Industrial Management Studies
Vol. 24, No.81, 2026; P 1-34
jims.atu.ac.ir
DOI: 10.22054/jims.2026.92362.3026

Original Research
Accepted: 25/07/2026
Revised: 26/06/2026
Received: 24/04/2026
eISSN: 2476-602X
ISSN: 2251/8029

Conceptual Framework for Improving Sustainable Performance Process Based on Circular Economy and Industry 4.0: A Systemic Approach

Maryam Heidari — Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Akbar Alem Tabriz * — Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Mostafa Zandieh — Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Davood Talebi — Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

The transition toward sustainable industrial systems has underscored the necessity of integrating Circular Economy (CE) principles with Industry 4.0 technologies. Despite expanding studies in both fields, an integrated and process-oriented framework that explains the systematic interaction of these approaches to enhance sustainable performance remains absent in the existing literature. This research aimed to identify existing gaps and propose an integrated conceptual framework for improving sustainable performance based on the synergy between CE and Industry 4.0. Employing a systematic literature review (SLR) following Sandelowski and Barroso's seven-step approach, a systematic search was conducted across reputable international databases for the period 2015–2026. After applying inclusion and exclusion criteria, selected articles were analyzed. A total of 407 initial codes were extracted and, following conceptual refinement, organized into 49 indicators and 33 criteria. These indicators were categorized into five sustainable performance improvement

* Corresponding Author: a-tabriz@sbu.ac.ir

How to Cite: Heidari, M., Alem Tabriz, A., Zandieh, M., Talebi, D. (2026). Conceptual Framework for Improving Sustainable Performance Process Based on Circular Economy and Industry 4.0: A Systemic Approach, *Industrial Management Studies, 24(81)*, 1-34.

processes: procurement, design and development, production and operations, distribution, use, and maintenance. Findings revealed that the literature focuses predominantly on production and operations, while upstream and midstream value chain processes remain under-explored. The proposed framework demonstrated that Industry 4.0 technologies act as enablers for implementing the ten principles of the Circular Economy. By rearranging five organizational processes, these technologies simultaneously enhance the economic, environmental, and social dimensions of sustainable performance. The research's novelty lay in providing an integrated, process-oriented model that elucidates the mechanisms for achieving practical sustainable performance through the nexus of CE and Industry 4.0.

Introduction

The transition toward sustainable industrial systems has highlighted the necessity of integrating Circular Economy (CE) principles with Industry 4.0 technologies. Despite growing research, an integrated, process-oriented framework explaining their systematic interaction to enhance sustainable performance remains absent. This study addressed this gap by proposing a conceptual framework demonstrating how the synergy between CE and Industry 4.0 can improve sustainable performance through reorganizing five supply chain processes: procurement, design and development, production and operations, distribution, and use and maintenance. The CE literature has evolved from 3R approaches to comprehensive frameworks such as the 10R model (Potting et al., 2017). Industry 4.0 technologies (IoT, AI, big data analytics, blockchain, additive manufacturing, and cyber-physical systems) are recognized as enablers for circular practices (Rajput & Singh, 2019; Han et al., 2023). However, existing studies focused primarily on technological dimensions or conceptual relationships, with limited attention to process-oriented implementation frameworks (Rosa et al., 2020; Patyal et al., 2022; Alsaoudi et al., 2025). Most studies focused on macro-level relationships or review technologies and principles, with less attention to practical process-oriented frameworks. Many studies do not simultaneously address all three sustainability dimensions, predominantly focusing on environmental and economic aspects. A systemic approach explaining the dynamic interaction of CE principles and Industry 4.0 within supply chain processes is rarely observed. Moreover, a study that systematically extracts and classifies sustainable performance indicators within a coherent framework is not available.

Methodology

This research employed a systematic literature review (SLR) based on qualitative meta-synthesis. SLR served as the method for systematic search, screening, and selection of articles based on a specific protocol to prevent selection bias and ensure transparency and replicability (Kitchenham & Charters, 2007; Okoli & Schabram, 2010). Meta-synthesis served as the method for analyzing and

synthesizing qualitative findings, enabling extraction of codes, concepts, and indicators into a new conceptual framework (Sandelowski & Barroso, 2007; Walsh & Downe, 2005). The study followed Sandelowski and Barroso's seven-step approach (2007). A systematic search was conducted across Scopus, Web of Science, and ScienceDirect, and complementary Persian databases (Civilica, Magiran, SID) for 2015–2026. After applying inclusion/exclusion criteria and CASP quality assessment, 32 articles were selected. Data analysis employed open, axial, and selective coding, extracting 407 initial codes, refined into 49 indicators and 33 criteria. Reliability was assessed using Cohen's kappa ($\kappa = 0.847$), indicating strong agreement.

Findings

Indicators were categorized into five processes: (1) procurement, (2) design and development, (3) production and operations, (4) distribution, and (5) use and maintenance. Quantitative distribution showed production and operations with the highest share (16 indicators, 32.7%), followed by use and maintenance (11, 22.4%), design and development (10, 20.4%), distribution (7, 14.3%), and procurement (5, 10.2%). This revealed a significant research imbalance, indicating upstream and midstream processes have been underexplored. Industry 4.0 technologies acted as enablers for implementing 10R principles across all five processes, simultaneously enhancing economic, environmental, and social dimensions.

Discussion and Conclusion

Sustainable performance is achieved through strategic alignment of CE and Industry 4.0 within organizational processes. The novelty lay in providing an integrated, process-oriented model that operationalizes indicators within five concrete processes and explains how technologies enable 10R implementation. This alignment between methodology and findings validated the framework as an outcome of analyzing scattered literature data, not a predetermined model. Limitations include: (1) Framework based on literature review lacking empirical testing; (2) Selected articles limited to specific databases; (3) Time frame (2015–2026) may exclude key earlier studies; (4) CASP assessment involves subjectivity; (5) Implementation requires digital infrastructure and organizational maturity. Future research should focus on: (1) empirical validation using quantitative methods across industries; (2) investigating moderating variables including organizational size, digital maturity, and institutional pressures; (3) developing social dimensions of sustainable performance; (4) applying system dynamics to analyze long-term behavior and feedback loops; (5) conducting comparative studies across industries and developed versus developing countries.

Keywords: Circular Economy, Industry 4.0, Sustainable Performance, Process Improvement, Systematic Literature Review.

مقاله پژوهشی

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۲/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۳

ISSN: 2251/8029

eISSN: 2476-602X

مطالعات مدیریت صنعتی

سال بیست و چهارم، شماره ۸۱، تابستان ۱۴۰۵، ص ۱ تا ۳۴

jims.atu.ac.ir

DOI: 10.22054/jims.2026.92362.3026

چارچوب مفهومی بهبود فرایند عملکرد پایدار مبتنی بر اقتصاد چرخشی و صنعت ۴٫۰: رویکرد سیستمی

مریم حیدری — گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اکبر عالم تبریز * — گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

مصطفی زندیه — گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

داوود طالبی — گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

گذار به‌سوی سیستم‌های صنعتی پایدار، ضرورت تلفیق اصول اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴٫۰ را بیش‌ازپیش برجسته ساخته است. باوجود گسترش مطالعات در این دو حوزه، چارچوبی یکپارچه و فرایندمحور که تعامل نظام‌مند این رویکردها را در بهبود عملکرد پایدار تبیین کند، همچنان در ادبیات موجود مشاهده نمی‌شود. هدف این پژوهش، پژوهش حاضر باهدف ارائه چارچوبی مفهومی، سیستمی و فرایندمحور برای بهبود عملکرد پایدار از طریق تبیین سازوکار تعامل اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴٫۰ در پنج فرایند کلیدی زنجیره تأمین انجام شده است. این مطالعه با استفاده از روش مرور نظام‌مند ادبیات و به‌کارگیری رویکرد هفت‌مرحله‌ای سندلووسکی و باروسو صورت گرفته است. پس از جست‌وجوی نظام‌مند در پایگاه‌های معتبر بین‌المللی طی بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶ و اعمال معیارهای ورود و خروج، مقالات منتخب موردبررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. درمجموع ۴۰۷ کد اولیه استخراج و پس از پالایش مفهومی در قالب ۴۹ شاخص و ۳۳ معیار سازمان‌دهی شده‌اند. شاخص‌ها در پنج فرایند بهبود عملکرد پایدار شامل تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع و مصرف و نگهداری طبقه‌بندی گردیدند. یافته‌ها حاکی از آن است که ادبیات موجود عمدتاً بر فرایند تولید و عملیات متمرکز بوده و فرایندهای بالادستی و میانی زنجیره ارزش کم‌تر موردتوجه قرار گرفته‌اند. چارچوب

مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری رشته مدیریت صنعتی گرایش تحقیق در عملیات دانشگاه شهید بهشتی است.

* نویسنده مسئول: a-tabriz@sbu.ac.ir

پیشنهادی پژوهش نشان می‌دهد فناوری‌های صنعت ۴,۰ در نقش توانمندساز اجرای اصول ده‌گانه اقتصاد چرخشی، از طریق بازآرایی پنج فرایند سازمانی، به ارتقای هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی عملکرد پایدار منجر می‌شوند. نوآوری پژوهش در ارائه مدلی یکپارچه و فرایندمحور است که سازوکار تحقق عملکرد پایدار مبتنی بر اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰ را تبیین می‌کند.

کلیدواژه‌ها: اقتصاد چرخشی، صنعت ۴,۰، عملکرد پایدار، بهبود فرایند، مرور سیستماتیک ادبیات.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تشدید فشارهای رقابتی، محدودیت منابع طبیعی، الزامات زیست‌محیطی و افزایش انتظارات ذی‌نفعان موجب شده که دستیابی به عملکرد پایدار به یکی از اولویت‌های راهبردی سازمان‌ها تبدیل شود. در چنین شرایطی، سازمان‌ها دیگر صرفاً بر شاخص‌های اقتصادی تمرکز نمی‌کنند، بلکه ناگزیرند پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی فعالیت‌های خود را نیز در کنار نتایج اقتصادی مدیریت و ارزیابی نمایند. ازاین‌رو، بهبود عملکرد پایدار مستلزم اتخاذ رویکردهایی است که بتوانند به‌صورت هم‌زمان ارزش اقتصادی، حفاظت از محیط‌زیست و مسئولیت‌پذیری اجتماعی را محقق سازند.

یکی از رویکردهای موردتوجه برای دستیابی به این هدف، اقتصاد چرخشی است که در پاسخ به محدودیت‌های الگوی سنتی اقتصاد خطی «استخراج، تولید، مصرف و دفع» پدید آمده است. اقتصاد چرخشی با تأکید بر حفظ ارزش محصولات، مواد و منابع در طول چرخه عمر، کاهش تولید ضایعات و بازگرداندن منابع به چرخه تولید و مصرف، بستری مناسب برای تحقق اهداف پایداری مهیا می‌سازد. باوجود ظرفیت‌های قابل‌توجه این رویکرد، پیاده‌سازی مؤثر آن در محیط‌های صنعتی پیچیده نیازمند زیرساخت‌هایی است که امکان مدیریت، پایش و بهینه‌سازی جریان مواد، اطلاعات و ارزش را در سطح سازمان و زنجیره تأمین مهیا سازند.

در این میان، ظهور فناوری‌های صنعت ۴٫۰ فرصت‌های جدیدی برای تحقق اهداف اقتصاد چرخشی فراهم کرده است. قابلیت‌هایی نظیر جمع‌آوری و تحلیل بلادرنگ داده‌ها، اتصال هوشمند اجزای زنجیره تأمین، افزایش شفافیت اطلاعات و تصمیم‌گیری داده‌محور، امکان بهبود عملکرد پایدار را میسر می‌سازند.

