینه کرده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهند، که با هدف ۱۳ توسعه پایدار (اقدام اقلیمی) همخوانی دارد. با این حال، الا و همکاران (۲۰۲۰) به افزایش زباله‌های الکترونیکی ناشی از گسترش فناوری‌های دیجیتال اشاره کردند و تأکید داشتند که این چالش اثرات زیست‌محیطی منفی قابل توجهی دارد. جموال، اگرآوال و شارما^۴ (۲۰۲۱) نیز مصرف بالای انرژی در مراکز داده را به‌عنوان مانعی برای پایداری زیست‌محیطی شناسایی کردند و پیشنهاد کردند که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند این مشکل را کاهش دهد. ابرار و راویندرا^۵ (۲۰۲۴) با تمرکز بر امارات متحده عربی، نشان دادند که فناوری‌های صنعت ۴/۰ می‌توانند به پایداری زیست‌محیطی کمک کنند، به‌ویژه در زمینه‌هایی مانند امنیت غذایی (هدف ۱۴: زندگی زیر آب).

پژوهش‌های دیگری به جنبه‌های خاص‌تر این ارتباط پرداخته‌اند. برای مثال، آلپانا و راویندرا^۶ (۲۰۲۴) با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی^۷، نشان دادند که دیجیتالی‌سازی فرآیندها، تولید مواد افزودنی، و تجزیه و تحلیل

¹ Rashmei, M. H., Hosseini Shakib, M., & Khamseh, A

² Ammar, A., Zaidan, E., Abulibdeh, R

³ ChatGPT

⁴ Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M

⁵ Abrar, M., Ravindra, P.

⁶ Alpana & Ravindra

⁷ Analytical Hierarchy Process

کلان‌داده از مهم‌ترین عوامل صنعت ۴/۰ برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار در عملیات تولیدی هستند. حوزه دیاز و همکاران^۱ (۲۰۲۳) نیز با تحلیل کتاب‌سنجی، نقش شرکت‌های چندملیتی در هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با توسعه پایدار را بررسی کردند و نشان دادند که مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی کمتر در ادبیات مربوط به این شرکت‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین، حوزه دیاز و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مرور سیستماتیک، بیان کردند که نوآوری‌های صنعت ۴/۰، مانند نوآوری در فرآیند، محصول، و مدل کسب‌وکار می‌توانند پایداری سه‌گانه (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) و اقتصاد دایره‌ای را تقویت کنند، اما نوآوری‌های سازمانی و باز کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

یکی از ابعاد مهم در سیاست‌ها و حمایت‌های دولت‌ها از گذار به صنعت نسل ۴/۰، تقویت پلتفرم‌های هم‌آفرینی و انتقال دانش میان بنگاه‌ها و سایر بازیگران اکوسیستم‌های نوآوری است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ایجاد پلتفرم‌های دانشی و شبکه‌های همکاری، به‌ویژه برای بنگاه‌های کوچک و متوسط، می‌تواند هزینه‌های ورود به فناوری‌های صنعت ۴/۰ را کاهش داده و فرآیند یادگیری و نوآوری را تسریع کند. به عنوان مثال، پلتفرم‌های «Digital Innovation Hubs» و «Industry 4.0 HUB» با ایجاد شبکه‌های تبادل تجربه، ارائه نمونه‌های موفق و فراهم‌کردن دسترسی به منابع فنی و آموزشی، به SMEs کمک می‌کنند تا بدون آغاز از نقطه صفر و با کاهش خطاهای اولیه، مسیر تحول دیجیتال را طی کنند. این پلتفرم‌ها نه تنها نقش زیرساخت دانشی ایفا می‌کنند، بلکه با تسهیل ارتباطات بین بنگاهی، زمینه شکل‌گیری اکوسیستم‌های نوآوری را نیز فراهم می‌سازند (کوترینو و همکاران^۲، ۲۰۲۱؛ زی و همکاران^۳، ۲۰۲۲).

در زمینه تجربه‌های جهانی، مطالعات نشان داده‌اند که کشورهای پیشرو مانند آلمان، ایالات متحده، چین، و جمهوری چک استراتژی‌های ملی مشخصی برای اجرای صنعت ۴/۰ تدوین کرده‌اند (اربیکس و بونیلا^۴، ۲۰۱۸). برای مثال، آلمان با «برنامه اقدام استراتژیک فناوری‌های پیشرفته ۲۰۲۰» بر مدرن‌سازی تولید تمرکز کرده است، در حالی که چین با استراتژی «ساخت چین^۵» به دنبال دیجیتالی‌سازی تولید و پیشرو شدن در زنجیره تولید جهانی است. این تجربه‌ها نشان می‌دهند که موفقیت در اجرای صنعت ۴/۰ نیازمند هماهنگی بین دولت، صنعت، و نهادهای تحقیقاتی است. جدول (۱) خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه لزوم هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با توسعه پایدار را ارائه می‌دهد.

^۱ José Dias, R., Lopes, D., Martins, F

^۲ Cotrino, A., Sebastián, M. A., & González-Gaya, C

^۳ Xie, Q., Pan, D., & Huang, L.

^۴ Arbix, G., & Bonilla, S. H.

^۵ Made in China 2025

جدول ۱: مرور برخی مطالعات در زمینه لزوم هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با توسعه پایدار

منبع	تمرکز اصلی	یافته‌ها	ابعاد مورد بررسی
بونبلا و همکاران ^۱ (۲۰۱۸)	بهره‌وری تولید و کاهش هزینه‌ها	فناوری‌های صنعت ۴/۰ بهره‌وری را بهبود می‌بخشند و هزینه‌ها را کاهش می‌دهند.	اقتصادی
قباخلو (۲۰۲۰)	کارایی زنجیره تأمین و پایداری	دیجیتالی‌سازی کارایی لجستیک را افزایش می‌دهد و مصرف انرژی را بهینه می‌کند.	اقتصادی، زیست‌محیطی
شارما و جابور (۲۰۲۰)	آموزش و کاهش نابرابری‌ها	پلتفرم‌های دیجیتال دسترسی به آموزش را بهبود می‌بخشند.	اجتماعی
خان و حلیم (۲۰۲۱)	نابرابری دیجیتال	عدم دسترسی به زیرساخت‌های فناوری شکاف‌های اجتماعی را تشدید می‌کند.	اجتماعی
الا و همکاران (۲۰۲۰)	زباله‌های الکترونیکی	گسترش فناوری‌های دیجیتال زباله‌های الکترونیکی را افزایش می‌دهد.	زیست‌محیطی
ابرار و راویندرا (۲۰۲۴)	پایداری در امارات متحده عربی	فناوری‌های صنعت ۴/۰ به امنیت غذایی و پایداری زیست‌محیطی کمک می‌کنند.	زیست‌محیطی
آلپانا و راویندرا (۲۰۲۴)	اولویت‌بندی پیامدهای صنعت ۴/۰ بر SDGs	دیجیتالی‌سازی و داده‌های بزرگ عوامل کلیدی برای پایداری در تولید هستند.	اقتصادی، زیست‌محیطی
جوزه دیاز و همکاران (۲۰۲۳)	نقش شرکت‌های چندملیتی در توسعه پایدار	مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی در شرکت‌های چندملیتی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.	اجتماعی، زیست‌محیطی

همان‌گونه که مطالعه قباخلو (۲۰۲۰) نشان می‌دهد، صنعت ۴/۰ در پیوند میان کارایی تولید و شاخص‌های پایداری نقش بنیادین دارد؛ اما برای پرهیز از یک‌جانبه‌نگری، یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات بونبلا و همکاران (۲۰۲۰)، شارما و جابور (۲۰۲۰) و خان و حلیم (۲۰۲۱) نیز تطبیق داده شد تا پوشش مفهومی گسترده‌تری حاصل شود. با وجود پژوهش‌های متعدد، مانند بونبلا و همکاران (۲۰۱۸) و خان و حلیم (۲۰۲۱)، شکاف‌های پژوهشی شامل این موارد است: (۱) فقدان رویکرد یکپارچه برای تحلیل ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی صنعت ۴/۰؛ (۲) بررسی ناکافی نقش سیاست‌گذاری در مدیریت چالش‌هایی مانند نابرابری دیجیتال و زباله‌های الکترونیکی؛ و (۳) تمرکز محدود بر تأثیر فناوری‌های خاص مانند هوش مصنوعی و بلاکچین بر توسعه پایدار. در همین راستا، این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف‌ها، به بررسی الزامات سیاستی برای هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با اهداف توسعه پایدار در ابعاد مختلف با روش فراترکیب می‌پردازد.

^۱ S. Bonilla, H. Silva, Marcia Terra da Silva

روش پژوهش

رویکرد و استراتژی پژوهش

این پژوهش از نظر ماهیت نوع کیفی است و با استفاده از روش فراترکیب^۱ انجام شده است. فراترکیب، رویکردی پیشرفته در تحقیقات کیفی است که با هدف یکپارچه‌سازی و تحلیل عمیق یافته‌های مطالعات پیشین طراحی شده و امکان استخراج مفاهیم و چارچوب‌های جدید را فراهم می‌کند (ساندلوسکی و باروسو^۲، ۲۰۰۷). این روش برای موضوعات پیچیده و چندوجهی، مانند سیاست‌گذاری در حوزه صنعت ۴/۰ و هم‌راستایی آن با اهداف توسعه پایدار، مناسب است، زیرا می‌تواند الگوهای مشترک، فرصت‌ها، چالش‌ها و الزامات سیاستی را از طریق ترکیب نتایج مطالعات مختلف شناسایی کند (زیممر^۳، ۲۰۰۶). رویکردهای ترکیبی مانند فراترکیب در شناسایی چالش‌های فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی در زنجیره تامین ۴/۰ مفید هستند، جایی که چالش‌هایی مانند پیچیدگی نظارتی و هزینه‌های زیرساختی اولویت‌بندی می‌شوند (محمدی و همکاران^۴، ۲۰۲۴).

