

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 Alam 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 aims to identify existing gaps and propose an integrated conceptual

* Corresponding Author: Akbar Alam Tabriz Email: a-tabriz@sbu.ac.ir
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4062-8032>
How to Cite: xxxxxxxx

framework for improving sustainable performance based on the synergy between CE and Industry ۴.۰. 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 ۲۰۱۵–۲۰۲۶. After applying inclusion and exclusion criteria, selected articles were analyzed. A total of ۴۰۷ initial codes were extracted and, following conceptual refinement, organized into ۴۹ indicators and ۳۳ criteria. These indicators were categorized into five sustainable performance improvement processes: procurement, design and development, production and operations, distribution and use, and maintenance. Findings reveal that the literature focuses predominantly on production and operations, while upstream and midstream value chain processes remain under-explored. The proposed framework demonstrates that Industry ۴.۰ 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 lies in providing an integrated, process-oriented model that elucidates the mechanisms for achieving practical sustainable performance through the nexus of CE and Industry ۴.۰.

Keywords: Circular economy, Industry ۴.۰, Sustainable performance, Process improvement, Systematic literature review

Introduction: The transition toward sustainable industrial systems has highlighted the necessity of integrating Circular Economy (CE) principles with Industry ۴.۰ technologies. Despite growing research, an integrated process-oriented framework explaining their systematic interaction to enhance sustainable performance remains absent. This study addresses this gap by proposing a conceptual framework demonstrating how the synergy between CE and Industry ۴.۰ 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 ۳R approaches to comprehensive frameworks such as the ۱۰R model (Potting et al., ۲۰۱۷). Industry ۴.۰ technologies—IoT, AI, big data analytics, blockchain, additive manufacturing, and cyber-physical systems—are recognized as

enablers for circular practices (Rajput & Singh, ۲۰۱۹; Han et al., ۲۰۲۳). However, existing studies focus primarily on technological dimensions or conceptual relationships, with limited attention to process-oriented implementation frameworks (Rosa et al., ۲۰۲۰; Patyal et al., ۲۰۲۲; Alsaoudi et al., ۲۰۲۵). Most studies focus 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 ۴.۰ 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 employs a systematic literature review (SLR) based on qualitative meta-synthesis. SLR serves 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, ۲۰۰۷; Okoli & Schabram, ۲۰۱۰). Meta-synthesis serves as the method for analyzing and synthesizing qualitative findings, enabling extraction of codes, concepts, and indicators into a new conceptual framework (Sandelowski & Barroso, ۲۰۰۷; Walsh & Downe, ۲۰۰۵). The study followed Sandelowski and Barroso's seven-step approach (۲۰۰۷). A systematic search was conducted across Scopus, Web of Science, and ScienceDirect, and complementary Persian databases (Civilica, Magiran, SID) for ۲۰۱۵-۲۰۲۶. After applying inclusion/exclusion criteria and CASP quality assessment, ۳۲ articles were selected. Data analysis employed open, axial, and selective coding, extracting ۴۷ initial codes, refined into ۴۹ indicators and ۳۳ criteria. Reliability was assessed using Cohen's kappa ($\kappa = ۰.۸۴۷$), indicating strong agreement.

Findings: Indicators were categorized into five processes: (۱) procurement, (۲) design and development, (۳) production and operations, (۴) distribution, and (۵) use and maintenance. Quantitative distribution shows production and operations with the highest share (۱۶ indicators, ۳۲.۷%), followed by use and maintenance (۱۱, ۲۲.۴%), design and development (۱۰, ۲۰.۴%), distribution (۷, ۱۴.۳%), and procurement (۵, ۱۰.۲%). This reveals a significant research imbalance, indicating upstream and midstream processes have been underexplored. Industry ۴.۰ technologies act as enablers for implementing ۱۰R 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 ۴.۰ within organizational processes. The novelty lies in providing an integrated, process-oriented model that operationalizes indicators within five concrete processes and explains how technologies enable ۱۰R implementation. This alignment between methodology and findings validates the framework as an outcome of analyzing scattered literature data, not a predetermined model. Limitations include: (۱) Framework based on literature review lacking empirical testing; (۲) Selected articles limited to specific databases; (۳) Time frame (۲۰۱۵-۲۰۲۶) may exclude key earlier studies; (۴) CASP assessment involves subjectivity; (۵) Implementation requires digital infrastructure and organizational maturity. Future research should focus on: (۱) empirical validation using quantitative methods across industries; (۲) investigating moderating variables including organizational size, digital maturity, and institutional pressures; (۳) developing social dimensions of sustainable performance; (۴) applying system dynamics to analyze long-term behavior and feedback loops; (۵) conducting comparative studies across industries and developed versus developing countries.