بر این اساس، تعامل و هم‌افزایی میان اقتصاد چرخشی و صنعت ۴٫۰ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رویکردهای نوظهور برای بهبود عملکرد پایدار سازمان‌ها مطرح شده است. اقتصاد چرخشی چارچوب راهبردی لازم برای حفظ ارزش منابع، کاهش ضایعات و ایجاد چرخه‌های بازگشت مواد را عرضه می‌دارد، درحالی‌که فناوری‌های صنعت ۴٫۰ زیرساخت‌های فناورانه موردنیاز برای پایش، کنترل و بهینه‌سازی این چرخه‌ها را در اختیار سازمان‌ها قرار می‌دهند؛ به‌عبارت‌دیگر، صنعت ۴٫۰ صرفاً مجموعه‌ای از فناوری‌های دیجیتال نیست، بلکه به‌عنوان توانمندساز، اجرای اصول اقتصاد چرخشی عملیاتی می‌کند (Rajput and Singh 2019).

باوجود رشد چشمگیر مطالعات مرتبط با اقتصاد چرخشی، صنعت ۴٫۰ و پایداری، مرور ادبیات نشان می‌دهد که بخش عمده پژوهش‌های موجود بر تبیین روابط مفهومی، شناسایی عوامل مؤثر، بررسی موانع و محرک‌ها یا ارزیابی تجربی آثار متمرکز بوده‌اند و سازوکار تحقق عملکرد پایدار در سطح فرایندهای عملیاتی و مدیریتی کمتر موردتوجه قرار گرفته است. همچنین، شناسایی و سازمان‌دهی شاخص‌هایی که

بتوانند میزان موفقیت سازمان‌ها را در پیاده‌سازی هم‌زمان اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴٫۰ ارزیابی کنند، به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم مطرح است.

پژوهش حاضر برای پاسخ به این خلأ، رویکردی سیستمی و فرایندمحور را اتخاذ کرده است. مبنای نظری این رویکرد بر تلفیق سه رویکرد معتبر استوار است: زنجیره ارزش پورترکه بر خلق ارزش در فعالیت‌های اصلی سازمان تأکید دارد؛ مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین F۲[1] که فرایندهای کلیدی زنجیره را در قالب برنامه‌ریزی، تأمین، تولید، تحویل و بازگشت ساماندهی می‌کند و ادبیات اقتصاد چرخشی که بر حفظ ارزش منابع و تداوم جریان مواد در طول چرخه عمر محصول تأکید دارد(Kirchherr, Reike, and Hekkert 2017) بر پایه این مبانی، پنج فرایند کلیدی شامل تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع، و مصرف و نگهداری به‌عنوان بستر تحلیل انتخاب شده‌اند. این انتخاب به‌دلیل پوشش کامل چرخه عمر محصول، قابلیت استقرار اصول اقتصاد چرخشی، امکان تحلیل نقش فناوری‌های صنعت ۴٫۰ در مراحل مختلف زنجیره تأمین و فراهم‌سازی بستر مناسب برای ارزیابی هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی عملکرد پایدار صورت گرفته است.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر ارائه چارچوبی مفهومی، سیستمی و فرایندمحور برای تبیین سازوکار بهبود عملکرد پایدار از طریق سازمان‌دهی شاخص‌های عملکرد پایدار در پنج فرایند کلیدی و تبیین ارتباط میان اصول اقتصاد چرخشی، فناوری‌های صنعت ۴٫۰ و ابعاد سه‌گانه پایداری است. نوآوری پژوهش در ارائه این چارچوب فرایندمحور است که برخلاف مطالعات پیشین، شاخص‌های عملکرد پایدار را در قالب فرایندهای عینی سازمانی دسته‌بندی کرده و نقش فناوری‌های صنعت ۴٫۰ را به‌عنوان توانمندساز اصول ده‌گانه اقتصاد چرخشی در هر یک از پنج فرایند تبیین می‌کند. پژوهش حاضر به دنبال پاسخ به سؤالات زیر است:

۱. شاخص‌های عملکرد پایدار مرتبط با پیاده‌سازی هم‌زمان اقتصاد چرخشی و صنعت ۴٫۰ کدام‌اند؟

۲. این شاخص‌ها از طریق فراترکیب و کدگذاری نظام‌مند چگونه به شکل‌گیری یک چارچوب فرایندمحور برای عملکرد پایدار منجر می‌شوند؟

۳. چارچوب فرایندمحور ساخته‌شده، چگونه از طریق هم‌پوشانی مفهومی، روابط میان شاخص‌های عملکرد پایدار، اصول اقتصاد چرخشی (10R) و فناوری‌های صنعت ۴٫۰ را تبیین می‌کند؟

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

پایداری و عملکرد پایدار

مفهوم پایداری در دهه‌های اخیر به یکی از محورهای اصلی سیاست‌گذاری‌های کلان و راهبردهای

1 SCOR

سازمانی تبدیل شده است. تشدید نگرانی‌های جهانی در خصوص محدودیت منابع طبیعی، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی، سازمان‌ها را ناگزیر به اتخاذ رویکردی جامع و بلندمدت ساخته است که هم‌زمان ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را در بر گیرد در این راستا، «عملکرد پایدار» به‌عنوان شاخصی برای سنجش میزان موفقیت سازمان‌ها در تحقق هم‌زمان اهداف سه‌گانه یادشده مطرح می‌شود(Elkington 1997).

عملکرد پایدار نشان‌دهنده توانایی سازمان در ایجاد تعادل پویا میان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در بلندمدت است و بیانگر میزان انطباق راهبردها، فرایندها و نتایج سازمان با اصول توسعه پایدار می‌باشد. بر اساس دیدگاه سه‌گانه(TBL3F[1]) ، سازمان‌ها باید به‌گونه‌ای عمل کنند که ضمن ایجاد ارزش اقتصادی، به بهبود رفاه اجتماعی و حفاظت از محیط‌زیست نیز کمک نمایند(Elkington 1997) این نگاه یکپارچه، چارچوبی مهیا می‌سازد که در آن عملکرد سازمان نه‌تنها بر اساس شاخص‌های مالی، بلکه بر مبنای پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی نیز ارزیابی می‌شود.

اقتصاد چرخشی

در همین زمینه، «اقتصاد چرخشی» به‌عنوان یکی از رویکردهای تحول‌آفرین در حوزه پایداری مطرح شده است. اقتصاد چرخشی که ریشه‌های آن به دهه ۱۹۷۰ بازمی‌گردد، به‌دنبال ایجاد یک نظام اقتصادی احیاکننده و بازآفرین است که در آن ارزش محصولات، اجزا و مواد تا حد امکان حفظ شود و جریان‌های مواد در چرخه‌های بسته باقی بمانند(Dwivedi and Madaan 2020; Han et al. 2023) برخلاف اقتصاد خطی، این رویکرد مبتنی بر منطق «از گهواره تا گهواره» است و باهدف کاهش استخراج منابع بکر، به حداقل رساندن تولید ضایعات و افزایش بهره‌وری مواد و انرژی در سراسر چرخه عمر محصول طراحی شده است(Kirchherr et al. 2017).برای عملیاتی‌سازی این اهداف، چارچوب10R به‌عنوان یک طبقه‌بندی جامع از راهبردهای چرخشی در جدول **۱** ارائه شده است.

جدول ۱: چارچوب اصول 10R

سطح راهبردی	کدR	اصولR	توضیح
استفاده و تولید هوشمند محصول	R0	امتناع F۴[2]	خودداری از ساخت محصولات غیرضروری یا جایگزینی عملکرد محصول با راهکارهای متفاوت (مانند حذف یک عملکرد اضافی از محصول)
	R1	کاهش F۵[3]	افزایش کارایی در تولید یا مصرف با کاهش مصرف منابع طبیعی و مواد اولیه

1 Triple Bottom Line
2 Refuse
3 Reduce

سطح راهبردی	کدR	اصولR	توضیح
	R2	بازاندیشی F۶[1]	افزایش شدت استفاده از محصول از طریق مدل‌های اشتراکی، چندمنظوره کردن محصولات یا تغییر از مالکیت به دسترسی
افزایش طول عمر محصول و اجزای آن	R3	بازمصرف F۷[2]	استفاده مجدد توسط مصرف‌کننده دیگر از محصولات دورریخته‌شده که همچنان در شرایط خوب و با عملکرد اصلی خود هستند.
	R4	تعمیر F۸[3]	تعمیر و نگهداری محصول معیوب برای استفاده مجدد با عملکرد اصلی خود
	R5	نوسازی F۹[4]	بازسازی یک محصول قدیمی و به‌روزرسانی آن به وضعیت قابل‌قبول
	R6	بازتولید F۱۰[5]	استفاده از قطعات محصولات دورریخته‌شده در یک محصول جدید با عملکرد مشابه
	R7	بازهدف‌گذاری F۱۱[6]	استفاده از محصولات دورریخته‌شده یا قطعات آن‌ها در یک محصول جدید با عملکرد متفاوت
کاربرد مفید مواد	R8	بازیافت F۱۲[7]	پردازش مواد برای به‌دست‌آوردن کیفیت مشابه (بازیافت باکیفیت بالا) یا پایین‌تر (بازیافت باکیفیت پایین)
	R9	بازیابی F۱۳[8]	سوزاندن مواد همراه با بازیابی انرژی (مانند تبدیل زباله به انرژی)

چارچوب ۱۰ Rکه توسط پوتینگ و همکاران (۲۰۱۷) ارائه شده است، یکی از جامع‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های سلسله‌مراتبی در ادبیات اقتصاد چرخشی محسوب می‌شود. این چارچوب، ده اصول را در سه سطح راهبردی دسته‌بندی می‌کند که نشان‌دهنده درجه‌های مختلف چرخشی بودن فعالیت‌هاست. سطح اول (شامل R0 تا R2) بر استفاده و تولید هوشمند محصولات متمرکز است و بالاترین سطح چرخشی را نشان می‌دهد، چراکه با جلوگیری از مصرف غیرضروری منابع در مبدأ، از شکل‌گیری ضایعات پیشگیری می‌کند. سطح دوم (شامل R3 تا R7) بر افزایش طول عمر محصول و قطعات آن از طریق بازمصرف، تعمیر، نوسازی، بازتولید و بازهدف‌گذاری تأکید دارد و در سطح متوسطی از چرخشی قرار می‌گیرد. سطح سوم (شامل R8 و R9) بر کاربرد مفید مواد از طریق بازیافت و بازیابی انرژی تمرکز دارد و پایین‌ترین سطح چرخشی محسوب می‌شود، زیرا در این سطح، مواد دیگر به‌صورت مستقیم در چرخه مصرف باقی نمی‌مانند و یا به مواد اولیه با کیفیت پایین‌تر تبدیل می‌شوند و یا به انرژی تبدیل می‌گردند(Kirchherr et al. 2017; Mulindwa et al. 2024).

1 Rethink
2 Reuse
3 Repair
4 Refurbish
5 Remanufacture
6 Repurpose
7 Recycle
8 Recover

اولویت‌بندی این سلسله‌مراتب به سازمان‌ها نشان می‌دهد که برای دستیابی به بالاترین سطح عملکرد پایدار، ابتدا باید به سراغ راهبردهای سطح اول (امتناع، بازاندیشی و کاهش) بروند و سپس راهبردهای سطح دوم (بازمصرف، تعمیر، نوسازی، بازتولید و بازهدف‌گذاری) و درنهایت راهبردهای سطح سوم (بازیافت و بازیابی) را مدنظر قرار دهند. در پژوهش حاضر، این چارچوب به‌عنوان مبنای تحلیل شاخص‌های عملکرد پایدار در پنج فرایند سازمانی (تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع و مصرف و نگهداری) مورداستفاده قرار گرفته است.