انتخاب روش فراترکیب در این پژوهش به دلایل متعددی صورت گرفت: نخست، این روش با مرور جامع ادبیات موجود، دیدگاهی کل‌نگر نسبت به موضوع ارائه می‌دهد و از پراکندگی اطلاعات جلوگیری می‌کند. دوم، با توجه به ماهیت چندبعدی موضوع (ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی توسعه پایدار)، فراترکیب امکان تلفیق داده‌های کیفی از منابع مختلف را فراهم می‌سازد. سوم، این روش به‌عنوان ابزاری برای تولید دانش جدید و ارائه چارچوب‌های سیاستی کاربردی شناخته می‌شود که می‌تواند به سیاست‌گذاران در طراحی راهبردهای مؤثر کمک کند. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی ملاحظات و الزامات سیاست‌گذاری برای بهره‌برداری از صنعت ۴/۰ در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار است. در شکل (۱)، مراحل فراترکیب ارائه شده است.

¹ Metasynthesis

² Sandelowski & Barroso

³ Zimmer

⁴ Mohammadi, M., Heidary Dahooie, J., & Ahmadi, A.



شکل ۱: مراحل تحلیل فرا ترکیب (ساندلوفسکی^۱، ۲۰۰۷)

روش گردآوری داده ها

جامعه آماری این پژوهش شامل کلیه مقالات علمی، گزارش های معتبر، و اسناد منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ است که به موضوعات مرتبط با صنعت ۴/۰، توسعه پایدار، و سیاست گذاری فناوری پرداخته اند؛ این بازه زمانی از آن رو انتخاب شد که مفهوم صنعت ۴/۰ از سال ۲۰۱۱ مطرح شده، از اواسط دهه ۲۰۱۰ مطالعات گسترده ای در این حوزه منتشر شده اند، و انتخاب سال ۲۰۲۴ امکان بهره مندی از جدیدترین یافته ها را فراهم کرد. برای انتخاب نمونه ها، از روش نمونه گیری هدفمند استفاده شد و معیارهای ورود و خروج به گونه ای تعریف شدند که مقالات و اسناد مرتبط به طور دقیق شناسایی شوند؛ معیارهای ورود شامل مقالاتی بود که مستقیماً تأثیرات صنعت ۴/۰ بر توسعه پایدار یا سیاست گذاری در حوزه فناوری های نوین مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، و کلان داده را بررسی کرده اند، گزارش هایی که چالش ها و فرصت های صنعت ۴/۰ در زمینه پایداری را تحلیل کرده اند، و اسنادی که به زبان فارسی یا انگلیسی منتشر شده اند، در حالی که معیارهای خروج مقالاتی را که صرفاً به جنبه های فنی صنعت ۴/۰ مانند طراحی سیستم ها یا الگوریتم ها پرداخته و به توسعه پایدار اشاره ای نداشته اند، فاقد روش شناسی مشخص یا داده های معتبر بوده اند، به زبان هایی غیر از فارسی و انگلیسی منتشر شده اند، یا پیش از سال ۲۰۱۵ منتشر شده و محتوای آن ها به روز نبوده است، از دایره انتخاب خارج کرد.

¹ Sandolowski

منابع از پایگاه‌های علمی معتبر بین‌المللی مانند اسکوپوس^۱، وب آو ساینس^۲، پابمد^۳ و گوگل اسکولار^۴ و پایگاه‌های داخلی نظیر مگ ایران^۵، سیدو^۶ و نورمگز^۷ گردآوری شدند. کلیدواژه‌های جست‌وجو به زبان انگلیسی شامل این موارد بودند: کلیدواژه‌های انگلیسی "Industry 4.0"، "Sustainable Development"، "Policy-Making"، "Fourth Industrial Revolution"، "Digital Transformation"، "Sustainability"؛ کلیدواژه‌های فارسی نیز شامل: «صنعت ۴/۰»، «توسعه پایدار»، «سیاست‌گذاری فناوری»، «انقلاب صنعتی چهارم»، «تحول دیجیتال»، و «پایداری» بوده است.

جمع‌آوری داده‌ها با رویکرد مرور سیستماتیک و به‌صورت ساختارمند انجام شد و روند پالایش و انتخاب منابع اصلی در شکل (۲) نشان داده شده است. ابزار اصلی پژوهش، فرم‌های استخراج داده بود که به‌طور اختصاصی طراحی شد و شامل بخش‌هایی برای ثبت اطلاعات کتاب‌شناختی (عنوان، نویسندگان و سال انتشار)، روش‌شناسی، یافته‌های کلیدی و مفاهیم مرتبط با صنعت ۴/۰ و توسعه پایدار بود. فرایند گردآوری داده‌ها در چهار مرحله انجام شد: نخست، جست‌وجوی اولیه با کلیدواژه‌های از پیش تعیین‌شده در پایگاه‌های علمی صورت گرفت و برای جامعیت، این جست‌وجو در چند مرحله با ترکیب‌های مختلف کلیدواژه‌ها تکرار گردید. دوم، در غربالگری اولیه، عناوین و چکیده‌ها بررسی شدند و منابع نامرتبط (مانند مقالات صرفاً فنی) حذف گردیدند. سوم، در غربالگری دقیق، متن کامل اسناد با استفاده از معیارهای ورود و خروج مطالعه شد و در این مرحله کیفیت روش‌شناسی منابع نیز ارزیابی شد. چهارم، در مرحله استخراج داده‌ها، یافته‌های مرتبط با فرصت‌ها، چالش‌ها و الزامات سیاستی از اسناد نهایی استخراج و در فرم‌ها ثبت گردید؛ این فرایند توسط دو پژوهشگر به‌صورت مستقل انجام شد تا پایایی نتایج افزایش یابد.

پس از استخراج داده‌ها، مسیر تحلیل به‌صورت نظام‌مند و مرحله‌ای پیش رفت. در گام نخست، داده‌های متنی به گدهای مفهومی اولیه تبدیل شدند. در گام دوم، گدهای مشابه یا هم‌پوشان با هم ترکیب و در قالب مقوله‌های سازمان‌دهنده بازنمایی شدند. در گام سوم، مقوله‌ها در مضامین فراگیر جای گرفتند و در خوشه‌های اصلی «فرصت‌ها» و «چالش‌ها/الزامات سیاستی» دسته‌بندی شدند. در گام چهارم، بر اساس الگوهای تکرارشونده میان مقوله‌ها، فرضیات یا گزاره‌های تحلیلی استخراج گردید. نهایتاً، این فرضیات با ردیابی شواهد از منابع مختلف،

¹ Scopus

² Web of Science

³ PubMed

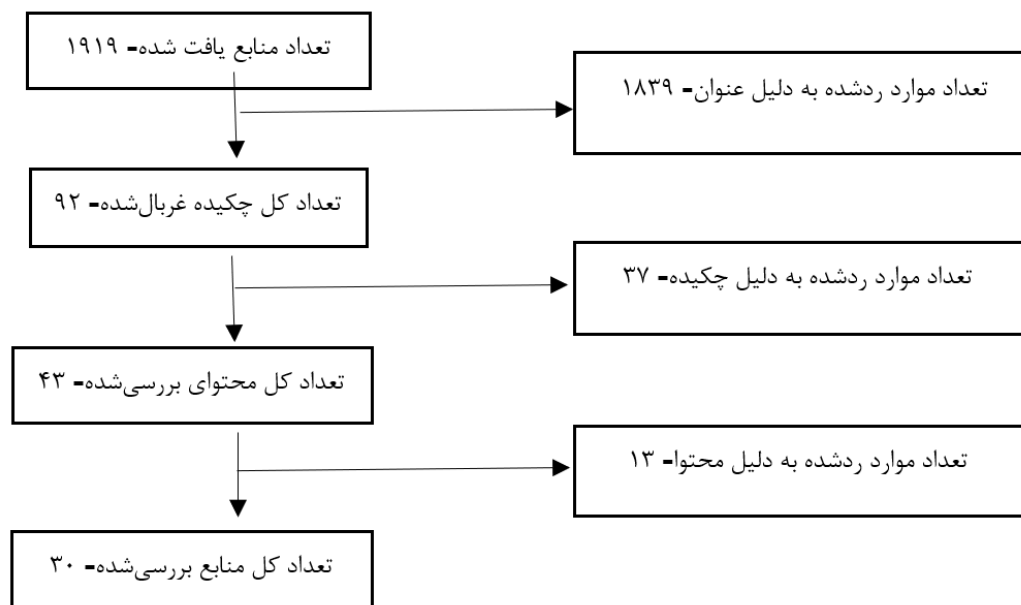
⁴ Google Scholar

⁵ Magiran

⁶ SID

⁷ Noormags

شمارش بسامد و پوشش، ارزیابی کیفیت اسناد و تحلیل موارد ناسازگار مورد تأیید یا تعدیل قرار گرفتند. بدین ترتیب، پیوند شفاف میان داده‌های خام، گدها، مقوله‌ها، فرصت‌ها و فرضیات برقرار شد و قابلیت اطمینان و ممیزی فرایند تحلیل تضمین گردید. در مرحله نخست غربال‌گری، ۹۲ سند (مقالات، گزارش‌های سیاستی و اسناد صنعتی) مورد بررسی اولیه قرار گرفتند. پس از اعمال معیارهای ورود شامل اعتبار علمی، سال انتشار، ارتباط مفهومی و تکرار نداشتن یافته‌ها، در نهایت ۳۰ منبع واجد شرایط برای تحلیل عمیق انتخاب شدند. فهرست این ۳۰ منبع در پیوست ۱ آورده شده است.