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 به سوی سیستم‌های صنعتی پایدار، ضرورت تلفیق اصول اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ را بیش از پیش برجسته ساخته است. با وجود 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 با هدف 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 به کارگیری رویکرد هفت مرحله‌ای سندلوسکی 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 مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. در مجموع 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 مورد توجه قرار گرفته‌اند. چارچوب 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. از این رو، بهبود عملکرد پایدار مستلزم اتخاذ رویکردهایی است که بتوانند به صورت هم‌زمان ارزش اقتصادی، حفاظت از محیط‌زیست و مسئولیت‌پذیری اجتماعی را محقق سازند.

یکی از رویکردهای مورد توجه 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. با وجود ظرفیت‌های قابل توجه 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 به عنوان 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، در حالی که فناوری‌های صنعت ۴,۰ زیرساخت‌های فناورانه مورد نیاز برای پایش، کنترل و بهینه‌سازی این چرخه‌ها را در اختیار سازمان‌ها قرار می‌دهند. به عبارت دیگر، صنعت ۴,۰ صرفاً مجموعه‌ای از فناوری‌های دیجیتال نیست، بلکه به عنوان توانمندساز، اجرای اصول اقتصاد چرخشی عملیاتی می‌کند (Rajput and Singh ۲۰۱۹).

با وجود 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 فرآیندهای عملیاتی و مدیریتی کمتر مورد توجه 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 فرآیندمحور را اتخاذ کرده است. مبنای نظری این رویکرد بر تلفیق سه رویکرد معتبر استوار است: زنجیره ارزش پورتر که بر خلق ارزش در فعالیت‌های اصلی سازمان تأکید دارد؛ مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین^۱ که فرآیندهای 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 ۲۰۱۷) بر پایه این مبانی، پنج فرآیند 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 فرآیندمحور برای تبیین سازوکار بهبود عملکرد پایدار از طریق سازمان‌دهی شاخص‌های عملکرد پایدار در پنج فرآیند کلیدی و تبیین ارتباط میان اصول اقتصاد چرخشی، فناوری‌های صنعت ۴,۰ و ابعاد سه‌گانه پایداری است. نوآوری پژوهش در ارائه این چارچوب فرآیندمحور است که برخلاف مطالعات پیشین، شاخص‌های عملکرد پایدار را در قالب فرآیندهای عینی سازمانی دسته‌بندی کرده و نقش فناوری‌های صنعت ۴,۰ را به‌عنوان توانمندساز اصول ده‌گانه اقتصاد

^۱ SCOR

چرخشی در هر یک از پنج فرآیند 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 فرآیندمحور برای عملکرد پایدار منجر می‌شوند؟

۳. چارچوب فرآیندمحور ساخته‌شده، چگونه از طریق هم‌پوشانی مفهومی، روابط میان شاخص‌های عملکرد پایدار، اصول اقتصاد چرخشی (۱۰R) 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 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» به عنوان شاخصی برای سنجش میزان موفقیت سازمان‌ها در تحقق هم‌زمان اهداف سه‌گانه یادشده مطرح می‌شود (Elkington ۱۹۹۷).

عملکرد پایدار نشان‌دهنده توانایی سازمان در ایجاد تعادل پویا میان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در بلندمدت است و بیانگر میزان انطباق راهبردها، فرآیندها و نتایج سازمان با اصول توسعه پایدار می‌باشد. بر اساس دیدگاه سه‌گانه^۱ (TBL)، سازمان‌ها باید به گونه‌ای عمل کنند که ضمن ایجاد ارزش اقتصادی، به بهبود رفاه اجتماعی و حفاظت از محیط‌زیست نیز کمک نمایند (Elkington ۱۹۹۷) این نگاه یکپارچه، چارچوبی مهیا می‌سازد

^۱ Triple Bottom Line

که در آن عملکرد سازمان نه تنها بر اساس شاخص‌های مالی، بلکه بر مبنای پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی نیز ارزیابی می‌شود.