صنعت ٤,٠

هم‌زمان با گسترش رویکرد اقتصاد چرخشی، تحولات فناورانه گسترده‌ای در عرصه تولید و مدیریت صنعتی رخ داده است که تحت عنوان «صنعت ۴,۰» شناخته می‌شود. این اصطلاح نخستین‌بار در سال ۲۰۱۱ در قالب یک ابتکار راهبردی در آلمان مطرح شد و به موج چهارم انقلاب صنعتی اشاره دارد؛ موجی که با دیجیتالی‌سازی پیشرفته، یکپارچه‌سازی سیستم‌های سایبر، فیزیکی و اتصال هوشمند تجهیزات و فرایندها مشخص می‌شود(Hofmann and Rüsch 2017). صنعت ۴,۰ بر پایه فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا F14[1]، سیستم‌های سایبرفیزیکی F15[2]، تحلیل کلان‌داده F16[3]، هوش مصنوعی F17[4]، رایانش ابری F18[5]، رباتیک F19[6] پیشرفته، تولید افزودنی F20[7]، واقعیت افزوده و مجازی F21[8] و بلاک‌چین F22[9] شکل گرفته است (Han et al. 2023; Rizvi, Agrawal, and Murtaza 2023).

برخلاف صنعت ۳,۰ که تمرکز آن بر اتوماسیون ماشین‌آلات منفرد بود، صنعت ۴,۰ بر یکپارچگی هوشمند کل زنجیره ارزش تأکید دارد. فناوری‌های صنعت ۴,۰ با فراهم‌سازی بستر دیجیتال هوشمند، امکان عملیاتی‌سازی بسیاری از اصول پایداری را تقویت می‌کنند. برای مثال، برای مثال، اینترنت اشیا و تحلیل کلان‌داده امکان پایش بلادرنگ مصرف انرژی و مواد را فراهم کرده و از طریق تحلیل‌های پیش‌بینانه، زمینه کاهش اتلاف و بهینه‌سازی فرایندها را ایجاد می‌کنند(Rajput and Singh 2019). هوش مصنوعی با پشتیبانی از تصمیم‌گیری داده‌محور، می‌تواند برنامه‌ریزی تولید، مدیریت موجودی و تخصیص منابع را بهینه سازد(Frank, Dalenogare, and Ayala 2019). به‌طور مشابه، رباتیک پیشرفته و اتوماسیون

1 Internet of Things
2 Cyber-physical systems
3 Big data analysis
4 Artificial Intelligence
5 Cloud computing
6 Robotics
7 Additive manufacturing
8 Augmented and virtual reality
9 Blockchain

هوشمند نیز با کاهش خطاهای انسانی و افزایش دقت، منجر به کاهش ضایعات و بهبود کیفیت محصولات می‌شوند(Han et al. 2023). فناوری بلاک‌چین از طریق افزایش شفافیت و قابلیت ردیابی در زنجیره تأمین، اجرای مؤثر راهبردهای بازچرخانی و لجستیک معکوس را تسهیل می‌کند(Kouhizadeh, Saberi, and Sarkis 2021).

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، ادبیات پژوهشی به‌طور فزاینده‌ای به بررسی هم‌افزایی میان اقتصاد چرخشی (CE) و فناوری‌های صنعت ۴,۰ (I4.0) در راستای ارتقاء عملکرد پایدار پرداخته است. بااین‌حال، این مطالعات عمدتاً یا بر ابعاد فناورانه تمرکز داشته‌اند یا به‌صورت تجربی در یک بستر خاص بررسی شده‌اند و کمتر رویکردی جامع و فرایندمحور ارائه داده‌اند. در ادامه، سیر تحول و تکامل این حوزه از ادبیات، از مفاهیم بنیادین تا جدیدترین تلاش‌های پژوهشی، به‌صورت تحلیلی مرور می‌شود.

اقتصاد چرخشی و صنعت ٤,٠

در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به بررسی ظرفیت فناوری‌های صنعت ۴,۰ برای پشتیبانی از اصول اقتصاد چرخشی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در این جریان پژوهشی، فناوری‌های دیجیتال به‌عنوان توانمندسازهایی معرفی شده‌اند که می‌توانند با افزایش شفافیت، قابلیت ردیابی، اتصال‌پذیری و تحلیل داده‌ها، اجرای مؤثر اصول چرخشی را تسهیل کنند. مطالعات اولیه عمدتاً بر شناسایی فناوری‌های کلیدی و تبیین ظرفیت‌های آن‌ها در بهبود مدیریت منابع، کاهش ضایعات و توسعه مدل‌های کسب‌وکار چرخشی متمرکز بوده‌اند. برای مثال، اسمایلیان و همکاران (۲۰۲۰) با مرور گسترده ادبیات، اینترنت اشیا، کلان‌داده، هوش مصنوعی و رایانش ابری را به‌عنوان مهم‌ترین پیشران‌های دیجیتال تحقق اقتصاد چرخشی معرفی کردند و نشان دادند که یکپارچه‌سازی این فناوری‌ها می‌تواند کارایی استفاده از منابع و نوآوری در سیستم‌های تولیدی را بهبود بخشد.(Esmaeilian et al. 2020).

با توسعه این حوزه، پژوهش‌ها از شناسایی فناوری‌ها فراتر رفته و به بررسی روابط ساختاری میان اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰ پرداخته‌اند. در این راستا، روزا و همکاران (۲۰۲۰) در یکی از نخستین مطالعات نظام‌مند این حوزه، نشان دادند که فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، تحلیل کلان‌داده، سیستم‌های سایبرفیزیکی، شبیه‌سازی و تولید افزودنی، ظرفیت بالایی برای پشتیبانی از راهبردهای چرخشی دارند. آنان با طرح مفاهیم «Circular Industry 4.0» و «Digital Circular Economy» بر این نکته تأکید کردند که ادغام فناوری‌های دیجیتال با اصول اقتصاد چرخشی می‌تواند زمینه شکل‌گیری الگوهای جدید ارزش‌آفرینی را فراهم سازد. بااین‌حال، نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که بخش قابل‌توجهی از ادبیات

موجود همچنان در سطح مفهومی باقی‌مانده و چارچوب‌های عملیاتی برای پیاده‌سازی این همگرایی در فرایندهای سازمانی به‌ندرت توسعه یافته‌اند(Rosa et al. 2020).

در ادامه، برخی پژوهش‌ها به بررسی نحوه تعامل و وابستگی متقابل فناوری‌های صنعت ۴,۰ و اصول اقتصاد چرخشی پرداختند. برای نمونه، گودینیو فیلهو و همکاران (۲۰۲۲) با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی ساختاری-تفسیری نشان دادند که اینترنت اشیا و رایانش ابری زیرساخت تولید داده‌های کلان را فراهم می‌کنند و این داده‌ها از طریق تحلیل‌های پیشرفته، تصمیم‌گیری هوشمند و بهبود عملکرد زنجیره تأمین را امکان‌پذیر می‌سازند(Godinho Filho et al. 2022) . همچنین هان و همکاران (۲۰۲۳) با تمرکز بر چرخه عمر محصول نشان دادند که فناوری‌های دیجیتال می‌توانند اهداف اقتصاد چرخشی را در مراحل طراحی، استفاده و بازیابی تسهیل کنند و از طریق پایش بلادرنگ، بهینه‌سازی مصرف منابع و افزایش قابلیت بازیافت، به ارتقای بهره‌وری و کاهش اتلاف کمک نمایند(Han et al. 2023).

اقتصاد چرخشی، صنعت ٤,٠ و پایداری

با بلوغ نسبی ادبیات مرتبط با اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰، تمرکز پژوهش‌ها به‌تدریج از بررسی روابط دوگانه این دو مفهوم به سمت تحلیل نقش آن‌ها در تحقق پایداری تغییر یافته است. در این مرحله، پژوهشگران تلاش کرده‌اند نشان دهند که چگونه تلفیق اصول اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ می‌تواند به بهبود ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی عملکرد سازمان‌ها منجر شود.

در این راستا، پتیال و همکاران (۲۰۲۲) با مرور نظام‌مند ادبیات، ارتباط میان صنعت ۴,۰، اقتصاد چرخشی و اهداف توسعه پایدار را موردبررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که فناوری‌های صنعت ۴,۰ می‌توانند از طریق تسهیل عملیات پایدار، اجرای مؤثر اصول اقتصاد چرخشی و بهبود بهره‌وری منابع، دستیابی به اهداف توسعه پایدار را تسریع کنند. بااین‌حال، پژوهش مذکور تأکید می‌کند که ادبیات موجود هنوز فاقد چارچوب‌های نظری و اجرایی کافی برای تبیین سازوکار تبدیل قابلیت‌های دیجیتال به نتایج پایدار است(Patyal et al. 2022).

در ادامه، کارماکر و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که فناوری‌های صنعت ۴,۰ تأثیر مستقیمی بر عملکرد زنجیره تأمین پایدار دارند، اما این تأثیر از طریق شیوه‌های اقتصاد چرخشی و مدیریت زنجیره تأمین سبز تقویت می‌شود(Karmaker et al. 2023).

به همین ترتیب، کمبل و گوناسه‌کاران (۲۰۲۳) دریافتند که فناوری‌های صنعت ۴,۰ به‌تنهایی تضمین‌کننده بهبود عملکرد پایدار نیستند و اثربخشی آن‌ها زمانی افزایش می‌یابد که در بستری مبتنی بر اصول اقتصاد چرخشی به‌کار گرفته شوند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اقتصاد چرخشی نقش یک سازوکار میانجی را در تبدیل قابلیت‌های فناورانه به پیامدهای پایدار ایفا می‌کند(Kamble,

.(Gunasekaran, and Dhone 2020

مطالعات جدیدتر نیز بر لزوم توسعه چارچوب‌های یکپارچه تأکید دارند. برای نمونه، السعودی و همکاران (۲۰۲۵) با بررسی نظام‌مند ادبیات، نشان دادند که اگرچه پژوهش‌های این حوزه با سرعت زیادی در حال گسترش هستند، اما بخش عمده آن‌ها بر ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی متمرکز بوده و بعد اجتماعی پایداری کمتر موردتوجه قرار گرفته است. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که بیشتر پژوهش‌ها بر موضوعاتی نظیر پذیرش فناوری، موانع و محرک‌های پیاده‌سازی و اثرات کلی بر عملکرد متمرکز بوده‌اند و هنوز چارچوبی که بتواند تعامل پویا میان فناوری‌های صنعت ۴٫۰، اصول اقتصاد چرخشی و شاخص‌های عملکرد پایدار را در سطح فرایندهای زنجیره تأمین تبیین کند، به‌ندرت مشاهده می‌شود(Alsaoudi et al. 2025).

در جدول ۱ خلاصه‌ای از پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص اقتصاد چرخشی، صنعت ۴٫۰ و پایداری آورده شده است.