شکل ۲: روند پالایش و انتخاب منابع اصلی

روش تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها با روش فراترکیب و بر اساس مدل هفت مرحله‌ای ساندلوسکی و باروسو (۲۰۰۷) انجام شد که یکی از معتبرترین رویکردهای فراترکیب است. مراحل بدین شرح انجام گرفت: نخست، سؤالات پژوهش با تمرکز بر «ملاحظات سیاست‌گذاری برای هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با توسعه پایدار» و «فرصت‌ها و چالش‌های صنعت ۴/۰ در ابعاد توسعه پایدار» تدوین گردید. سپس جست‌وجوی نظام مند ادبیات به صورت توضیح داده‌شده اجرا شد و اسناد به لحاظ کیفیت و ارتباط ارزیابی شدند. در گام بعد، مضامین پایه استخراج شد که مفاهیمی مانند «افزایش بهره‌وری»، «نابرابری دیجیتال» و «زباله‌های الکترونیکی» را دربر می‌گرفت (در مجموع ۴۱۲ مضمون پایه). این مضامین پایه در ادامه در قالب ۳۸ مضمون سازمان‌یافته دسته‌بندی شدند که شامل مضامین اقتصادی مانند

«افزایش بهره‌وری» و «کاهش هزینه‌ها» و مضامین اجتماعی مانند «نابرابری دیجیتال» و «بیکاری» بود. در نهایت، مضامین در چهار دسته «فرصت‌ها»، «چالش‌ها»، «الزامات سیاستی» و «روش‌های اجرا» طبقه‌بندی شدند. برای تکمیل زنجیره تحلیل، پس از این مرحله داده‌ها وارد فرآیند استنتاج تحلیلی شدند: مضامین استخراج‌شده ابتدا به مقوله‌های مفهومی تجمیع شدند و سپس خوشه‌هایی از «فرصت‌ها»، «چالش‌ها» و «الزامات سیاستی» شکل گرفت. از روی الگوهای تکرارشونده میان این مقوله‌ها، گزاره‌های تحلیلی و فرضیات پژوهش تدوین گردید. این فرضیات از طریق ردیابی شواهد به منابع مادر، شمارش بسامد و پوشش، و ارزیابی کیفیت مقالات، تأیید یا تعدیل شدند. بدین‌ترتیب، مسیر تحلیل از داده‌های خام تا سطح مفهومی و نظری به‌صورت شفاف و نظام‌مند طی شد و اعتبار و قابلیت ممیزی فرایند تضمین گردید.

کنترل کیفیت نتایج

به‌منظور کنترل کیفیت نتایج و یافته‌ها، تعداد ۴۱۲ مضمون استخراج‌شده در اختیار دو کدگذار مستقل قرار گرفت تا مورد ارزیابی قرار گیرند. از این تعداد، در ۳۸۰ مورد توافق و در ۳۲ مورد اختلاف بین دو کدگذار مشاهده شد. با محاسبه ضریب کاپای کوهن، مقدار ۰/۸۲۱ به‌دست آمد که نشان‌دهنده توافق عالی میان دو کدگذار است و پایایی فرایند تحلیل را تأیید می‌کند؛ جزئیات آن در جدول ۲ قابل مشاهده است. علاوه بر این، برای بررسی روایی پژوهش در تمامی مراحل تلاش شد تا بیشترین تعداد منابع معتبر بر اساس معیارهای ورود و خروج شناسایی و گردآوری شود. در این فرایند دقت شد منابع از میزان ارجاعات قابل قبولی برخوردار بوده و در نشریات معتبر منتشر شده باشند؛ همچنین نتایج به تأیید دو داور متخصص نیز رسید.

جدول ۲: ضریب کاپای کوهن

Approx. Sig	Asymp. Std. Error	value	
۰/۰۰۰	۰/۰۵۲	۰/۸۲۱	میزان توافق دو کدگذار
		۴۱۲	تعداد موارد معتبر

یافته‌ها

گذار به صنعت ۴/۰ : فرصت‌ها و چالش‌ها

یافته‌های این پژوهش از طریق تحلیل فراترکیبی ۳۰ سند منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ استخراج شدند. در مجموع، ۴۱۲ مضمون پایه شناسایی شد که پس از دسته‌بندی، در ۳۸ مضمون سازمان‌یافته و در نهایت

در چهار مضمون فراگیر شامل «فرصت‌ها»، «چالش‌ها» و «الزامات سیاستی» طبقه‌بندی شدند. این یافته‌ها در سه بعد توسعه پایدار (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) سازمان‌دهی شده‌اند. هر بعد به صورت جداگانه تحلیل شده و در نهایت، چارچوبی جامع برای سیاست‌گذاری صنعت ۴/۰ در راستای توسعه پایدار ارائه شده است. یافته‌های پژوهش پس از تحلیل نهایی، در قالب سه مضمون فراگیر شامل (۱) ملاحظات/ الزامات سیاستی اقتصادی، (۲) ملاحظات/ الزامات سیاستی اجتماعی، (۳) ملاحظات/ الزامات سیاستی زیست‌محیطی ارائه گردیده است. جدول‌های (۳) و (۴)، به ترتیب ملاحظات و الزامات سیاستی مرتبط با گذار به صنعت ۴/۰ از منظر توسعه پایدار را در ابعاد مختلف نشان می‌دهند.

جدول ۳: شکل‌گیری مضامین (ملاحظات گذار به صنعت ۴/۰ از منظر توسعه پایدار در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی)

مضامین فراگیر	مضامین سازمان‌دهنده	مضامین پایه	منابع	کدها
ملاحظات اقتصادی صنعت ۴/۰	هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه	هزینه بالای تجهیزات پیشرفته	بیر و همکاران (۲۰۲۱)، ماچادو و دیویم ^۱ (۲۰۲۰)، کیل و همکاران ^۲ (۲۰۱۷)، قباخلو (۲۰۲۰)، بونیلا و همکاران (۲۰۱۸)	- نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا برای خرید تجهیزات - فشار مالی بر شرکت‌های کوچک و متوسط برای تأمین هزینه‌های تجهیزات - محدودیت در به‌روزرسانی فناوری‌های موجود به دلیل هزینه‌های سنگین
		هزینه توسعه زیرساخت‌های ارتباطی	بونیلا و همکاران (۲۰۱۸)، شارما و همکاران (۲۰۲۰)، کیم (۲۰۱۷)، کیل و همکاران (۲۰۱۷)، حسین (۲۰۱۷)	- نیاز به سرمایه‌گذاری بلندمدت برای بهبود زیرساخت‌ها - چالش‌های مالی دولت‌ها در تأمین هزینه‌های توسعه زیرساخت‌های دیجیتال - نبود هماهنگی و استانداردهای مشترک برای توسعه زیرساخت‌ها

¹ C. Machado, J. Davim

² Daniel Kiel, J. Müller, Christian Arnold

مضامین فراگیر	مضامین سازمان‌دهنده	مضامین پایه	منابع	کدها
چالش امنیت سایبری و حریم خصوصی داده‌ها		کمبود منابع مالی برای شرکت‌های کوچک و متوسط	کیل و همکاران (۲۰۱۷)، کیم (۲۰۱۷)، بیر و همکاران (۲۰۲۱)، حسین (۲۰۱۷)، ماچادو و دیویم (۲۰۲۰)، شارما و جابور (۲۰۲۰)	• دشواری در جذب سرمایه و تأمین منابع مالی برای نوآوری • محدودیت‌های مالی در دستیابی به فناوری‌های نوین برای رقابت در بازار • مشکلات در تأمین هزینه‌های تحقیق و توسعه برای شرکت‌های کوچک
		تهدیدات حملات سایبری	کومار و پاتل ^۱ (۲۰۲۰)، اسمیث، اس و کاستانگی ^۲ (۲۰۱۹)، زو و همکاران ^۳ (۲۰۱۸)، علی و حسین (۲۰۲۰)، ونگ و همکاران ^۴ (۲۰۲۱)، ژانگ و همکاران ^۵ (۲۰۲۲)	• افزایش خطرات امنیتی با گسترش اینترنت اشیاء • آسیب‌پذیری بیشتر سیستم‌های صنعتی در برابر حملات سایبری • لزوم ارتقاء زیرساخت‌های امنیتی برای مقابله با تهدیدات جدید
		عدم وجود استانداردهای بین‌المللی امنیتی	علی و حسین (۲۰۲۰)، کومار و پاتل (۲۰۲۰)، ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)، اسمیث، اس و کاستانگی (۲۰۱۹)	• چالش در تدوین قوانین یکپارچه برای امنیت سایبری در سطح جهانی • مشکلات در همکاری بین‌المللی برای تأمین امنیت شبکه‌های جهانی • عدم تطابق استانداردها در کشورهای مختلف و تأثیر آن بر امنیت داده‌ها
		نگرانی از حریم خصوصی مشتریان	ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)، مولر و همکاران (۲۰۱۸)، چن و همکاران ^۶ (۲۰۱۹)	• جمع‌آوری و ذخیره‌سازی داده‌های حساس بدون رضایت کامل • افزایش احتمال سوءاستفاده از داده‌های شخصی به دلیل ضعف در سیاست‌های امنیتی • فشار برای رعایت مقررات عمومی حفاظت از داده‌ها در سطح جهانی

¹ Kumar & Patel² Smith, S. S., & Castonguay, J.³ Zhou, L., Wu, Z., Ouyang, X⁴ Wang, X., Xu, J., Gu, Y⁵ Gang, Q., Muhammad, A., Khan, Z. U., Khan, M. S., Ahmed, F., & Ahmad, J.⁶ Hang Chen, Sulaiman Khan, Bo Kou

مضامین فراگیر	مضامین سازمان دهنده	مضامین پایه	منابع	کدها
ملاحظات اجتماعی صنعت ۴/۰	بیکاری ناشی از اتوماسیون	کاهش نیاز به نیروی کار در صنایع تولیدی	شیلدز و براون ^۱ (۲۰۲۱)، مارتین و جونز (۲۰۲۳)، چائومین لی ^۲ (۲۰۱۸)، کیم و لی (۲۰۱۷)	- کاهش اشتغال در حوزه های تولیدی به دلیل اتوماسیون - افزایش بهره وری از طریق جایگزینی انسان با ربات ها - کاهش نیاز به نیروی کار غیرماهر در فرآیندهای تولیدی
		جایگزینی مشاغل سنتی با فناوری های خودکار	کیم و لی (۲۰۱۷)، مارتین و جونز (۲۰۲۳)، شیلدز و براون (۲۰۲۱) مولر و همکاران (۲۰۱۸)، چن و همکاران (۲۰۱۹)، چائومین لی (۲۰۱۸)	- از بین رفتن مشاغل سنتی در صنایع به دلیل استفاده از ربات ها و ماشین های هوشمند - پیدایش مشاغل جدید در زمینه های فناوری اطلاعات و تحلیل داده - نیاز به بازآموزی نیروی کار برای مقابله با از بین رفتن مشاغل سنتی
		افزایش فشار بر بازار کار محلی	مارتین و جونز (۲۰۲۳)، مولر و همکاران (۲۰۱۸)، کیم و لی (۲۰۱۷)، چائومین لی (۲۰۱۸)، شیلدز و براون (۲۰۲۱)	- عدم تطابق مهارت های نیروی کار محلی با نیازهای جدید صنعت ۴/۰ - افزایش رقابت در بازار کار به دلیل عدم آماده سازی برای پذیرش فناوری های نوین - فشار بر آموزش و پرورش برای تغییرات سریع در نیازهای مهارتی
	نابرابری دیجیتال و دسترسی نابرابر به فناوری	عدم دسترسی مناطق محروم به اینترنت پرسرعت	حسن (۲۰۲۱)، فان و همکاران ^۳ (۲۰۲۰)	- محدودیت در دسترسی به فرصت های آموزشی برخط - عدم توانایی در مشارکت فعال در اقتصاد دیجیتال - ایجاد شکاف های اطلاعاتی بین مناطق محروم و دیگر بخش ها
		شکاف دیجیتال میان کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه	حسن (۲۰۲۱)، فان و همکاران (۲۰۲۰)	- تأثیر منفی بر رقابت پذیری کشورهای در حال توسعه - محدودیت در دسترسی به فناوری های نوین در کشورهای کمتر توسعه یافته

^۱ Shields, J., & Brown, M.