اقتصاد چرخشی

در همین زمینه، «اقتصاد چرخشی» به عنوان یکی از رویکردهای تحول‌آفرین در حوزه پایداری مطرح شده است. اقتصاد چرخشی که ریشه‌های آن به دهه ۱۹۷۰ بازمی‌گردد، به دنبال 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 ۲۰۲۰; Han et al. ۲۰۲۳). بر خلاف اقتصاد خطی، این رویکرد مبتنی بر منطق «از گهواره تا گهواره» است و با هدف 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. ۲۰۱۷). برای عملیاتی‌سازی این اهداف، چارچوب R۱۰ به عنوان یک طبقه‌بندی جامع از راهبردهای چرخشی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: چارچوب اصول R۱۰

سطح راهبردی	کد R	اصول R	توضیح
استفاده و تولید هوشمند محصول	R۰	امتناع ^۱	خودداری از ساخت محصولات غیرضروری یا جایگزینی عملکرد محصول با راهکارهای متفاوت (مانند حذف یک عملکرد اضافی از محصول)
	R۱	کاهش ^۲	افزایش کارایی در تولید یا مصرف با کاهش مصرف منابع طبیعی و مواد اولیه
	R۲	بازاندیشی ^۳	افزایش شدت استفاده از محصول از طریق مدل‌های اشتراکی، چندمنظوره کردن محصولات یا تغییر از مالکیت به دسترسی

^۱ Refuse

^۲ Reduce

^۳ Rethink

سطح راهبردی	کد R	اصول R	توضیح
افزایش طول عمر محصول و اجزای آن	R ^۳	بازمصرف ^۱	استفاده مجدد توسط مصرف‌کننده دیگر از محصولات دورریخته‌شده که همچنان در شرایط خوب و با عملکرد اصلی خود هستند.
	R ^۴	تعمیر ^۲	تعمیر و نگهداری محصول معیوب برای استفاده مجدد با عملکرد اصلی خود
	R ^۵	نوسازی ^۳	بازسازی یک محصول قدیمی و به‌روزرسانی آن به وضعیت قابل قبول
	R ^۶	بازتولید ^۴	استفاده از قطعات محصولات دورریخته‌شده در یک محصول جدید با عملکرد مشابه
	R ^۷	بازهدف‌گذاری ^۵	استفاده از محصولات دورریخته‌شده یا قطعات آن‌ها در یک محصول جدید با عملکرد متفاوت
کاربرد مفید مواد	R ^۸	بازیافت ^۶	پردازش مواد برای به‌دست‌آوردن کیفیت مشابه (بازیافت باکیفیت بالا) یا پایین‌تر (بازیافت باکیفیت پایین)
	R ^۹	بازیابی ^۷	سوزاندن مواد همراه با بازیابی انرژی (مانند تبدیل زباله به انرژی)

چارچوب R^{۱۰} که 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 R^۰ تا R^۲) 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 R^۳ تا R^۷) 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

^۱ Reuse

^۲ Repair

^۳ Refurbish

^۴ Remanufacture

^۵ Repurpose

^۶ Recycle

^۷ Recover

می گیرد. سطح سوم (شامل R8 و R9) بر کاربرد مفید مواد از طریق بازیافت و بازیابی انرژی تمرکز دارد و پایین ترین سطح چرخشی محسوب می شود، زیرا در این سطح، مواد دیگر به صورت مستقیم در چرخه مصرف باقی نمی ماند و یا به مواد اولیه با کیفیت پایین تر تبدیل می شوند و یا به انرژی تبدیل می گردند (Kirchherr et al. ۲۰۱۷; Mulindwa et al. ۲۰۲۴).

اولویت بندی این سلسله مراتب به سازمان ها نشان می دهد 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، نو سازی، باز تولید و باز هدف گذاری) و در نهایت راهبردهای سطح سوم (بازیافت و بازیابی) را مد نظر قرار دهند. در پژوهش حاضر، این چارچوب به عنوان مبنای تحلیل شاخص های عملکرد پایدار در پنج فرایند سازمانی (تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع، و مصرف و نگهداری) مورد استفاده قرار گرفته است.