جدول ۲: خلاصه پیشینه پژوهش

نویسنده و سال	حوزه تمرکز	روش پژوهش	مؤلفه‌های اقتصاد چرخشی	نوع فناوری	شکاف پژوهشی
روزا و همکاران (۲۰۲۰)	بررسی روابط اقتصاد چرخشی و صنعت ۴٫۰	مرور نظام‌مند ادبیات	بازتولید، بازیافت، استفاده‌مجدد،	سیستم‌های سایبر، فیزیکی، اینترنت اشیاء، شبیه‌سازی، تولیدافزودنی، تجزیه‌وتحلیل کلان داده	تمرکز بر رابطه اقتصاد چرخشی و صنعت ۴٫۰، عدم توجه به ابعاد عملکرد پایدار (اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی)، فاقد چارچوب جامع بهبود عملکرد پایدار
گودینیو فیلهو و همکاران (۲۰۲۲)	رابطه بین صنعت ۴٫۰ و اقتصاد چرخشی و عملکرد زنجیره تأمین	مرور نظام‌مند ادبیات، مدل‌سازی ساختاری-تفسیری	استفاده مجدد، بازیافت، بازتولید	اینترنت اشیاء، محاسبات‌ابری تجزیه‌وتحلیل کلان داده‌ها	بررسی روابط ساختاری؛ فاقد چارچوب جامع بهبود عملکرد پایدار
پتیال و همکاران (۲۰۲۲)	نقشه‌برداری ارتباطات بین صنعت ۴٫۰، اقتصاد چرخشی و پایداری برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار(SDGs)	مرور نظام‌مند ادبیات	کاهش، بازیافت، استفاده مجدد، تعمیر، نوسازی، بازتولید، بازیابی، بازاندیشی	اینترنت اشیا، تحلیل داده‌های بزرگ، رایانش ابری، رباتیک خودکار، تولید افزودنی، سیستم‌های سایبرفیزیکی، واقعیت افزوده	استفاده صرف از پایگاه داده Scopus؛ فاقد چارچوب جامع بهبود عملکرد پایدار
هان و همکاران (۲۰۲۳)	نقش فناوری‌های دیجیتال در سه مرحله	مرور نظام‌مند ادبیات	استفاده مجدد بازیافت	اینترنت اشیا، هوش مصنوعی	محدود به مراحل طراحی، استفاده و بازیابی؛ فاقد چارچوب جامع

نویسنده و سال	حوزه تمرکز	روش پژوهش	مؤلفه‌های اقتصاد چرخشی	نوع فناوری	شکاف پژوهشی
	اصلی چرخه عمر محصول (سیستم اشتراک دوچرخه در چین)			محاسبات ابری، پرینت سه‌بعدی تجزیه‌وتحلیل کلان داده‌ها	بهبود عملکرد پایدار
کمبل و گوناسه‌کاران (۲۰۲۳)	نقش فناوری‌های صنعت ۴,۰ و شیوه‌های اقتصاد چرخشی در عملکرد پایدار	مدل‌سازی معادلات ساختاری	بازیابی	پردازش ابری، رباتیک، تجزیه‌وتحلیل کلان داده‌ها، واقعیت‌افزوده، سیستم‌های سایبر فیزیکی، پرینت سه‌بعدی	تمرکز بر اعتبارسنجی تجربی؛ عدم استخراج شاخص‌ها و فرایندها و عدم توجه به بعد زیست‌محیطی
مگنانو و همکاران (۲۰۲۴)	اقتصاد چرخشی و عملکرد پایدار (صنعت الکترونیک تایلند)	مرور نظام‌مند ادبیات	بازیافت، بازتولید	اینترنت‌اشیاء، هوش‌مصنوعی، تجزیه‌وتحلیل کلان داده‌ها، بلاک‌چین	عدم تمرکز بر نقش فناوری‌های صنعت ۴,۰
دی و همکاران (۲۰۲۴)	بررسی اثرات هم‌افزایانه اقتصاد چرخشی، فناوری صنعت ۴,۰ و مدیریت منابع انسانی سبز بر عملکرد پایدار در شرکت‌های هندی	مدل‌سازی معادلات ساختاری	کاهش، بازیافت استفاده‌مجدد	اینترنت اشیاء، سیستم‌های سایبر فیزیکی، رباتیک پیشرفته ، سیستم‌های امنیت سایبری	تمرکز بر مدیریت منابع انسانی؛ فاقد چارچوب جامع بهبود عملکرد پایدار
السعودی و همکاران (۲۰۲۵)	بررسی نقش فناوری‌های صنعت ۴,۰ در تقاطع اقتصاد چرخشی و عملکرد پایدار	مرور نظام‌مند ادبیات	کاهش	تجزیه‌وتحلیل کلان داده‌ها اینترنت اشیا، بلاک‌چین	توجه ناکافی به بعد اجتماعی، عدم جامعیت اصول اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ فاقد چارچوب جامع بهبود عملکرد پایدار
پژوهش حاضر	تلفیق فناوری‌های صنعت ۴,۰ و اصول اقتصاد چرخشی برای بهبود عملکرد پایدار	مرور نظام‌مند ادبیات و فراترکیب	10R	۱۲ فناوری	ارائه چارچوب مفهومی سیستمی، فرایندمحور و عملیاتی؛ سازمان‌دهی شاخص‌ها در پنج فرایند (تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع و استفاده، نگهداری)؛ تبیین نقش فناوری‌های صنعت ۴,۰ به‌عنوان توانمندساز اجرای R10 برای ارتقای هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی عملکرد پایدار

شکاف پژوهش

بررسی مبانی نظری و پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که پژوهش‌های حوزه تعامل عملکرد پایدار، اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰ در چند سال اخیر رشد قابل‌توجهی داشته است. بااین‌حال، شکاف‌های مهمی همچنان وجود دارد:

بیشتر مطالعات موجود یا بر روابط علی و همبستگی میان متغیرهای کلان متمرکز بوده‌اند یا به‌صورت مروری، به شناسایی فناوری‌ها و اصول پرداخته‌اند و کمتر به ارائه چارچوب‌های مفهومی عملیاتی و فرایندمحور اقدام کرده‌اند.

۱. علی‌رغم تأکید بر اهمیت عملکرد پایدار، بسیاری از مطالعات به‌طور هم‌زمان به هر سه بعد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی نپرداخته‌اند و غالباً بر ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی تمرکز داشته‌اند.

۲. رویکرد سیستمی و یکپارچه‌ای که تعامل پویای اصول اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ را در قالب فرایندهای اصلی زنجیره تأمین (شامل تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع و مصرف و نگهداری) تبیین کند، در ادبیات موجود به‌ندرت مشاهده می‌شود.

۳. علی‌رغم اهمیت شاخص‌های عملکرد پایدار، مطالعه‌ای که به‌طور نظام‌مند این شاخص‌ها را از دل ادبیات استخراج و در یک چارچوب منسجم طبقه‌بندی کرده باشد، در دسترس نیست.

روش‌شناسی تحقیق F۲۳[1]

پژوهش حاضر ازنظر هدف، کاربردی و ازنظر ماهیت، یک مرور نظام‌مند ادبیات F۲۴[2] مبتنی بر رویکرد فراترکیب کیفی F۲۵[3] است. شایان‌ذکر است که مرور نظام‌مند و فراترکیب دو رویکرد مکمل هستند. مرور نظام‌مند به‌عنوان روش جست‌وجو، غربالگری و انتخاب نظام‌مند مقالات بر اساس پروتکل مشخص (شامل معیارهای ورود و خروج، پایگاه‌های داده، کلیدواژه‌ها و بازه زمانی) به کار رفته است تا از سوگیری در انتخاب مقالات جلوگیری کرده و شفافیت و قابلیت تکرارپذیری پژوهش را تضمین نماید. فراترکیب نیز به‌عنوان روش تحلیل و ترکیب یافته‌های کیفی مقالات منتخب استفاده شده است تا امکان استخراج کدها، مفاهیم و شاخص‌ها از دل متون و سپس ترکیب آن‌ها در قالب یک چارچوب مفهومی جدید فراهم آید. این رویکرد تلفیقی باهدف تجمیع، تحلیل و یکپارچه‌سازی دانش پراکنده موجود درباره نقش هم‌افزایی اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ در بهبود عملکرد پایدار به کار گرفته‌شده و امکان استخراج ساخت‌یافته مفاهیم،

1. method
2 Systematic Literature Review
3 Meta-Synthesis

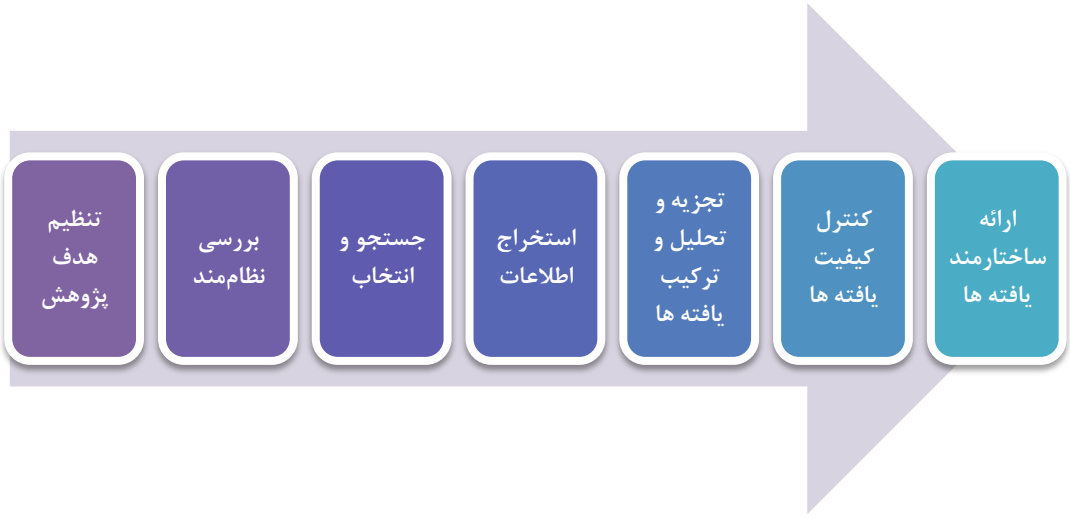
معیارها و شاخص‌ها را فراهم می‌کند.

در راستای روش‌شناسی پژوهش از روش هفت مرحله‌ای سندلووسکی و باروسو (۲۰۰۷) استفاده شده است که این مراحل در شکل ۱ نشان داده شده است(Sandelowski 2007).

هدف اصلی این مرور سیستماتیک:

- استخراج جامع شاخص‌های عملکرد پایدار، اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ مرتبط
- نگاشت آن‌ها به پنج فرایند عملکرد پایدار
- تحلیل نقش اصول اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ در هر فرایند

شکل ۱: روش هفت مرحله‌ای سندولوسکی و باروسو (۲۰۰۷)



یافته‌ها

در **گام اول** تنظیم مؤلفه‌های پژوهش که بر اساس سؤال اصلی پژوهش شکل گرفته است، می‌باشد. این بررسی با سؤال اصلی تحقیق که مدل بهبود عملکرد پایدار مبتنی بر اصول اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ چگونه می‌باشد در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: مؤلفه‌های پژوهش

مؤلفه‌ها	سؤالات	پاسخ
چه چیزی	شاخص‌های عملکرد پایدار که در ادبیات برای پیاده‌سازی هم‌زمان اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰ شناسایی شده‌اند، کدام‌اند؟	شناسایی ابعاد و مؤلفه‌های تحقیق بر اساس پیشینه تحقیق
چه منابعی	منابع علمی موردمطالعه برای دستیابی به ابعاد، مؤلفه‌ها و شاخص‌های تحقیق کدام است؟	در گام اول پایگاه‌های علمی و در مرحله بعد اساتید دانشگاه و خبرگان حوزه عملکرد پایدار،

مؤلفه‌ها	سؤالات	پاسخ
		اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰
چه زمانی	مطالعات منتخب در چه دوره زمانی موردبررسی قرار گرفتند؟	۲۰۱۵ الی ۲۰۲۶
چگونه	داده‌های موردنظر تحقیق چگونه جمع آوری شده‌اند؟	روش تحلیل اسنادی، مقالات و کدگذاری آن‌ها

در **گام دوم**، به بررسی نظام‌مند متون منابع علمی پژوهش، کلیه اسناد علمی، گزارش‌های پژوهشی، پایگاه‌های داده، مجلات داخلی و خارجی در خصوص عملکرد پایدار، اصول اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰ مرتبط با سؤال پژوهش پرداخته شد.