^۲ Kim, T., & Lee, S.

^۳ Phan, T. T. H., Tran, H. X., Le, T. T.

مضامین فراگیر	مضامین سازمان‌دهنده	مضامین پایه	منابع	کدها
ملاحظات زیست‌محیطی صنعت ۴/۰				ایجاد نابرابری در فرصت‌های شغلی و اقتصادی در سطح جهانی
		نبود زیرساخت‌های فناوری در مناطق روستایی	حسن (۲۰۲۱)، فان و همکاران (۲۰۲۰)	- محدودیت دسترسی به اینترنت و فناوری‌های جدید در مناطق دورافتاده - کمبود آموزش‌های فناورانه برای جوامع روستایی - افزایش شکاف اجتماعی و اقتصادی در مناطق روستایی
	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	استفاده از فناوری‌های کاهنده انتشار کربن	کیم و لی (۲۰۱۷)، ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)، ونگ و همکاران (۲۰۲۱)، شیلدز و براون (۲۰۲۱)	- بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع - کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید محصولات صنعتی - ارتقاء بهره‌وری انرژی با استفاده از فناوری‌های نوین
		بهبود عملکرد فرآیندهای تولیدی برای کاهش آلاینده‌ها	چن و همکاران (۲۰۱۹)، شیلدز و براون (۲۰۲۱)، ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)، کیم و لی (۲۰۱۷)	- استفاده از تکنولوژی‌های سبز برای تصفیه و مدیریت آلاینده‌ها - کاهش مصرف منابع اولیه و بهبود چرخه تولید - استفاده از داده‌های کلان برای بهینه‌سازی فرآیندها
		توسعه وسایل نقلیه الکتریکی و هوشمند	شیلدز و براون (۲۰۲۱)، ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)، ونگ و همکاران (۲۰۲۱)، کیم و لی (۲۰۱۷)	- کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی - کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در حمل‌ونقل - تسریع در پذیرش وسایل نقلیه پاک و پایدار
	بهینه‌سازی مصرف انرژی و منابع	استفاده از دوقلوهای دیجیتال برای بهینه‌سازی انرژی	کیم و لی (۲۰۱۷)، چن و همکاران (۲۰۱۹)، ونگ و همکاران (۲۰۲۱)	- شبیه‌سازی و پیش‌بینی مصرف انرژی در فرآیندهای تولید - ایجاد مدل‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی - نظارت بلادرنگ بر عملکرد سیستم‌های انرژی

مضامین فراگیر	مضامین سازمان دهنده	مضامین پایه	منابع	کدها
		تحلیل داده‌های مصرف انرژی با اینترنت اشیا	کیم و لی (۲۰۲۲)، چن و همکاران (۲۰۱۹)، ونگ و همکاران (۲۰۲۱)، ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)	• نظارت خودکار بر مصرف انرژی با استفاده از سنسورها • تجزیه و تحلیل داده‌ها برای شناسایی نقاط بهینه مصرف • پیاده‌سازی الگوریتم‌های هوشمند برای کاهش مصرف انرژی
		کاهش هدررفت انرژی در خطوط تولید	کیم و لی (۲۰۲۲)، چن و همکاران (۲۰۱۹)، ونگ و همکاران (۲۰۲۱)، ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)، چن و همکاران (۲۰۱۹)	• بهینه‌سازی فرآیندهای تولید برای افزایش کارایی • شناسایی منابع هدررفت انرژی در خطوط تولید • استفاده از فناوری‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی

الزامات سیاستی گذار به صنعت ۴/۰ با رویکرد توسعه پایدار

جدول (۴)، به ارائه مضامین فراگیر، سازمان‌دهنده و پایه مرتبط با الزامات سیاستی صنعت ۴/۰ می‌پردازد. این جدول با دسته‌بندی کدها در سه بعد اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی، چارچوبی جامع برای سیاست‌گذاری در راستای هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با توسعه پایدار فراهم می‌کند.

جدول ۴: شکل‌گیری مضامین (الزامات سیاستی گذار به صنعت ۴/۰ از منظر توسعه پایدار در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی)

مضامین فراگیر	مضامین سازمان دهنده	مضامین پایه	منابع	کدها
الزامات سیاست‌های صنعت ۴/۰ از منظر اقتصادی	توسعه زیرساخت‌های دیجیتال و ارتباطی	گسترش دسترسی به اینترنت پرسرعت	پاتل و هیرمات (۲۰۲۰)، احمد و همکاران (۲۰۲۰)، حسین (۲۰۱۷)	• توسعه شبکه‌های فیبر نوری در مناطق دورافتاده • کاهش شکاف دیجیتال میان مناطق شهری و روستایی • افزایش قابلیت دسترسی به خدمات اینترنتی در مناطق کم‌برخوردار

مضامین فراگیر	مضامین سازمان‌دهنده	مضامین پایه	منابع	کدها
		توسعه زیرساخت‌های ابری و مراکز داده محلی	چن و همکاران (۲۰۲۰)، چائومین لی (۲۰۱۸)، میلر و همکاران ^۱ (۲۰۲۱)، کیل و همکاران (۲۰۱۷)، شارما و جابور (۲۰۲۰)، جانسون و همکاران ^۲ (۲۰۲۱)	- ایجاد مراکز داده در مناطق مختلف برای کاهش تأخیر و بهبود سرعت پردازش - حمایت از شرکت‌های کوچک و متوسط برای انتقال به خدمات ابری - ارتقاء امنیت و حفاظت از داده‌ها در مراکز داده محلی
		ارتقاء فناوری‌های مخابراتی نظیر 5G	احمد و همکاران (۲۰۲۰)، میلر و همکاران (۲۰۲۰)، حسین (۲۰۱۷)، تیلور و ازکیل ^۳ (۲۰۲۱)، کیم (۲۰۱۷)، چائومین لی (۲۰۱۸)	- توسعه و استقرار شبکه‌های فایو جی برای ارتقاء سرعت اینترنت و کاهش تأخیر - ارتقاء توان شبکه‌های مخابراتی در پشتیبانی از دستگاه‌های متصل و اینترنت اشیاء - تقویت ظرفیت شبکه برای پاسخگویی به نیازهای داده‌محور در آینده
	ارائه مشوق‌های مالی و اعتباری برای سرمایه‌گذاری	اعطای تسهیلات مالی برای شرکت‌های نوپا	کیل و همکاران (۲۰۱۷)، جانسون و همکاران (۲۰۲۱)	- ارائه کمک‌های مالی دولتی برای استارت‌آپ‌ها در مراحل اولیه - ایجاد صندوق‌های سرمایه‌گذاری حمایتی برای فناوری‌های نوآورانه - ارائه برنامه‌های مشاوره و تسهیلات ویژه برای راه‌اندازی شرکت‌های نوپا در بخش دیجیتال
		تخفیف‌های مالیاتی برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین	کیل و همکاران (۲۰۱۷)، جانسون و همکاران (۲۰۲۱)، کیم (۲۰۱۷)، بونیللا و همکاران (۲۰۱۸)، کیم (۲۰۱۷)، لویز و باکتیکول ^۴ (۲۰۱۸)	- تخصیص مشوق‌های مالیاتی برای تحقیق و توسعه در زمینه فناوری‌های نوین - ایجاد معافیت‌های مالیاتی برای شرکت‌های فعال در بخش‌های فناوری پیشرفته

¹ Eddi Miller, V. Borysenko, Moritz Heusinger² Johnson, M., Jain, R., Brennan-Tonetta, P.³ O. Taylor, P. Ezekiel⁴ J. C. Lopez, K. Bhaktikul

کد ها	منابع	مضامین پایه	مضامین سازمان دهنده	مضامین فراگیر
• ارائه تخفیف‌های مالیاتی به شرکت‌های سرمایه‌گذار فعال در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی				
• ایجاد وام‌های کم‌بهره برای شرکت‌های فعال در صنعت ۴/۰ • حمایت مالی از شرکت‌های دیجیتال از طریق تسهیلات بانکی ویژه • تسهیل دسترسی به منابع مالی برای شرکت‌های نوآور در حوزه فناوری‌های دیجیتال	کیل و همکاران (۲۰۱۷)، جانسون و همکاران (۲۰۲۱)	تسهیل دسترسی به وام‌های کم‌بهره برای صنایع دیجیتال		
• ایجاد برنامه‌های آموزشی فنی برای آموزش کار با ابزارهای جدید دیجیتال • طراحی دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در زمینه اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی و تحلیل داده‌ها • توسعه دوره‌های آموزشی برای مدیران و کارمندان صنعت جهت به‌روز رسانی مهارت‌ها در فناوری‌های نوین	شارما و جابور (۲۰۲۰)، اسمیث اس و کاستانگی (۲۰۱۹)، ویلسون و همکاران (۲۰۲۰)	طراحی دوره‌های آموزشی مرتبط با فناوری‌های نوین	تدوین برنامه‌های آموزشی برای مهارت‌آموزی دیجیتال	الزامات سیاست‌های صنعت ۴/۰ از منظر اجتماعی
• مشارکت با دانشگاه‌ها برای طراحی برنامه‌های تخصصی در زمینه فناوری‌های پیشرفته • برگزاری کارگاه‌های مشترک با دانشگاه‌ها برای توسعه مهارت‌های دیجیتال در نیروی کار • راه‌اندازی برنامه‌های مشترک بین‌المللی با دانشگاه‌ها برای آموزش در زمینه صنعت ۴/۰	شارما و جابور (۲۰۲۰)، اسمیث، اس و کاستانگی (۲۰۱۹)، ویلسون و همکاران (۲۰۲۰)، شارما و جابور (۲۰۲۰)، اسمیث، اس و کاستانگی (۲۰۱۹)، جانسون و همکاران (۲۰۲۱)	همکاری با دانشگاه‌ها برای توسعه برنامه‌های آموزشی تخصصی		
• راه‌اندازی سکوها آموزشی برخط برای آموزش‌های فنی به صورت رایگان • ارائه دوره‌های آموزشی در قالب وبینار و ویدئوهای آموزشی با دسترسی آزاد	شارما و جابور (۲۰۲۰)، اسمیث، اس و کاستانگی (۲۰۱۹)، پاتل و هیرمات (۲۰۲۰)	ارائه آموزش‌های برخط و رایگان برای دسترسی گسترده‌تر		