برای شناسایی مطالعات مرتبط، جست‌وجوی نظام‌مند در پایگاه‌های معتبر بین‌المللی نظیر Scopus، Web of Science، ScienceDirect و پایگاه‌های مکمل انجام شده است. در این جست‌وجو از ترکیبی از کلیدواژه‌ها در سه خوشه اصلی استفاده شده است: صنعت ۴,۰ و فناوری‌های دیجیتال مرتبط، اقتصاد چرخشی و پایداری/عملکرد پایدار. برای کاهش سوگیری، جست‌وجو در عنوان، چکیده و کلیدواژه‌ها صورت گرفته و ترکیب کلیدواژه‌ها با استفاده از عملگرهای منطقی AND و OR انجام شده است که در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ٤: کلیدواژه‌های جستجوی منابع

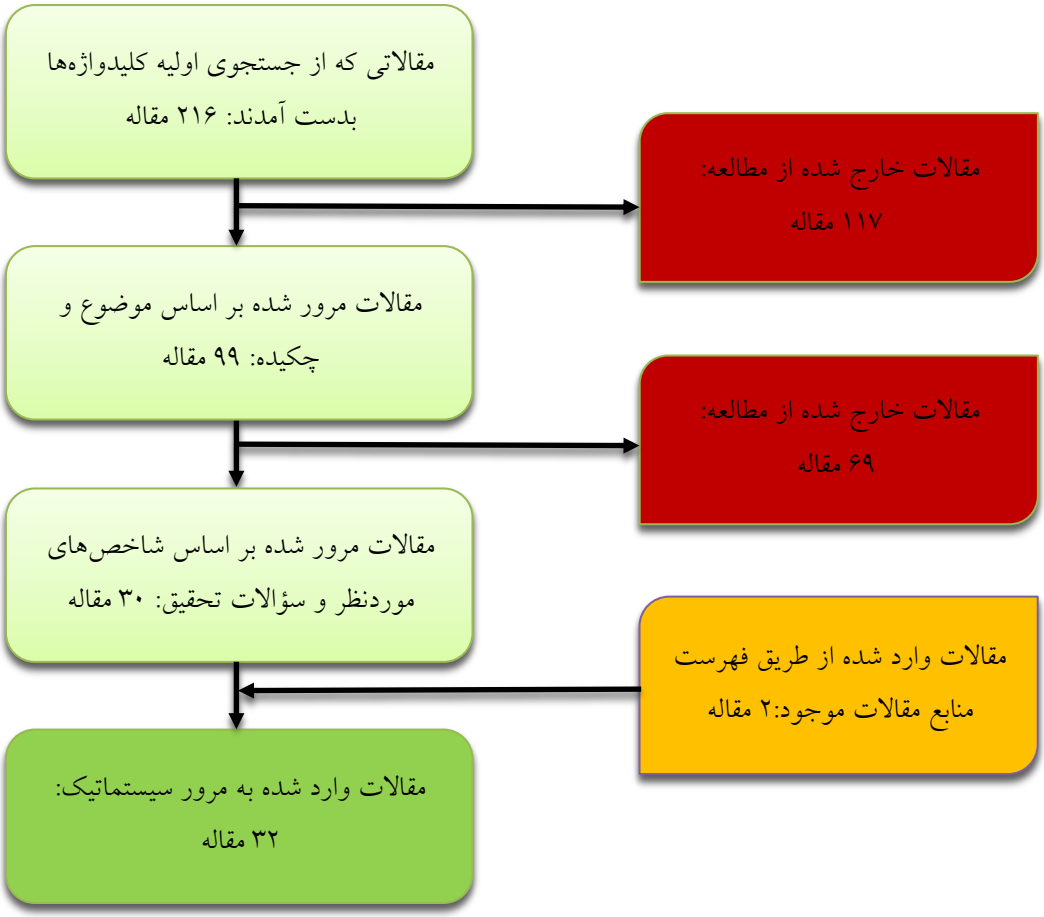
خوشه ۱: صنعت ۴,۰ و فناوری‌های مرتبط
"Industry 4.0" OR "Fourth industrial revolution" "digitalization" OR "digital transformation" "cyber،physical systems" OR CPS " IoT"Internet of Things" OR " "Big data analytics" OR "big data" " AI"Artificial intelligence" OR" "Additive manufacturing" OR "3D printing" "blockchain" "Cloud computing" OR "edge computing"
خوشه ۲: اقتصاد چرخشی
"Circular economy" OR "circularity" "Closed،loop supply chain" "Reverse logistics" remanufacturing OR reuse OR repair OR refurbish OR recycle
خوشه ۳: پایداری و عملکرد پایدار
sustainability OR "sustainable development" "Sustainable performance"

"Triple bottom line" OR TBL "Environmental performance" OR "economic performance" OR "social performance" "Sustainable manufacturing" OR "green manufacturing" OR "sustainable operations"

این ترکیب‌ها بسته به پایگاه داده و محدودیت‌های جست‌وجو اندکی اصلاح شده‌اند.

در **گام سوم**، غربالگری انجام شده است. نتیجه جستجوی پایگاه‌های اطلاعاتی همانند Scopus، Web of Science، ScienceDirect منجر به دستیابی ۲۱۶ مقاله شده است. علاوه بر موارد فوق مقالات کیفی فارسی مرتبط با سؤال تحقیق که توسط نشریات دارای اعتبار علمی و پژوهشی در ۱۰ سال اخیر چاپ شده‌اند از طریق پایگاه‌های داده شامل سیویلیکا، مگ ایران و اس ای دی با توجه به شاخص‌های دسترسی و به دلیل پوشش تمامی مطالب غیرتکراری به‌منظور شناسایی و گردآوری مطالعات مختلف مورد جستجوی قرار گرفته است. در این مرحله بر اساس معیارهای ورود و خروج ۳۲ مقاله مطابق شکل ۲ به‌عنوان مقالات نهایی انتخاب گردیده‌اند.

شکل ۲: غربالگری و انتخاب مطالعات



معیارهای ورود و خروج

معیارهای ورود:

- مقالات منتشرشده در مجلات علمی داوری‌شده (و در صورت لزوم، برخی مقالات کنفرانسی معتبر).
- مطالعاتی که حداقل به یکی از ترکیب‌های زیر پرداخته‌اند:
  - صنعت ۴,۰ و اقتصاد چرخشی
  - اقتصاد چرخشی و پایداری/عملکرد پایدار
  - صنعت ۴,۰ و پایداری/عملکرد پایدار
- و ترجیحاً آن دسته از مطالعاتی که هر سه مفهوم را به‌صورت هم‌زمان بررسی نموده‌اند.
- مقالات به زبان انگلیسی (و در صورت نیاز، فارسی) در بازه زمانی مشخص (۲۰۲۶،۲۰۱۵).

معیارهای خروج:

- مقالات غیرعلمی، گزارش‌های خبری، سرمقاله‌ها و یادداشت‌های بدون ساختار پژوهشی.
- مطالعاتی که صرفاً یکی از مفاهیم صنعت ۴,۰، اقتصاد چرخشی یا پایداری را بدون ارتباط معنادار با دو مفهوم دیگر و بدون اشاره به اثر بر عملکرد بررسی کرده‌اند.
- مطالعات خارج از حوزه تولید و زنجیره تأمین، مگر آنکه رابطه روشنی با پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ در زمینه پایداری نشان داده باشند.
- نسخه‌های تکراری (در این حالت، نسخه کامل‌تر یا ژورنالی نگه داشته می‌شود).

در **گام چهارم**، اطلاعات هر یک از مقالات منتخب شامل نام نویسندگان، سال انتشار، موضوع و کلیدواژه‌ها استخراج و به‌صورت طبقه‌بندی‌شده ثبت شد. سپس مقالات بر اساس روش ارزیابی مقایسه‌ای منابع، مورد غربال و ارزشیابی قرار گرفتند.

به‌منظور سنجش کیفیت، اعتبار و اهمیت مطالعات، از ابزار CASP26F[1] استفاده شد. این ارزیابی توسط پژوهشگر با مشارکت اعضای تیم و کارشناسان خبره انجام گرفت. بر اساس ارزیابی انجام‌شده، ۳۲ مقاله از حداقل کیفیت قابل‌قبول برای ورود به مرحله تحلیل برخوردار بودند و همگی برای فرایند کدگذاری و فراترکیب تأیید شدند.

در **گام پنجم**، یافته‌های استخراج‌شده از مطالعات منتخب با استفاده از رویکرد فراترکیب تحلیل و تلفیق شدند. هدف فراترکیب، توسعه تفسیرهای عمیق‌تر و شکل‌دهی به روایت یا چارچوبی جامع‌تر از دانش موجود است. فرایند این مرحله شامل استخراج اولیه داده‌ها، ورود داده‌ها به فراترکیب و تحلیل نهایی آن‌ها

1 Critical appraisal skills program

بود.

مقالات منتخب به‌صورت مکرر و نظام‌مند مرور شدند تا مفاهیم درون‌متنی مرتبط با عملکرد پایدار، اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰ استخراج شود. تمامی داده‌ها ابتدا از طریق کدگذاری باز تحلیل شدند؛ بدین ترتیب عبارات و شاخص‌های کلیدی به‌عنوان کدهای اولیه شناسایی و سپس در قالب مفاهیم و زیرمؤلفه‌ها دسته‌بندی شدند.

در ادامه، با استفاده از کدگذاری محوری، کدهای استخراج‌شده بر اساس شباهت مفهومی، روابط معنادار و جایگاه آن‌ها در چرخه ارزش سازمانی سازمان‌دهی شدند. این مرحله شامل سه اقدام اصلی بود:

- ادغام کدهای هم‌معنا یا هم‌پوشان
- تفکیک کدهای مرکب به مفاهیم مجزا
- تخصیص هر کد به یکی از پنج فرایند اصلی سازمانی (تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع، مصرف و نگهداری)

برای درک بهتر فرایند کدگذاری محوری، در ادامه (جدول ۵) یک نمونه عملی از نحوه تبدیل کدهای باز به شاخص‌های نهایی ارائه شده است:

مثال: شاخص «طراحی برای افزایش طول عمر محصول»

جدول ۵: فراترکیب و کدگذاری داده‌ها

بعد	معیار	شاخص نهایی	تحلیل مفهومی و اقدام انجام‌شده	کدهای باز استخراج‌شده از منابع
طراحی و توسعه	طراحی باثبات	طراحی برای افزایش طول عمر محصول	طراحی برای افزایش طول عمر محصول	طراحی برای افزایش طول عمر محصول
			در شاخص «طراحی برای افزایش طول عمر محصول» ادغام شد	طراحی برای عمر طولانی
			در شاخص «طراحی برای افزایش طول عمر محصول» ادغام شد	طراحی برای قابلیت اطمینان
			در شاخص «طراحی برای افزایش طول عمر محصول» ادغام شد	طراحی بادوام محصول
			در شاخص «طراحی برای افزایش طول عمر محصول» ادغام شد	افزایش طول عمر محصول

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، پنج کد باز مجزا از منابع مختلف، همگی بر یک مفهوم مشترک یعنی «افزایش طول عمر محصول» از طریق طراحی دلالت دارند. این کدها شامل مفاهیمی مانند طراحی برای افزایش طول عمر محصول، طراحی برای عمر طولانی، طراحی برای قابلیت اطمینان، طراحی بادوام محصول و افزایش طول عمر محصول هستند. در فرایند کدگذاری محوری، این کدهای هم‌معنا و هم‌پوشان در قالب یک شاخص واحد با عنوان «طراحی برای افزایش طول عمر محصول» ادغام شدند. این شاخص درنهایت در ذیل معیار «طراحی باثبات» و بعد کلان «طراحی و توسعه» طبقه‌بندی گردید.

این رویه برای تمام ۴۰۷ کد اولیه به‌صورت نظام‌مند اجرا گردید و درنهایت منجر به استخراج ۴۹ شاخص نهایی در قالب ۳۳ معیار و ۵ بعد اصلی عملکرد پایدار شد.

درنهایت مقالات مطالعه شده در حوزه عملکرد پایدار، اقتصاد چرخشی، صنعت ۴,۰ از طریق کلیدواژه‌های جدول ۳ بررسی‌شده و بخشی از مهم‌ترین آن‌ها در جدول ۶ (پیوست ۱) آمده است که ابعاد فرایند عملکرد پایدار، معیارها، شاخص‌ها، اصول CE، فناوری I4.0 و ابعاد پایداری همسو با اهداف پژوهش را نشان می‌دهد.

در **گام ششم**، به‌منظور سنجش پایایی مدل و کنترل کیفیت کدگذاری، از شاخص کاپای کوهن استفاده شد. در این راستا، یک خبره مستقل در حوزه مدیریت و عملکرد پایدار، بدون اطلاع از نحوه ادغام و دسته‌بندی کدها توسط پژوهشگر، اقدام به گروه‌بندی مفاهیم نمود. سپس نتایج وی با دسته‌بندی پژوهشگر مقایسه شد.