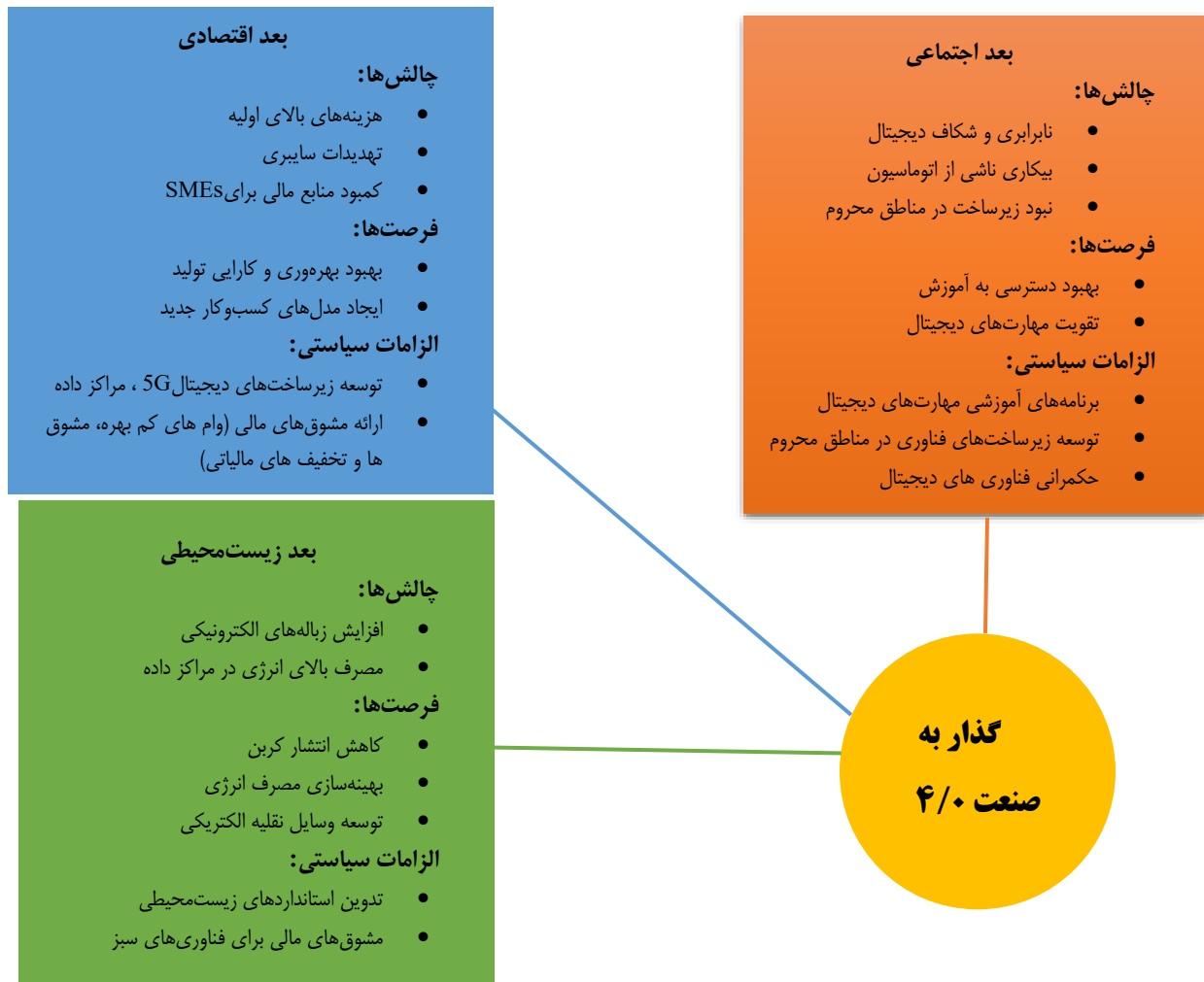
مضامین مضامین پایه	مضامین سازمان دهنده	مضامین پایه	منابع	کدها
				تسهیل دسترسی به منابع آموزشی برای گروه‌های محروم از طریق بسترهای برخط
	توسعه زیرساخت‌های فناوری در مناطق کم‌برخوردار	ایجاد مراکز فناوری و آموزشی در مناطق محروم	احمد و همکاران (۲۰۲۰)، پاتل و هیرمٹ (۲۰۲۰)، کیل و همکاران (۲۰۱۷)	- تأسیس مراکز آموزشی و کارآموزی برای آموزش مهارت‌های دیجیتال در جوامع محروم - راه‌اندازی مراکز نوآوری و فناوری برای آموزش و توسعه کسب‌وکارهای دیجیتال در مناطق دورافتاده - پشتیبانی از کارآفرینان محلی با فراهم کردن منابع آموزشی و فناوری برای رشد مشاغل کوچک
		توسعه زیرساخت‌های اینترنت پرسرعت در این مناطق	احمد و همکاران (۲۰۲۰)، پاتل و هیرمٹ (۲۰۲۰)، حسین (۲۰۱۷)، احمد و همکاران (۲۰۲۰)، جانسون و همکاران (۲۰۲۱)	- اجرای پروژه‌های زیرساختی برای ارائه اینترنت پرسرعت در مناطق روستایی و کم‌برخوردار - همکاری با دولت‌ها و اپراتورهای مخابراتی برای ایجاد شبکه‌های اینترنتی پایدار در این مناطق - تأمین مالی برای نصب شبکه‌های فیبر نوری و تقویت پوشش اینترنت در مناطق فاقد دسترسی به اینترنت مناسب
		تجهیز مدارس و موسسات آموزشی به فناوری‌های روز	احمد و همکاران (۲۰۲۰)، پاتل و هیرمٹ (۲۰۲۰)، شارما و جابور (۲۰۲۰)، اسمیث اس و کاستانگی (۲۰۱۹)	- تجهیز مدارس و دانشگاه‌ها با ابزارهای آموزشی پیشرفته مانند کامپیوترها، تبلت‌ها و نرم‌افزارهای تخصصی - توسعه بسترهای آموزش آنلاین و مجازی برای مدارس در مناطق محروم - تأمین بودجه برای به روز رسانی تجهیزات آموزشی و ارائه دوره‌های آموزشی فناوری در مدارس

مضامین فراگیر	مضامین سازمان دهنده	مضامین پایه	منابع	کد ها
الزامات سیاست‌های صنعت ۴/۰ از منظر زیست‌محیطی	تدوین استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی	تعیین الزامات قانونی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	کیم (۲۰۱۷)، لوپز و باکتیکول (۲۰۱۸)، ژانگ و همکاران، قامروزمن و کریم (۲۰۲۱)	- ایجاد قوانین و مقررات برای کاهش انتشار دی اکسید کربن در صنایع و حمل‌ونقل - تنظیم حداقل استانداردهای آلاینده‌گی برای کارخانه‌ها و مراکز صنعتی - الزام صنایع به استفاده از فناوری‌های سبز و انرژی‌های تجدیدپذیر برای کاهش آلاینده‌ها
		تدوین استانداردهای مربوط به استفاده از مواد بازیافتی	کیم (۲۰۱۷)، لوپز و باکتیکول (۲۰۱۸)، راج و همکاران ^۱ (۲۰۲۰)	- تعریف استانداردهای قانونی برای استفاده از مواد بازیافتی در فرآیندهای تولید - تشویق صنایع به استفاده از مواد بازیافتی از طریق معافیت‌های مالیاتی و مشوق‌های اقتصادی - ایجاد الزامات برای کاهش ضایعات و افزایش نرخ بازیافت در صنایع تولیدی
	ارائه مشوق‌های مالی برای فناوری‌های سبز	تخصیص یارانه برای تحقیق و توسعه در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر	کیم (۲۰۱۷)، لوپز و باکتیکول (۲۰۱۸)، ژانگ و همکاران، قامروزمن و کریم (۲۰۲۱)	- ارائه یارانه‌های دولتی برای پروژه‌های تحقیقاتی و نوآوری در زمینه انرژی‌های پاک - حمایت مالی از شرکت‌ها و مؤسسات تحقیقاتی برای توسعه فناوری‌های تجدیدپذیر - تسهیل در دسترسی به منابع مالی برای آزمایش و پیاده‌سازی فناوری‌های انرژی پاک
		اعطای تسهیلات مالی به شرکت‌های فعال در حوزه فناوری‌های پاک	کیم (۲۰۱۷)، لوپز و باکتیکول (۲۰۱۸)، کیل و همکاران (۲۰۱۷)، ژانگ، محمد و خان، قامروزمن و کریم (۲۰۲۱)	- ارائه وام‌های کم‌بهره و تسهیلات مالی برای شرکت‌هایی فعال در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر - تسهیل فرآیند دریافت تسهیلات برای استارت‌آپ‌های فناوری سبز و پاک

¹ A. Raj, Gourav Dwivedi, Ankit Sharma

مضامین فراگیر	مضامین سازمان‌دهنده	مضامین پایه	منابع	کدها
				• ارائه مشوق‌های مالی برای شرکت‌های استفاده‌کننده از فناوری‌های کم‌کربن در فرآیندهای تولید خود
		کاهش مالیات برای صنایعی که به سمت کاهش آلاینده‌گی حرکت می‌کنند	کیم (۲۰۱۷)، لویز و باکتیکول (۲۰۱۸)، راج و همکاران (۲۰۲۰) کیم (۲۰۱۷)	• کاهش یا معافیت مالیاتی برای صنایع بکارگیرنده فناوری‌های سبز در عملیات خود • ایجاد تخفیف‌های مالیاتی برای صنایع کاهنده انتشار آلاینده‌ها • پاداش‌های مالی برای شرکت‌های اقدام‌کننده در جهت بهبود اثرات زیست‌محیطی خود

شکل ۳ یک شبکه مضامین است که به‌عنوان جمع‌بندی جداول ۳ و ۴ عمل می‌کند و رابطه میان چالش‌ها، فرصت‌ها و الزامات سیاستی گذار به صنعت ۴/۰ با اهداف توسعه پایدار را به تصویر می‌کشد. بر اساس این جداول، ابعاد اقتصادی (مانند افزایش کارایی تولید و هزینه‌های بالای پذیرش فناوری)، اجتماعی (نظیر کاهش نابرابری از طریق آموزش دیجیتال و شکاف دیجیتال در مناطق روستایی ایران)، و زیست‌محیطی (کاهش مصرف انرژی و افزایش زباله‌های الکترونیکی) به همراه الزامات سیاستی مانند توسعه زیرساخت دیجیتال، آموزش مهارت‌ها و اجرای استانداردهای سبز، در یک سیستم یکپارچه تحلیل شده‌اند. این شکل، یافته‌های پژوهش را که بر لزوم هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با توسعه پایدار از طریق سیاست‌گذاری جامع تأکید دارد، به‌خوبی منعکس می‌کند و چارچوبی برای مدیریت چالش‌ها و بهره‌برداری از فرصت‌ها در سطح جهانی ارائه می‌دهد.