یافته‌ها نشان داد پژوهشگر ۳۳ گروه و خبره ۳۰ گروه شناسایی کرده‌اند که ۲۹ گروه میان آن‌ها مشترک بوده است. بر اساس محاسبات انجام‌شده در نرم‌افزار اکسل، مقدار شاخص کاپای کوهن برابر با ۰,۸۴۷ به دست آمد که بیانگر سطح توافق قوی و معتبر است؛ بنابراین پایایی مدل مورد تأیید قرار گرفت.

$$\text{توافقات مشاهده شده} = \frac{A+D}{N} = \frac{20}{25} = 0/852941176$$

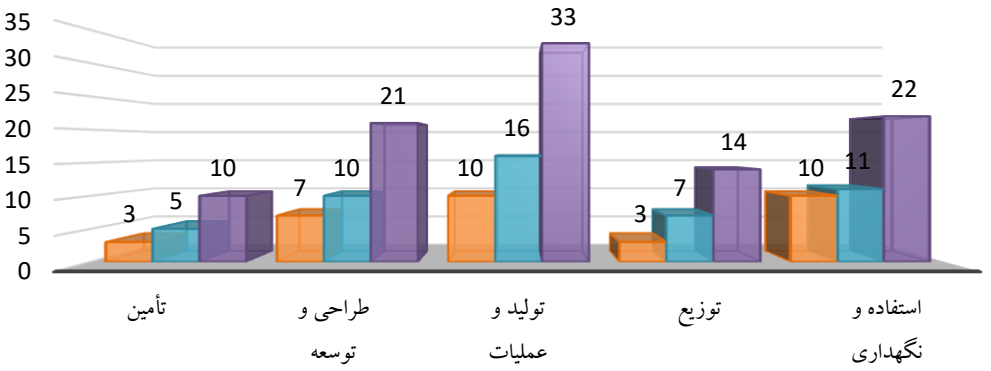
$$\text{توافقات احتمالی} = \frac{A+B}{N} \times \frac{A+C}{N} \times \frac{C+D}{N} \times \frac{B+D}{N} = 0/002963$$

$$K = \frac{\text{توافقات مشاهده شده} - \text{توافقات احتمالی}}{1 - \text{توافقات احتمالی}} = 0/847014523$$

در مرحله نهایی، با تلفیق نظام‌مند یافته‌های پیشین، چارچوب مفهومی جامعی طراحی شد که نحوه تعامل اقتصاد چرخشی (CE) و فناوری‌های صنعت ۴,۰ (I4.0) را در ارتقای عملکرد پایدار در قالب یک رویکرد فرایندمحور تبیین می‌کند.

این چارچوب بر پایه تحلیل ۴۰۷ کد اولیه استخراج‌شده از ۳۲ مقاله منتخب و تلخیص آن‌ها در قالب ۴۹ شاخص کلیدی شکل گرفت. شاخص‌های نهایی در پنج فرایند اصلی عملکرد پایدار شامل تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع و مصرف و نگهداری سازمان‌دهی شدند. توزیع کمی این مؤلفه‌ها در نمودار ۳ ارائه شده است.

شکل ۳: توزیع کمی مؤلفه‌های پژوهش



	تأمین	طراحی و توسعه	تولید و عملیات	توزیع	استفاده و نگهداری
تعداد معیارهای اصلی	۳	7	10	3	10
تعداد شاخص‌های کلیدی نهایی	5	10	16	7	11
سهم از کل شاخص‌ها(درصد)	10	21	33	14	22

نمودار ۳ نشان می‌دهند، تمرکز غالب بر فرایند «تولید و عملیات» است. این فرایند با ۱۶ شاخص (۳۲,۷٪)، بیشترین سهم را به خود اختصاص داده است. این یافته مؤید آن است که ادبیات موجود عمدتاً بر بهینه‌سازی مرحله تولید متمرکز بوده و فناوری‌های صنعت ۴,۰ مانند اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی و رباتیک بیشتر در خدمت کارایی منابع، کاهش ضایعات و هوشمندسازی تولید قرار گرفته‌اند.

فرایند «مصرف و نگهداری» با ۱۱ شاخص (۲۲,۴٪)، دومین فرایند ازنظر تراکم شاخص‌ها است. این یافته حاکی از اهمیت روزافزون مدل‌های خدماتی، نگهداری هوشمند و تعامل با مشتری در طولانی‌ترین مرحله چرخه عمر محصول است. داده‌های تولیدشده در این مرحله به‌عنوان بازخوردی ارزشمند برای بهبود طراحی و تولید عمل می‌کنند.

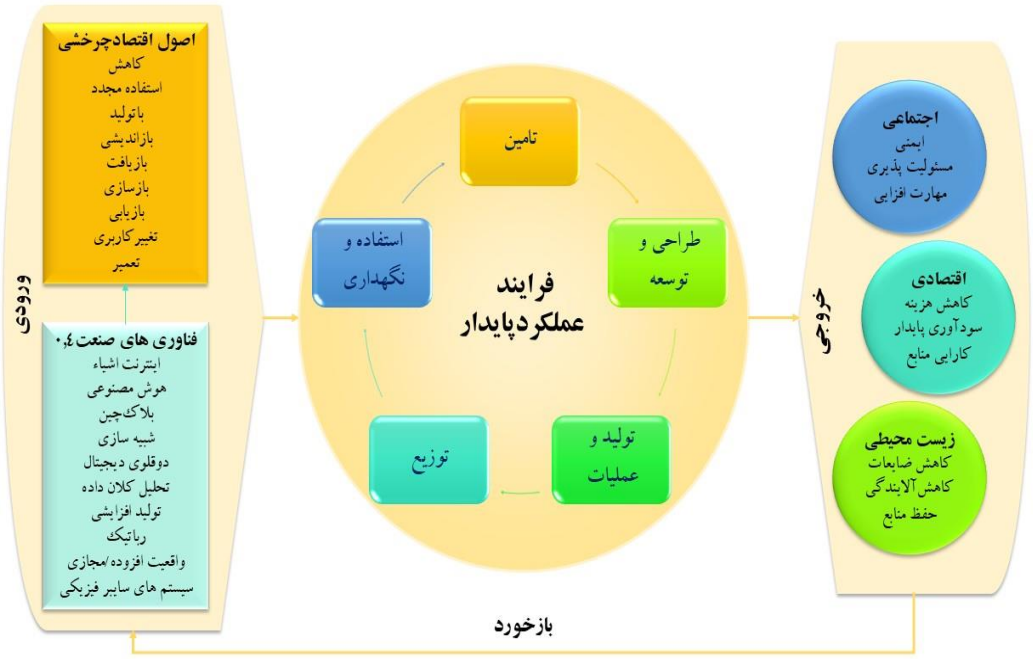
فرایند «طراحی و توسعه» با ۱۰ شاخص (۲۰,۴٪) در رتبه سوم قرار دارد. این موضوع نشان‌دهنده توجه فزاینده به نقش راهبردی طراحی در قفل‌کردن قابلیت چرخشی محصولات (طراحی برای کاهش، تعمیر، بازیافت و ارتقاء) است. بااین‌حال، با توجه به ماهیت پیش‌دستانه این فرایند، انتظار می‌رفت سهم آن بیشتر از این باشد.

فرایندهای بالادستی و پایین‌دستی کمتر توسعه‌یافته: فرایند «تأمین» با ۵ شاخص (۱۰,۲٪) و فرایند «توزیع» با ۷ شاخص (۱۴,۳٪)، کمترین تعداد شاخص‌ها را دارند. این عدم توازن، یک شکاف پژوهشی مهم را آشکار می‌سازد. علی‌رغم اهمیت حیاتی تأمین سبز، یکپارچگی دیجیتال با تأمین‌کنندگان و لجستیک معکوس هوشمند در بستن حلقه چرخشی، این حوزه‌ها کمتر مورد کاوش قرار گرفته‌اند.

درمجموع، نمودار ۳ بازتاب‌دهنده تمرکز غالب ادبیات بر مراحل عملیاتی و میانی چرخه عمر (تولید) است، درحالی‌که مراحل راهبردی اولیه (تأمین) و مراحل پایانی (توزیع) باوجود پتانسیل بالای خود برای ایجاد تحول چرخشی، از توسعه شاخص‌های کمتری برخوردار بوده‌اند.

هدف نهایی این گام، تبدیل داده‌های پراکنده به یک الگوی منسجم است که بتواند به‌عنوان نقشه راهی برای محققان، مدیران و سیاست‌گذاران عمل کند. در این راستا، با بهره‌گیری از تکنیک‌های کدگذاری نظریه زمینه‌ای (پارادایمی)، مقوله‌های اصلی و فرعی شناسایی و از طریق سیستمی بین آن‌ها ترسیم گردید. خروجی این فرایند، مدل پارادایمی پنج‌فرایندی بهبود عملکرد پایدار مبتنی بر اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰ است (شکل ۴).

شکل ٤: چارچوب مفهومی بهبود عملکرد با پارادایم‌های تعاملی اقتصاد چرخشی و صنعت ٤,٠



این چارچوب مفهومی نشان می‌دهد که دستیابی به عملکرد پایدار تنها از طریق تمرکز بر یک مرحله (مانند تولید) محقق نمی‌شود، بلکه نیازمند نگاهی یکپارچه و چرخه‌ای به تمامی مراحل عملکرد پایدار است. در این مدل، فناوری‌های صنعت ۴,۰ عمدتاً در نقش توانمندساز F۲۷[1] ظاهر می‌شوند که اجرای مؤثر اصول ده‌گانه اقتصاد چرخشی را در هر فرایند ممکن می‌سازند. این چارچوب، افزون بر نمایش جریان مواد، اطلاعات و ارزش، بر ضرورت درنظرگیری توأمان ابعاد سه‌گانه پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی) در هر فرایند تأکید دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش باهدف تبیین سازوکار بهبود عملکرد پایدار در بستر تعامل اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰، به توسعه چارچوبی مفهومی و فرایندمحور دست یافته است. در این مسیر، با مرور سیستماتیک ادبیات و به‌کارگیری رویکرد فراترکیب، ۴۹ شاخص عملکردی در قالب ۳۳ معیار و پنج فرایند اصلی سازمان‌دهی شدند. یافته‌ها نشان داد که فناوری‌های صنعت ۴,۰ به‌عنوان توانمندسازهای اجرای اصول ده‌گانه اقتصاد چرخشی، از طریق بازآرایی پنج فرایند سازمانی (تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع و مصرف و نگهداری) به ارتقای هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی عملکرد پایدار منجر

1 Enabler

می‌شوند. در ادامه، به‌ترتیب به پاسخ سؤالات پژوهش، تبیین نوآوری‌ها، محدودیت‌ها و توصیه‌های کاربردی پرداخته می‌شود.

پاسخ به سؤالات پژوهش

سؤال اول: شاخص‌های عملکرد پایدار مرتبط با پیاده‌سازی هم‌زمان اقتصاد چرخشی و صنعت ۴٫۰ کدام‌اند؟

بر اساس جدول ۵، شاخص‌های کلیدی عملکرد پایدار در پنج فرایند اصلی شناسایی شده‌اند.

سؤال دوم: شاخص‌ها از طریق فراترکیب و کدگذاری نظام‌مند چگونه به شکل‌گیری یک چارچوب فرایندمحور برای عملکرد پایدار منجر می‌شوند؟

چارچوب فرایندمحور در سه مرحله شکل گرفته است: کدگذاری باز (استخراج ۴۰۷ کد اولیه)، کدگذاری محوری (سازمان‌دهی کدها در قالب ۴۹ شاخص و ۳۳ معیار و تخصیص آن‌ها به پنج فرایند) و کدگذاری انتخابی (طبقه‌بندی نهایی شاخص‌ها). این روش‌شناسی نشان می‌دهد عملکرد پایدار مفهومی انتزاعی نیست، بلکه از طریق شاخص‌های عینی در سطح فرایندها قابل تحقق است. برخلاف مطالعات پیشین که بر روابط علّی یا مرور ادبیات متمرکز بوده‌اند، این چارچوب نقشه‌راهی عملیاتی برای بهبود عملکرد پایدار ارائه می‌دهد.

سؤال سوم: چارچوب فرایندمحور ساخته‌شده، چگونه از طریق هم‌پوشانی مفهومی، روابط میان شاخص‌های عملکرد پایدار، اصول اقتصاد چرخشی (R۱۰) و فناوری‌های صنعت ۴٫۰ را تبیین می‌کند؟

تحلیل نتایج نشان می‌دهد فناوری‌های صنعت ۴٫۰ زمانی بیشترین اثرگذاری را دارند که در خدمت اجرای هدفمند اصول R ۱۰ قرار گیرند و در بستر فرایندهای سازمانی بازآرایی شوند. در فرایند تأمین، قابلیت‌هایی مانند اینترنت اشیا، بلاک‌چین و ردیابی دیجیتال با اصولی نظیر کاهش مصرف منابع، استفاده از مواد بازیافتی، بازیابی و بازچرخانی هم‌افزا شده و شفافیت جریان مواد، ارزیابی عملکرد تأمین‌کنندگان و کنترل ریسک‌های زیست‌محیطی را امکان‌پذیر می‌سازند. این هم‌افزایی به کاهش هزینه‌های تأمین، جلوگیری از اتلاف منابع، بهبود بهره‌وری اقتصادی و کاهش اثرات زیست‌محیطی منجر می‌شود و از طریق افزایش شفافیت و پاسخ‌گویی، پیامدهای اجتماعی مثبتی نیز ایجاد می‌کند.

در فرایند طراحی و توسعه، تحلیل کلان‌داده، هوش مصنوعی و مدیریت چرخه عمر دیجیتال در تعامل با اصول طراحی برای تعمیرپذیری، بازسازی، بازتولید، ارتقاء و کاهش مصرف مواد و انرژی، به شکل‌گیری طراحی سبز داده‌محور مبتنی بر چرخه عمر منجر می‌شود. داده‌های استخراج‌شده از مرحله مصرف و نگهداری به‌عنوان بازخورد تحلیلی به تیم‌های طراحی بازمی‌گردد و امکان بازپیکربندی ساختار

محصول، افزایش ماژولار بودن، تسهیل جداسازی و افزایش طول عمر را فراهم می‌کند. پیامد این بازآرایی، کاهش هزینه‌های چرخه عمر، محدود شدن استخراج منابع، کاهش پسماند و افزایش رضایت و دسترس‌پذیری خدمات برای کاربران است که به‌صورت هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی عملکرد پایدار را تقویت می‌کند.

در فرایند تولید و عملیات، سیستم‌های سایبرفیزیکی، نگهداری پیش‌بینانه، اتوماسیون هوشمند و تحلیل بلادرنگ داده‌ها در تعامل با اصول کاهش مصرف منابع، کاهش ضایعات و بهینه‌سازی استفاده از انرژی، به افزایش بهره‌وری تجهیزات، کاهش توقفات ناخواسته و بهبود کیفیت محصول منجر می‌شوند. این تحولات ضمن کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بازده سرمایه، شدت مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها را کاهش داده و از طریق ارتقای ایمنی، سلامت و مهارت کارکنان، بعد اجتماعی عملکرد پایدار را نیز تقویت می‌کند.

در فرایند توزیع، تحلیل داده‌های حمل‌ونقل، مسیریابی هوشمند و مدیریت دیجیتال جریان کالا در کنار اصل کاهش انتشار و بهینه‌سازی جریان محصول، به کاهش مصرف سوخت، کاهش ردپای کربن و افزایش کارایی لجستیکی منجر می‌شود. این امر نه‌تنها هزینه‌های توزیع و زمان تحویل را کاهش می‌دهد، بلکه اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های لجستیکی را محدود کرده و کیفیت خدمات‌رسانی به مشتریان را ارتقا می‌بخشد.

در فرایند مصرف و نگهداری، پایش بلادرنگ عملکرد محصول، تحلیل الگوهای مصرف و ردیابی دیجیتال در پایان عمر در تعامل با اصول افزایش طول عمر، استفاده مجدد، بازسازی، بازتولید و بازیافت، امکان حفظ ارزش محصول در چرخه‌های متوالی بهره‌برداری را فراهم می‌سازد. این سازوکار به کاهش نیاز به مواد اولیه جدید، کاهش تولید پسماند، بازیابی ارزش اقتصادی دارایی‌های برگشتی و توسعه مدل‌های کسب‌وکار خدمات‌محور منجر می‌شود و هم‌زمان از طریق ارتقای آگاهی مصرف‌کنندگان و مسئولیت‌پذیری سازمانی، بعد اجتماعی عملکرد پایدار را تقویت می‌کند.

بدین‌ترتیب، روش‌شناسی اتخاذشده (مرور نظام‌مند و فراترکیب) با استخراج نظام‌مند ۴۹ شاخص از ۳۲ مقاله و سازمان‌دهی آن‌ها در پنج فرایند، امکان ارائه چارچوبی را میسر ساخت که در آن رابطه میان فناوری‌های صنعت ۴٫۰، اصول اقتصاد چرخشی و ابعاد عملکرد پایدار به‌صورت سیستمی تبیین شده است. این هم‌سویی میان روش‌شناسی و نتیجه‌گیری، اعتبار یافته‌ها را افزایش می‌دهد و نشان می‌دهد که چارچوب ارائه‌شده برآیندی از تحلیل داده‌های پراکنده ادبیات است و نه مدلی از پیش‌تعیین‌شده.

چارچوب مفهومی این پژوهش نشان می‌دهد که تحقق عملکرد پایدار نه نتیجه استقرار منفرد فناوری‌های صنعت ۴٫۰ است و نه صرفاً اجرای اصول اقتصاد چرخشی، بلکه حاصل هم‌افزایی راهبردی

این دو در بستر فرایندهای سازمانی محسوب می‌شود. چنین هم‌افزایی زمانی به حداکثر اثربخشی می‌رسد که سازمان‌ها بتوانند پنج فرایند کلیدی خود را بر اساس اولویت‌های صنعت خویش بازآرایی کنند و فناوری‌های مناسب را برای پیاده‌سازی اصول R۱۰ در هر فرایند به‌کار گیرند.

نوآوری پژوهش

نوآوری پژوهش در ارائه چارچوبی مفهومی، سیستمی و فرایندمحور برای بهبود عملکرد پایدار است که برخلاف مطالعات پیشین، شاخص‌های عملکرد پایدار را در قالب پنج فرایند عینی سازمانی دسته‌بندی کرده و سازوکار تحقق عملی آن را از طریق تبیین نحوه تعامل فناوری‌های صنعت ۴٫۰ به‌عنوان توانمندساز اصول ده‌گانه اقتصاد چرخشی تشریح می‌کند. این چارچوب با تحلیل ۴۰۷ کد اولیه از ۳۲ مقاله معتبر استخراج‌شده و نشان می‌دهد چگونه بازآرایی پنج فرایند سازمانی در جهت هم‌افزایی اقتصاد چرخشی و صنعت ۴٫۰، به بهبود هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی عملکرد پایدار منجر می‌شود. همچنین این پژوهش با ارائه نقشه‌راهی عملیاتی، به مدیران و سیاست‌گذاران نشان می‌دهد که در هر یک از پنج فرایند زنجیره تأمین، از چه ترکیبی از فناوری‌های صنعت ۴٫۰ و اصول اقتصاد چرخشی برای بهبود عملکرد پایدار استفاده کنند.

پیشنهادها

بر اساس یافته‌های پژوهش و با توجه به شکاف‌های شناسایی‌شده در ادبیات، پژوهشگران آینده می‌توانند در مسیرهای زیر به تحقیق بپردازند:

الف) آزمون تجربی چارچوب در صنایع مختلف: با توجه به اینکه چارچوب حاضر بر اساس مرور ادبیات طراحی شده است، پژوهش‌های آتی می‌توانند با روش‌های کمی (مانند مدل‌سازی معادلات ساختاری) به اعتبارسنجی روابط میان پنج فرایند و ابعاد عملکرد پایدار در صنایع مختلف (مانند خودروسازی، غذایی، الکترونیک) بپردازند.

ب) تحلیل نقش متغیرهای تعدیلگر و میانجی: پژوهش‌های آتی می‌توانند نقش متغیرهایی مانند اندازه سازمان، سطح بلوغ دیجیتال، فرهنگ‌سازمانی و فشارهای نهادی را به‌عنوان متغیرهای تعدیلگر یا میانجی در مدل بررسی کنند.

ج) توسعه ابعاد اجتماعی: با توجه به غلبه ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی در ادبیات موجود (که در جدول ۵ نیز مشهود است)، پژوهش‌های آتی می‌توانند بر شاخص‌های اجتماعی عملکرد پایدار (مانند عدالت سازمانی، رفاه کارکنان، مسئولیت‌پذیری اجتماعی) متمرکز شوند.

د) مطالعات پویا: با توجه به ماهیت سیستمی چارچوب، استفاده از روش‌های پویایی‌شناسی سیستم

(System Dynamics)می‌تواند به تحلیل رفتار پویای روابط میان متغیرها در بلندمدت و شناسایی حلقه‌های بازخوردی کمک کند.

ه) مطالعات تطبیقی بین‌صنعتی و بین‌کشوری: پژوهش‌های آتی می‌توانند با مقایسه صنایع مختلف یا کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه، اولویت‌های اختصاصی هر بافت را شناسایی کنند.

محدودیت‌های پژوهش

پژوهش حاضر باوجود ارائه چارچوب مفهومی جامع، با محدودیت‌هایی روبه‌روست:

محدودیت‌های نظری و روش‌شناختی: چارچوب ارائه‌شده مبتنی بر مرور نظام‌مند ادبیات و تحلیل کیفی است و فاقد آزمون تجربی می‌باشد. ازاین‌رو، اعتبارسنجی تجربی چارچوب‌های مفهومی ضروری است. علاوه بر این، باوجود تلاش برای جامعیت‌بخشی از طریق روش فراترکیب، امکان دارد برخی شاخص‌های مختص صنایع خاص در این چارچوب پوشش داده نشده باشند. همچنین مقالات منتخب صرفاً از پایگاه‌های داده معتبر بین‌المللی و با کلیدواژه‌های مشخص استخراج شده‌اند که ممکن است منجر به چشم‌پوشی از برخی مطالعات مرتبط در سایر پایگاه‌ها گردد. بازه زمانی پژوهش (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۶) نیز احتمال دارد برخی مطالعات کلیدی پیش‌ازاین دوره را پوشش نداده باشد. کیفیت‌سنجی با ابزار CASP گرچه معتبر است، اما ذاتاً تا حدی مبتنی بر قضاوت پژوهشگر بوده و ممکن است با خطای انسانی همراه باشد.

محدودیت‌های اجرایی: چارچوب ارائه‌شده با رویکردی کلی و قابل‌تعمیم به صنایع مختلف تدوین شده است و امکان دارد برای صنایع خاص با ویژگی‌های منحصربه‌فرد، نیازمند بومی‌سازی و تعدیل باشد. همچنین ابعاد اجتماعی عملکرد پایدار در جوامع و صنایع مختلف ممکن است تعاریف و اولویت‌های متفاوتی داشته باشد که در این پژوهش به‌صورت جزئی به آن پرداخته نشده است. پیاده‌سازی عملی این چارچوب نیز نیازمند زیرساخت‌های دیجیتال و بلوغ سازمانی است که ممکن است برای همه سازمان‌ها به‌صورت یکسان فراهم نباشد.

تعارض منافع

نویسندگان مقاله هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

ORCID

Maryam Heidari **https://orcid.org/0009-0007-9408-1778**
Akbar Alemtabriz **https://orcid.org/0000-0002-4562-8032**
Mostafa Zandieh **https://orcid.org/0000-0003-1209-9514**
Davood Talebi **https://orcid.org/0009-0001-1836-7658**

پیوست ا.