شکل ۳: شبکه مضامین چالش‌ها، فرصت‌ها و الزامات سیاستی گذار به صنعت ۴/۰ از منظر توسعه پایدار

تجزیه و تحلیل یافته‌ها

این پژوهش با هدف شناسایی ملاحظات و الزامات سیاست‌گذاری برای هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با اهداف توسعه پایدار در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی انجام شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که صنعت ۴/۰، در صورت مدیریت صحیح و با طراحی سیاست‌های مناسب، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تحقق اهداف توسعه پایدار در سطح جهانی عمل کند، اما چالش‌های متعددی نیز در این مسیر وجود دارد که نیازمند توجه سیاست‌گذاران در مقیاس بین‌المللی است. در ادامه، یافته‌ها در هر یک از ابعاد توسعه پایدار ارائه شده‌اند با مطالعات پیشین مورد مقایسه قرار گرفته‌اند:

در بعد اقتصادی، یافته‌های این پژوهش نشان داد که افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و ارتقای کارایی زنجیره تأمین سه فرصت اصلی هستند و در مقابل، هزینه‌های بالای پیاده‌سازی فناوری‌های پیشرفته و تهدیدات سایبری به‌عنوان دو چالش کلیدی شناسایی شدند. این یافته‌ها با نتایج بونیل و همکاران (۲۰۱۸) و قباخلو (۲۰۲۰) هم‌راستا است که فناوری‌های صنعت ۴/۰، مانند اینترنت اشیا و هوش مصنوعی می‌توانند کارایی فرآیندهای تولید را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشند، در حالی که قباخلو (۲۰۲۰) به نقش این فناوری‌ها در ارتقای کارایی زنجیره تأمین و کاهش هزینه‌های لجستیک اشاره کرده است. این فرصت‌ها برای اقتصادهای توسعه‌یافته و در حال توسعه به یک اندازه اهمیت دارند، زیرا می‌توانند رقابت‌پذیری جهانی را افزایش دهند و مدل‌های کسب‌وکار نوین، مانند اقتصاد اشتراکی دیجیتال، را ترویج کنند. با این حال، چالش‌های اقتصادی متعددی نیز شناسایی شدند. هزینه‌های بالای اولیه برای پیاده‌سازی فناوری‌های پیشرفته، به‌ویژه برای شرکت‌های کوچک و متوسط یک مانع جهانی است. این شرکت‌ها، چه در کشورهای توسعه‌یافته مانند آلمان و چه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، اغلب منابع مالی محدودی دارند و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های گران‌قیمت برای آن‌ها دشوار است (طاهری، ۱۴۰۱). علاوه بر این، تهدیدات سایبری به‌عنوان یک چالش جهانی مطرح هستند، زیرا افزایش وابستگی به فناوری‌های دیجیتال، سازمان‌ها را در معرض حملات سایبری قرار می‌دهد. این موضوع با یافته‌های مولر و همکاران (۲۰۱۸) هم‌خوانی دارد که نشان داده‌اند امنیت سایبری یکی از موانع اصلی پذیرش فناوری‌های صنعت ۴/۰ در سطح جهانی است. بر اساس این یافته‌ها، توصیه‌های سیاستی و مدیریتی شامل سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دیجیتال جهانی، مانند گسترش شبکه‌های فایو جی و ایجاد مراکز داده پایدار است تا پذیرش فناوری‌های صنعت ۴/۰ تسهیل شود (قباخلو، ۲۰۲۰). همچنین، ارائه مشوق‌های مالی، مانند یارانه‌ها و معافیت‌های مالیاتی، برای حمایت از شرکت‌های کوچک و متوسط در پذیرش این فناوری‌ها ضروری است (بونیل و همکاران، ۲۰۱۸). مدیران نیز باید بر تقویت امنیت سایبری از طریق تدوین استانداردهای بین‌المللی حفاظت از داده‌ها و سرمایه‌گذاری در سیستم‌های دفاعی پیشرفته تمرکز کنند تا ریسک‌های سایبری را کاهش دهند (مولر و همکاران، ۲۰۱۸).

در بعد اجتماعی، یافته‌های این پژوهش نشان داد که بهبود دسترسی به آموزش باکیفیت از طریق پلتفرم‌های دیجیتال و ایجاد فرصت‌های شغلی نو در حوزه‌های فناوری دو فرصت اصلی هستند، در حالی که نابرابری دیجیتال و بیکاری ناشی از اتوماسیون دو چالش عمده محسوب می‌شوند. این نتایج با مطالعات شارما و جابور (۲۰۲۰) همسو است که نشان داده‌اند سکوه‌های آموزشی برخط مبتنی بر فناوری‌های صنعت ۴/۰ می‌توانند دسترسی به آموزش باکیفیت را در جوامع محروم بهبود بخشند، موضوعی که در مناطقی مانند آفریقای زیرسحرا، جنوب آسیا و حتی بخش‌هایی از کشورهای توسعه‌یافته با شکاف دیجیتال بالا، اهمیت زیادی دارد. علاوه بر این، صنعت ۴/۰

می‌تواند با ایجاد مشاغل جدید در حوزه‌های فناوری، مانند توسعه نرم‌افزار و تحلیل داده، فرصت‌های شغلی نوینی فراهم کند (قباخلو، ۲۰۲۰). با این حال، چالش‌های اجتماعی قابل توجهی نیز وجود دارند. نابرابری دیجیتال یک مشکل جهانی است، زیرا بسیاری از مناطق محروم جهان، از آفریقا گرفته تا آسیا و حتی بخش‌هایی از اروپا، همچنان به اینترنت پرسرعت و زیرساخت‌های فناوری دسترسی ندارند. این موضوع با یافته‌های خان و حلیم (۲۰۲۱) همخوانی دارد که نشان داده‌اند شکاف دیجیتال یکی از موانع اصلی تحقق اهداف توسعه پایدار در عصر صنعت ۴/۰ است. همچنین، بیکاری ناشی از اتوماسیون یک چالش جهانی است. مطالعات نشان می‌دهند که اتوماسیون می‌تواند مشاغل سنتی را در بخش‌های مختلف، از تولید گرفته تا خدمات، تحت تأثیر قرار دهد و نابرابری‌های اجتماعی را در کشورهایی با نیروی کار کم‌مهارت تشدید کند (قباخلو، ۲۰۲۰). این نتایج بر ضرورت سیاست‌گذاری اجتماعی متمرکز بر آموزش و کاهش نابرابری تأکید دارند. توصیه‌های سیاستی و مدیریتی شامل طراحی برنامه‌های آموزشی جهانی برای توسعه مهارت‌های دیجیتال نیروی کار، به‌ویژه در مناطق محروم، است (شارما و جابور، ۲۰۲۰). سیاست‌گذاران باید با همکاری سازمان‌های بین‌المللی، مانند یونسکو، زیرساخت‌های فناوری را در مناطق محروم گسترش دهند تا شکاف دیجیتال کاهش یابد. مدیران نیز باید برنامه‌های بازآموزی و سیاست‌های حمایتی، مانند بیمه بیکاری، را برای کارگران متأثر از اتوماسیون اجرا کنند تا اثرات اجتماعی منفی به حداقل برسد (شارما و جابور، ۲۰۲۰). علاوه بر این، برگزاری کمپین‌های آگاهی‌بخشی برای کاهش مقاومت فرهنگی در پذیرش فناوری‌های جدید، به‌ویژه در جوامع سنتی، پیشنهاد می‌شود (حسین‌پور، ۱۴۰۳).