جدول ٦: خلاصه نتایج مرور سیستماتیک: شاخص‌های عملکرد پایدار در تلفیق اقتصاد چرخشی و صنعت ٤,٠

بعد	معیار	شاخص	اصول CE	فناوری I4.0	ابعاد پایداری
تأمین	تأمین سبز	استفاده از معیارهای زیست‌محیطی در انتخاب تأمین‌کننده	کاهش ردکردن	بلاک‌چین تحلیل کلان‌داده	اقتصادی زیست‌محیطی
	ارزیابی تأمین‌کننده	پایش عملکرد پایداری تأمین‌کنندگان	بازاندیشی	هوش مصنوعی تحلیلی کلان داده	اقتصادی زیست‌محیطی اجتماعی
طراحی و توسعه	طراحی ساختاری	درجه ماژولار بودن محصول	بازیافت بازتولید بازاندیشی ردکردن تعمیر	سیستم‌های سایبرفیزیکی هوش مصنوعی تولید افزودنی دوقلوی دیجیتال اینترنت اشیاء	اقتصادی زیست‌محیطی
	طراحی باثبات	طراحی برای افزایش طول عمر محصول	تعمیر استفاده مجدد	دوقلوهای دیجیتال تولید افزودنی بلاک‌چین	اقتصادی زیست‌محیطی
	طراحی تعمیرپذیر	طراحی برای تعمیرپذیری	تعمیر	واقعیت مجازی/ افزوده	اقتصادی اجتماعی
	طراحی سبز	طراحی سبز داده محور مبتنی بر چرخه عمر	کاهش بازاندیشی بازآفرینی	تحلیل کلان‌داده محاسبات ابری دوقلوهای دیجیتال	اقتصادی زیست‌محیطی
تولید و عملیات	کارایی منابع	کارایی مصرف مواد در تولید	کاهش بازآفرینی استفاده مجدد بازتولید	اینترنت اشیاء هوش مصنوعی دوقلوهای دیجیتال ربات	زیست‌محیطی اقتصادی

بعد	معیار	شاخص	اصول CE	فناوری I4.0	ابعاد پایداری
			بازسازی بازیافت	تولید افزودنی	
	تولید هوشمند	کاهش نرخ محصولات معیوب در تولید	کاهش بازیافت بازسازی استفاده مجدد	ربات اینترنت اشیاء تحلیل کلان‌داده هوش مصنوعی	اقتصادی زیست‌محیطی
		سطح اتوماسیون هوشمند تولید	بازاندیشی	رباتیک سیستم‌های سایبری، فیزیکی	اقتصادی
	عملکردمالی	بهبود سودآوری عملیات تولید	بازاندیشی	تحلیل کلان‌داده هوش مصنوعی محاسبات ابری	اقتصادی
	ایمنی	کاهش حوادث شغلی با استفاده از فناوری هوشمند	بازاندیشی کاهش ردکردن	واقعیت افزوده/مجازی دوقلوهای دیجیتال محاسبات ابری رباتیک تولید افزودنی	اجتماعی
	سلامت	بهبود سلامت و ارگونومی کارکنان			
	مهارت	ارتقاء مهارت‌های فنی و دیجیتال کارکنان			
	بلوغ دیجیتالی	بلوغ دیجیتال چرخشی در سازمان	10R	بلاک‌چین محاسبات ابری تولید افزودنی	اقتصادی زیست‌محیطی اجتماعی
توزیع	لجستیک معکوس	ردیابی جریان محصولات بازگشتی	استفاده مجدد بازتولید بازیافت	اینترنت اشیاء هوش مصنوعی تولید افزودنی بلاک‌چین	اقتصادی زیست‌محیطی
	حمل‌ونقل	مسیریابی و مدیریت زمان حمل‌ونقل	کاهش	تحلیل کلان‌داده هوش مصنوعی	اقتصادی زیست‌محیطی
	مدیریت موجودی	برنامه‌ریزی مواد	کاهش	تحلیل کلان‌داده	اقتصادی
مصرف و نگهداری	مدل خدماتی	توسعه سیستم‌های محصول، خدمت	استفاده مجدد بازاندیشی	اینترنت اشیاء محاسبات ابری بلاک‌چین	اقتصادی، زیست‌محیطی
	نگهداری	نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه	تعمیر	اینترنت اشیاء واقعیت افزوده/مجازی هوش مصنوعی	اقتصادی

بعد	معیار	شاخص	اصول CE	فناوری I4.0	ابعاد پایداری
				رباتیک تحلیل کلان‌داده محاسبات ابری تولید افزودنی	
	خدمات	کیفیت خدمات پس از فروش	تعمیر بازسازی بازیافت استفاده مجدد بازاندیشی	اینترنت اشیاء تحلیل کلان‌داده محاسبات ابری	اقتصادی اجتماعی
	آموزش مشتری	آموزش به‌منظور افزایش آگاهی در استفاده پایدار	کاهش بازاندیشی استفاده مجدد	واقعیت افزوده/مجازی	زیست‌محیطی اجتماعی
	تغییر کاربری	استفاده مجدد برای هدف جدید	تغییر کاربری تولید افزودنی (چاپگر سه‌بعدی) بازاندیشی	اینترنت اشیاء	زیست‌محیطی اقتصادی
نمونه‌هایی از منابع	(Bindeeba, Tukamushaba, and Bakashaba 2025)، (Kumar and Kandpal 2025)، (Ciano et al. 2025)، (Sharma et al. 2025)، (Gupta and Singh 2024)، (Skalli et al. 2024)، (Lu, Zhao, and Liu 2024)، (Magnano et al. 2024)، (Han et al. 2023)،(Karmaker et al. 2023)،(Nudurupati et al. 2022)، (Godinho Filho et al. 2022)، (Saroha, Garg, and Luthra 2020).				

References

1. Alsaoudi, T., Acquaye, A., Swarnakar, V., & Khalfan, M. (2025). Exploring the intersection of Industry 4.0 technologies, circular economy, and sustainable performance: A systematic literature review and future research directions. *Heliyon, 11*(12), e43529. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e43529
2. Bindeeba, D. S., Tukamushaba, E. K., & Bakashaba, R. (2025). Digital transformation and its multidimensional impact on sustainable business performance: Evidence from a meta-analytic review. *Future Business Journal, 11*(1), 90. https://doi.org/10.1186/s43093-025-00511-z
3. Ciano, M. P., Peron, M., Panza, L., & Pozzi, R. (2025). Industry 4.0 technologies in support of circular economy: A 10R-based integration framework. *Computers & Industrial Engineering, 201*, 110867. https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.110867
4. Dwivedi, A., & Madaan, J. (2020). A hybrid approach for modeling the key performance indicators of information facilitated product recovery system. *Journal of Modelling in Management, 15*(3), 933–965. https://doi.org/10.1108/JM2-01-2019-0003
5. Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone Publishing.
6. Esmaeilian, B., Sarkis, J., Lewis, K., & Behdad, S. (2020). Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. *Resources, Conservation and Recycling, 163*, 105064. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105064
7. Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics, 210*, 15–26. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004
8. Godinho Filho, M., Monteiro, L., Mota, R. O., Gonella, J. dos S. L., & Campos, L. M. de S. (2022). The relationship between circular economy, Industry 4.0 and supply chain performance: A combined ISM/Fuzzy MICMAC approach. *Sustainability, 14*(5), 2772. https://doi.org/10.3390/su14052772
9. Gupta, A., & Singh, R. K. (2024). Applications of emerging technologies in logistics sector for achieving circular economy goals during COVID-19 pandemic: Analysis of critical success factors. *International Journal of Logistics Research and Applications, 27*(4), 451–472. https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1985095
10. Han, Y., Shevchenko, T., Yannou, B., Ranjbari, M., Shams Esfandabadi, Z., Saidani, M., Bouillass, G., Bliumska-Danko, K., & Li, G. (2023). Exploring how digital technologies enable a circular economy of products. *Sustainability, 15*(3), 2067. https://doi.org/10.3390/su15032067
11. Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry, 89*, 23–34. https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002
12. Kamble, S., Gunasekaran, A., & Dhone, N. C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. *International Journal of Production*

Research, *58*(5), 1319–1337. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630772

13. Karmaker, C. L., Aziz, R. A., Ahmed, T., Misbauddin, S. M., & Moktadir, M. A. (2023). Impact of Industry 4.0 technologies on sustainable supply chain performance: The mediating role of green supply chain management practices and circular economy. *Journal of Cleaner Production, 419*, 138249. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138249
14. Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling, 127*, 221–232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005
15. Kouhizadeh, M., Saberi, S., & Sarkis, J. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics, 231*, 107831. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107831
16. Kumar, R., & Kandpal, V. (2025). Factors affecting the adoption of Industry 4.0 technologies in circular economy: Interpretive structure modelling (ISM) approach for future sustainability. *Discover Sustainability, 6*(1), 351. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01066-3
17. Lu, H., Zhao, G., & Liu, S. (2024). Integrating circular economy and Industry 4.0 for sustainable supply chain management: A dynamic capability view. *Production Planning & Control, 35*(2), 170–186. https://doi.org/10.1080/09537287.2022.2096135
18. Magnano, D. G., Grimstad, S. M. F., Glavee-Geo, R., & Anwar, F. (2024). Disentangling circular economy practices and firm's sustainability performance: A systematic literature review of past achievements and future promises. *Journal of Environmental Management, 353*, 120138. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120138
19. Mulindwa, M. S., Akor, J., Auta, M., Nijman-Ross, E., & Ogutu, M. O. (2024). Assessing the circularity status of waste management among manufacturing, waste management, and recycling companies in Kigali, Rwanda. *Frontiers in Sustainability, 4*, 1215554. https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1215554
20. Nudurupati, S. S., Budhwar, P., Pappu, R. P., Chowdhury, S., Kondala, M., Chakraborty, A., & Ghosh, S. K. (2022). Transforming sustainability of Indian small and medium-sized enterprises through circular economy adoption. *Journal of Business Research, 149*, 250–269. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.05.036
21. Patyal, V. S., Sarma, P. R. S., Modgil, S., Nag, T., & Dennehy, D. (2022). Mapping the links between Industry 4.0, circular economy and sustainability: A systematic literature review. *Journal of Enterprise Information Management, 35*(1), 1–35. https://doi.org/10.1108/JEIM-05-2021-0197
22. Rajput, S., & Singh, S. P. (2019). Connecting circular economy and Industry 4.0. *International Journal of Information Management, 49*, 98–113. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.002
23. Rizvi, S. W. H., Agrawal, S., & Murtaza, Q. (2023). Automotive industry and Industry 4.0–circular economy nexus through the consumers' and manufacturers' perspectives: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 183*, 113517. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113517

24. Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). Assessing relations between circular economy and Industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, *58*(6), 1662–1687. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896
25. Sandelowski, M. (2007). *Handbook for synthesizing qualitative research*. Springer Publishing Company.
26. Saroha, M., Garg, D., & Luthra, S. (2020). Pressures in implementation of circular supply chain management for sustainability: An analysis from Indian industries perspective. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, *31*(5), 1091–1110. https://doi.org/10.1108/MEQ-08-2019-0178
27. Sharma, R., Samad, T. A., Chiappetta Jabbour, C. J., & de Queiroz, M. J. (2025). Leveraging blockchain technology for circularity in agricultural supply chains: Evidence from a fast-growing economy. *Journal of Enterprise Information Management*, *38*(1), 32–67. https://doi.org/10.1108/JEIM-10-2023-0506
28. Skalli, D., Charkaoui, A., Cherrafi, A., Garza-Reyes, J. A., Antony, J., & Shokri, A. (2024). Analyzing the integrated effect of circular economy, Lean Six Sigma, and Industry 4.0 on sustainable manufacturing performance from a practice-based view perspective. *Business Strategy and the Environment*, *33*(2), 1208–1226. https://doi.org/10.1002/bse.3540

استناد به این مقاله: حیدری، مریم.، عالم تبریز، اکبر.، زندیه، مصطفی.، طالبی، داوود. (۱۴۰۵). چارچوب مفهومی بهبود فرایند عملکرد پایدار مبتنی بر اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰: رویکرد سیستمی، *مدیریت صنعتی*، *۲۴(۸۱)*، ۱-۳۴. DOI: 10.22054/jims.2026.92362.3026

Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.