در بعد زیست‌محیطی، یافته‌های این پژوهش نشان داد که بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، و توسعه فناوری‌های سبز سه فرصت اصلی هستند، در حالی که افزایش زباله‌های الکترونیکی و مصرف بالای انرژی در مراکز داده دو چالش اساسی به شمار می‌روند. این نتایج با مطالعات پیشین نیز همخوانی دارند. قباخلو (۲۰۲۰) نشان داده است که استفاده از فناوری‌های هوشمند، مانند سیستم‌های مدیریت انرژی مبتنی بر اینترنت اشیا، می‌تواند مصرف انرژی را در صنایع بهینه کند، در حالی که آژانس بین‌المللی انرژی به نقش این فناوری‌ها در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش صنعتی اشاره کرده است. این فرصت‌ها برای مقابله با تغییرات اقلیمی در سطح جهانی اهمیت دارند، به‌ویژه در صنایعی مانند تولید فولاد، خودروسازی و پتروشیمی که از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان کربن هستند. با این حال، چالش‌های زیست‌محیطی قابل توجهی نیز شناسایی شدند. افزایش زباله‌های الکترونیکی ناشی از استفاده گسترده از دستگاه‌های دیجیتال و سخت‌افزارهای صنعت ۴/۰ یک مشکل جهانی است. این موضوع با یافته‌های الا و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد که نشان داده‌اند گسترش فناوری‌های دیجیتال با افزایش قابل توجه زباله‌های الکترونیکی همراه است. علاوه بر این، مصرف بالای انرژی در

مراکز داده، که برای پشتیبانی از فناوری‌های صنعت ۴/۰ موردنیاز هستند، چالشی دیگر است، به‌ویژه در کشورهای که به منابع انرژی فسیلی وابسته هستند (حسین‌پور، ۱۴۰۳). این موضوع با یافته‌های جموال و همکاران (۲۰۲۱) نیز سازگار است که به مصرف انرژی بالای زیرساخت‌های دیجیتال به‌عنوان یک مانع برای پایداری زیست‌محیطی اشاره کرده‌اند. بر اساس این یافته‌ها، توصیه‌های سیاستی و مدیریتی شامل تدوین استانداردهای زیست‌محیطی سخت‌گیرانه در سطح جهانی برای مدیریت زباله‌های الکترونیکی و کاهش آلاینده‌ها است (الا و همکاران، ۲۰۲۰). سیاست‌گذاران باید با همکاری نهادهای بین‌المللی، مانند برنامه محیط‌زیست سازمان ملل^۱، شرکت‌ها را به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیندهای صنعتی تشویق کنند، برای مثال از طریق یارانه‌ها و مشوق‌های مالی مدیران نیز باید از فناوری‌های هوشمند برای مدیریت بهینه منابع، مانند آب و انرژی، استفاده کنند تا اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ ونگ و همکاران، ۲۰۲۱). سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های بازیافت زباله‌های الکترونیکی و توسعه فناوری‌های سبز نیز از اولویت‌های مدیریتی است (جموال و همکاران، ۲۰۲۱).

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان می‌دهد که صنعت ۴/۰ می‌تواند به‌عنوان یک کاتالیزور برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار در سطح جهانی عمل کند، اما موفقیت آن به سیاست‌گذاری‌های چندوجهی و همکاری‌های بین‌المللی بستگی دارد. مقایسه یافته‌ها با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که هرچند پتانسیل‌های صنعت ۴/۰ در سطح جهانی شناخته‌شده هستند، اما چالش‌های جهانی مانند نابرابری دیجیتال، تهدیدات سایبری، و اثرات زیست‌محیطی نیازمند حکمرانی و یافتن راهکارهای سیاستی هماهنگ در سطح بین‌المللی و منطقه‌ای هستند.

در بُعد اقتصادی، یافته‌ها نشان می‌دهند که هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه، محدودیت در تأمین مالی برای بنگاه‌های کوچک و متوسط و نیاز به زیرساخت‌های دیجیتال پیشرفته از موانع اصلی هستند. در مقابل، فناوری‌های صنعت ۴/۰ پتانسیل قابل‌توجهی برای بهبود بهره‌وری و بهینه‌سازی زنجیره تأمین دارند. برای مقابله با این چالش‌ها، پیشنهادها سیاستی عملیاتی شامل ایجاد صندوق ملی-منطقه‌ای حمایت از تحول دیجیتال، اعطای مشوق‌های مالیاتی مشروط و حمایت از توسعه زیرساخت‌های حیاتی از طریق سرمایه‌گذاری دولتی و مشارکت با بخش خصوصی است.

در بُعد اجتماعی، شکاف دیجیتال و کمبود مهارت‌های تخصصی از موانع کلیدی شناسایی شده‌اند. راهکارهای پیشنهادی برای این چالش‌ها شامل طراحی و اجرای برنامه‌های ملی بازآموزی و ارتقای مهارت با مشارکت

^۱ United Nations Environment Program - UNEP

دانشگاه‌ها و صنعت، راه‌اندازی پلتفرم‌های آموزش سریع و اعتبارسنجی مهارت، و اجرای سیاست‌های هدفمند برای کاهش نابرابری دیجیتال از طریق تأمین تجهیزات آموزشی و برنامه‌های یارانه‌ای است.

در بُعد زیست‌محیطی، اگرچه فناوری‌های دیجیتال می‌توانند به کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن کمک کنند، اما افزایش مصرف انرژی مراکز داده و تولید زباله‌های الکترونیکی را نیز به همراه دارند. پیشنهاد‌های سیاستی در این حوزه شامل تدوین استانداردهای ملی مدیریت پسماند الکترونیکی، ایجاد مشوق‌های مالی برای استفاده از فناوری‌های کم‌مصرف انرژی، و الزام به گزارش‌دهی محیط‌زیستی برای پروژه‌های بزرگ دیجیتال است.

دلالت‌های سیاستی و مدیریتی

بر اساس تحلیل یافته‌های این پژوهش، برای هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با اهداف توسعه پایدار، دلالت‌های سیاستی و مدیریتی زیر در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ارائه می‌شوند:

در بعد اقتصادی، سیاست‌گذاران باید با ارائه مشوق‌های مالی مانند وام‌های کم‌بهره و معافیت‌های مالیاتی، از شرکت‌های کوچک و متوسط برای پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴/۰ حمایت کنند تا بهره‌وری و رقابت‌پذیری آن‌ها افزایش یابد. همچنین، ایجاد نهادهای نظارتی بین‌المللی برای تدوین استانداردهای امنیت سایبری و کاهش ریسک‌های دیجیتال ضروری است. از منظر مدیریتی، مدیران می‌توانند با ایجاد شراکت‌های جهانی با شرکت‌های فناوری محور، دسترسی به فناوری‌های پیشرفته را تسهیل کرده و با آموزش نیروی کار، آمادگی سازمان را برای پذیرش این فناوری‌ها افزایش دهند.

در بعد اجتماعی، سیاست‌گذاران باید برنامه‌های آموزشی جهانی برای توسعه مهارت‌های دیجیتال، به‌ویژه در مناطق محروم، طراحی کنند و با گسترش دسترسی به اینترنت پرسرعت، شکاف دیجیتال را کاهش دهند. همچنین، اجرای سیاست‌های حمایتی مانند برنامه‌های بازآموزی و بیمه بیکاری برای کارگران متأثر از اتوماسیون پیشنهاد می‌شود. از منظر مدیریتی، مدیران باید با برگزاری دوره‌های آموزشی داخلی، کارکنان را برای کار با فناوری‌های جدید آماده کرده و با کمپین‌های آگاهی‌بخشی، پذیرش فناوری را در سازمان تسهیل کنند.

در بعد زیست‌محیطی، سیاست‌گذاران باید استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای برای مدیریت زباله‌های الکترونیکی تدوین کرده و با ارائه مشوق‌هایی مانند یارانه، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را در صنایع ترویج دهند. همچنین، بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند برای مدیریت بهینه منابع آب و انرژی توصیه می‌شود. از منظر مدیریتی، مدیران می‌توانند با سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های بازیافت و پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند، مصرف منابع را بهینه کرده و با همکاری با استارت‌آپ‌های فناوری سبز، پایداری زیست‌محیطی سازمان را تقویت کنند.

محدودیت‌ها و پژوهش‌های آتی

این پژوهش با چندین محدودیت مواجه است که در راستای رفع آن‌ها پیشنهادهای برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود. بر اساس محدودیت‌های این پژوهش، مسیرهای زیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود:

- روش‌شناسی و داده‌ها: با توجه به اتکای این پژوهش به داده‌های ثانویه مستخرج از مقالات و گزارش‌ها (۲۰۱۵-۲۰۲۴)، لازم است پژوهش‌های آتی از روش‌های کمی (مانند مدل‌سازی اقتصادی یا پیمایش‌های بین‌المللی) و مطالعات موردی تجربی در صنایع خاص (مانند خودروسازی، کشاورزی و انرژی) استفاده کنند.
- ابعاد زمانی: یافته‌ها نشان دادند صنعت ۴/۰ اثرات بلندمدتی بر نابرابری اجتماعی و پایداری زیست‌محیطی دارد. بنابراین، پژوهش‌های طولی می‌توانند پویایی‌های این اثرات را در بازه‌های زمانی بلندمدت آشکار سازند.
- فناوری‌های خاص: این پژوهش صنعت ۴/۰ را به‌طور کلی بررسی کرد، در حالی که اثرات فناوری‌های خاص (مانند هوش مصنوعی، بلاکچین یا چاپ سه‌بعدی) بر توسعه پایدار می‌تواند متفاوت باشد. پژوهش‌های آینده می‌توانند به تفکیک هر فناوری و تأثیرات آن بر ابعاد مختلف پایداری بپردازند.
- مقایسه کشورها: با توجه به تفاوت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی میان کشورها، مطالعات تطبیقی بین کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه ضروری است تا تفاوت‌های مسیر پذیرش صنعت ۴/۰ و تأثیرات آن بر توسعه پایدار روشن شود.
- حکمرانی سیاست‌گذاری بین‌المللی: یافته‌ها نشان دادند نقش حکمرانی و سیاست‌های جهانی تعیین‌کننده است، اما اثربخشی آن‌ها در این پژوهش بررسی نشد. پژوهش‌های آتی می‌توانند تأثیر سیاست‌های بین‌المللی (مانند توافق‌نامه پاریس یا مقررات اتحادیه اروپا در زمینه حکمرانی داده) را بر هم‌راستایی صنعت ۴/۰ با توسعه پایدار ارزیابی کنند.
- به عنوان یک حوزه امیدبخش برای پژوهش‌های آتی، بررسی نقش پلتفرم‌های هم‌آفرینی و شبکه‌های انتقال دانش در تسریع پذیرش صنعت ۴/۰، به‌ویژه برای بنگاه‌های کوچک و متوسط است. بنابراین، پژوهش‌های آینده می‌توانند بر طراحی، اثربخشی و مدل‌های حکمرانی این شبکه‌های ملی-منطقه‌ای و چگونگی بهینه‌سازی همکاری سه‌جانبه دولت، صنعت و دانشگاه برای ایجاد اکوسیستم‌های یادگیری جمعی در زمینه گذار به صنعت ۴/۰ متمرکز گردند.

منابع

- Abrar, M., & Ravindra, P. (2024). Sustainability in the United Arab Emirates: Leveraging Industry 4.0 technologies. *Journal of Sustainable Development*, 17(1), 123–145. <https://doi.org/10.5539/jsd.v17n1p123>
- Agarwal, A., & Ojha, R. (2024). Prioritizing implications of Industry 4.0 on the sustainable development goals: A perspective from the analytic hierarchy process in manufacturing operations. *Journal of Cleaner Production*, 444, Article 141189. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141189>
- Ahmed, S., Shah, M. A., & Wakil, K. (2020). Blockchain as a trust builder in the smart city domain: A systematic literature review. *IEEE Access*, 8, 84664–84699. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992401>
- Alpana, A., & Ravindra, O. (2024). Prioritizing implications of Industry 4.0 on the sustainable development goals: A perspective from the analytic hierarchy process in manufacturing operations. *Journal of Cleaner Production*, 444, Article 141189. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141189>
- Ammar Abulibdeh, A., Zaidan, E., & Abulibdeh, R. (2024). Navigating the confluence of artificial intelligence and education for sustainable development in the era of Industry 4.0: Challenges, opportunities, and ethical dimensions. *Journal of Cleaner Production*, 437, Article 140527. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140527>
- Arbix, G., & Bonilla, S. H. (2018). Made in China 2025 e Industrie 4.0: A difícil transição chinesa do catching up à economia puxada pela inovação. *Tempo Social*, 30(3), 143–170. <https://doi.org/10.11606/0103-2070.ts.2018.143170>
- Asadi, M. (2019). The Fourth Industrial Revolution and Digital Economy: Drivers of Sustainable Economic Growth. *Applied Studies in Management and Development Sciences*, 4(3), 5–14. <https://sid.ir/paper/123456/en> [In Persian].
- Asadi, M. (2021). The Fourth Generation of Industry 4.0 and Sustainable Industrial Development. First International Conference on Leap in Management Sciences, Economics and Accounting, Sari. <https://civilica.com/doc/1234567> [In Persian].
- Beier, G., Niehoff, S., & Hoffmann, M. (2021). Industry 4.0: A step towards achieving the SDGs? A critical literature review. *Discover Sustainability*, 2(22), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s43621-021-00030-2>
- Bonilla, S. H., Silva, H. R. O., Terra da Silva, M., Gonçalves, R. F., & Sacomano, J. B. (2018). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability*, 10(10), Article 3740. <https://doi.org/10.3390/su10103740>

- Cotrino, A., Sebastián, M. A., & González-Gaya, C. (2021). Industry 4.0 HUB: A collaborative knowledge transfer platform for small and medium-sized enterprises. *Applied Sciences*, 11(12), Article 5548. <https://doi.org/10.3390/app11125548>
- Elkhodr, M., Shahrestani, S., & Cheung, H. (2019). The Internet of Things: New interoperability, management, and security challenges. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1604.04824>
- Gang, Q., Muhammad, A., Khan, Z. U., Khan, M. S., Ahmed, F., & Ahmad, J. (2022). Machine learning-based prediction of node localization accuracy in IIoT-based MI-UWSNs and design of a TD coil for omnidirectional communication. *Sustainability*, 14(15), Article 9683. <https://doi.org/10.3390/su14159683>
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, Article 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Foroughi, B., Tseng, M.-L., Nikbin, D., & Khanfar, A. (2023). Industry 4.0 digital transformation and opportunities for supply chain resilience: A comprehensive review and a strategic roadmap. *Production Planning & Control*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2178571>
- Han, G., Shu, L., Chan, S., & Hu, J. (2016). Security and privacy in the Internet of Things: Methods, architectures, and solutions. *Security and Communication Networks*, 6(15), 2641–2642. <https://doi.org/10.1002/sec.1487>
- Hosseinpour, A. (2024). Transparency of artificial intelligence in the era of Industry 4.0: The emergence of explainable artificial intelligence. *Sixteenth International Conference on Mechanics, Manufacturing, Industries and Civil Engineering*, 12–14. <https://civilica.com/doc/1234568> [In Persian]. (DOI ندارد)
- Huang, K., Wang, K., Lee, P. K., & Yeung, A. C. (2023). The impact of Industry 4.0 on supply chain capability and supply chain resilience: A dynamic resource-based view. *International Journal of Production Economics*, 262, Article 108913. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108913>
- Hussain, M. I. (2016). Internet of Things: Challenges and research opportunities. *CSI Transactions on ICT*, 5(1), 87–95. <https://doi.org/10.1007/s40012-016-0136-6>
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., & Giallanza, A. (2021a). Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions. *Applied Sciences*, 11(12), Article 5725. <https://doi.org/10.3390/app11125725>
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., Kumar, A., Kumar, V., & Garza-Reyes, J. A. (2021b). Machine learning applications for sustainable manufacturing: A bibliometric-based review for future research. *Journal of Enterprise Information Management*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/JEIM-09-2020-0361>

- Johnson, M., Jain, R., Brennan-Tonetta, P., et al. (2021). Impact of big data and artificial intelligence on industry: Developing a workforce roadmap for a data-driven economy. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 22, 197–217. <https://doi.org/10.1007/s40171-021-00272-y>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 working group. *Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wirtschaft e.V.*, Berlin. <https://www.acatech.de/publikation/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>
- Khan, I. S., & Ahmad, M. O. (2021). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, circular economy, and sustainable business models perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 297, Article 126655. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126655>
- Khan, S., & Haleem, A. (2021). Digital divide as a barrier to sustainable development in the era of Industry 4.0. *Technology in Society*, 67, Article 101789. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101789>
- Kiel, D., Müller, J. M., & Arnold, C. (2017). Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of Industry 4.0. *International Journal of Innovation Management*, 21(8), Article 1740015. <https://doi.org/10.1142/S1363919617400151>
- Kim, T., & Lee, S. (2017). Smart city and IoT. *Future Generation Computer Systems*, 76, 159–162. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.03.034>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Lopez, J. C. C., & Bhaktikul, K. (2018). Sustainable environment and tourism industry: An institutional policy analysis of northeastern Thailand. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(1), 31–37. <https://doi.org/10.15244/pjoes/74109>
- Lopes, J. D., Estevão, J., & Toth-Peter, A. (2023). Industry 4.0, multinationals, and sustainable development: A bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 413, Article 137381. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137381>
- Machado, C. G., & Winroth, M. P. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: An emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462–1484. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652807>
- Machado, C., & Davim, J. P. (2020). *Entrepreneurship and organizational innovation*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-19289-1>

- Miller, E., Borysenko, V., Heusinger, M., Niedner, N., Engelmann, B., & Schmitt, J. (2021). Enhanced changeover detection in Industry 4.0 environments with machine learning. *Sensors*, 21(17), Article 5896. <https://doi.org/10.3390/s21175896>
- Mohammadi, M., Heidary Dahooie, J., & Ahmadi, A. (2024). Identification and Prioritization of Artificial Intelligence Applications in Supply Chain 4.0 (Retail Industry Case Study). *Journal of Technology Development Management*, 11(4), 78-106. <https://doi.org/10.22104/JTDM.2024.6904.3317> [In Persian].
- Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K.-I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, 10(1), Article 247. <https://doi.org/10.3390/su10010247>
- Mazroui Nasrabadi, E., & Habibirad, A. (2023). Presenting the Industry 4/0 Driver Model in Healthcare: a Mixed Method. *Journal of Technology Development Management*, 11(1), 85-115. <https://doi.org/10.22104/JTDM.2024.6559.3237> [In Persian].
- Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M. A., Haddad, H., & Kitukutha, N. (2020). Impact of Industry 4.0 on environmental sustainability. *Sustainability*, 12(11), Article 4674. <https://doi.org/10.3390/su12114674>
- Phan, T. T. H., Tran, H. X., Le, T. T., Nguyen, N., Pervan, S., & Tran, M. D. (2020). The relationship between sustainable development practices and financial performance: A case study of textile firms in Vietnam. *Sustainability*, 12(15), Article 5930. <https://doi.org/10.3390/su12155930>
- Raj, A., & Dwivedi, G. (2020). Barriers to the adoption of Industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics*, 224, Article 107546. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>
- Rashmei, M. H., Hosseini Shakib, M., & Khamseh, A. (2023). The pattern of Industry 4.0 technologies adoption in Iran's auto parts manufacturing companies. *Journal of Technology Development Management*, 11(3), 169-210. <https://doi.org/10.22104/jtdm.2024.6743.3274> [In Persian].
- Ruggerio, C. A. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Science of the Total Environment*, 786, Article 147481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Sandelowski, M., & Barroso, J. (2007). *Handbook for synthesizing qualitative research*. Springer. <https://books.google.com/books?id=0I6KBQAAQBAJ&referrer=grok.com>
- Sharma, R., Jabbour, C. J. C., & Jabbour, A. B. L. de S. (2020). Sustainable manufacturing and Industry 4.0: What we know and what we don't. *Journal of Enterprise Information Management*, 34(1), 230–266. <https://doi.org/10.1108/JEIM-01-2020-0024>

- Shields, J., & Brown, M. (2021). Managing employee performance and reward. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108752985>
- Smith, S. S., & Castonguay, J. (2019). Blockchain and accounting governance: Emerging issues and considerations for accounting and assurance professionals. *Journal of Emerging Technologies in Accounting*, 16(1), 55–65. <https://doi.org/10.2308/jeta-52410>
- Steenmans, K., Taylor, P., & Steenmans, I. (2021). Blockchain technology for governance of plastic waste management: Where are we? *Social Sciences*, 10(11), Article 434. <https://doi.org/10.3390/socsci10110434>
- Taheri, A. (2022). Human resources, technology, and sustainable development in the fourth industrial revolution. Seventh International Conference on Management, Psychology and Humanities with Sustainable Development Approach, Tehran, 2–5. <https://civilica.com/doc/1234569> [In Persian].
- Woodworth, B., Patel, K. K., Stich, S., Dai, Z., Bullins, B., McMahan, B., Shamir, O., & Srebro, N. (2020). Is local SGD better than minibatch SGD? *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning*, 119, 10334–10343. <https://proceedings.mlr.press/v119/woodworth20a.html>
- Xie, Q., Pan, D., & Huang, L. (2022). The role of governments in driving Industry 4.0 adoption: Policy frameworks and collaborative innovation platforms. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.001>
- Zhou, L., & Wu, Z. (2021). Renewable energy integration in Suzhou City based on the Energy PLAN model. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 695–704. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0749-3_52
- Zimmer, L. (2006). Qualitative meta-synthesis: A question of dialoguing with texts. *Journal of Advanced Nursing*, 53(3), 311–318. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2006.03721.x>