صنعت ۴,۰

هم زمان با گسترش رویکرد اقتصاد چرخشی، تحولات فناورانه گسترده ای در عرصه تولید و مدیریت صنعتی رخ داده است که تحت عنوان «صنعت ۴,۰» شناخته می شود. این اصطلاح نخستین بار در سال ۲۰۱۱ در قالب یک ابتکار راهبردی در آلمان مطرح شد و به موج چهارم انقلاب صنعتی اشاره دارد؛ موجی که با دیجیتالی سازی پیشرفته، یکپارچه سازی سیستم های سایبر، فیزیکی و اتصال هوشمند تجهیزات و فرآیندها مشخص می شود (Hofmann and Rüsch ۲۰۱۷). صنعت ۴,۰ بر پایه فناوری هایی نظیر اینترنت اشیا^۱، سیستم های سایبر فیزیکی^۲، تحلیل کلان داده^۳، هوش مصنوعی^۴، رایانش ابری^۵،

^۱ Internet of Things

^۲ Cyber-physical systems

^۳ Big data analysis

^۴ Artificial Intelligence

^۵ Cloud computing

رباتیک^۱ پیشرفته، تولید افزودنی^۲، واقعیت افزوده و مجازی^۳ و بلاک‌چین^۴ شکل گرفته است (Han et al. ۲۰۲۳; Rizvi, Agrawal, and Murtaza ۲۰۲۳).

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 فرآیندها را ایجاد می‌کنند (Rajput and Singh ۲۰۱۹). هوش مصنوعی با پشتیبانی از تصمیم‌گیری داده‌محور، می‌تواند برنامه‌ریزی تولید، مدیریت موجودی و تخصیص منابع را بهینه سازد (Frank, Dalenogare, and Ayala ۲۰۱۹). به طور مشابه، رباتیک پیشرفته و اتوماسیون هوشمند نیز با کاهش خطاهای انسانی و افزایش دقت، منجر به کاهش ضایعات و بهبود کیفیت محصولات می‌شوند (Han et al. ۲۰۲۳). فناوری بلاک‌چین از طریق افزایش شفافیت و قابلیت ردیابی در زنجیره تأمین، اجرای مؤثر راهبردهای بازرخانی و لجستیک معکوس را تسهیل می‌کند (Kouhizadeh, Saberi, and Sarkis ۲۰۲۱).

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، ادبیات پژوهشی به‌طور فزاینده‌ای به بررسی هم‌افزایی میان اقتصاد چرخشی (CE) و فناوری‌های صنعت ۴،۰ (I۴،۰) در راستای ارتقاء عملکرد پایدار پرداخته است. با این حال، این مطالعات عمدتاً یا بر ابعاد فناورانه تمرکز داشته‌اند یا به‌صورت تجربی در یک بستر خاص بررسی شده‌اند و کمتر رویکردی جامع و فرآیندمحور 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 ۴،۰

^۱ Robotics

^۲ Additive manufacturing

^۳ Augmented and virtual reality

^۴ Blockchain

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. ۲۰۲۰).

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 ۴,۰» 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. با این حال، نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که بخش قابل توجهی از ادبیات موجود همچنان در سطح مفهومی باقی مانده و چارچوب‌های عملیاتی برای پیاده‌سازی این همگرایی در فرآیندهای سازمانی به‌ندرت توسعه یافته‌اند. (Rosa et al. ۲۰۲۰).

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. ۲۰۲۲). 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. ۲۰۲۳).

اقتصاد چرخشی، صنعت ۴,۰ و پایداری

با بلوغ نسبی ادبیات مرتبط با اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰، تمرکز پژوهش‌ها به تدریج 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 مورد بررسی 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. با این حال، 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. ۲۰۲۲).

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. ۲۰۲۳).

به همین ترتیب، کمبل و گوناسه کاران (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 به کار 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 ۲۰۲۰).

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 مورد توجه 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 فرآیندهای زنجیره تأمین تبیین کند، به‌ندرت مشاهده می‌شود (Alsaoudi et al. ۲۰۲۵).

در جدول خلاصه‌ای از پیشنهاد 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	مولفه‌های اقتصاد چرخشی	نوع فناوری	شکاف پژوهشی
روزا و همکاران (۲۰۲۰)	بررسی روابط اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰	مرور نظام‌مند ادبیات	بازتولید، بازیافت، استفاده مجدد،	سیستم‌های سایبر، فیزیکی، اینترنت اشیا، شبیه‌سازی، تولید افزودنی، تجزیه و تحلیل 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 اشیا، محاسبات ابری تجزیه و تحلیل 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 سایبر فیزیکی، واقعیت افزوده	استفاده صرف از پایگاه داده Scopus؛ فاقد چارچوب جامع بهبود عملکرد پایدار
هان و همکاران (۲۰۲۳)	نقش فناوری‌های دیجیتال در سه مرحله اصلی چرخه عمر محصول (سیستم اشتراک دو چرخه در چین)	مرور نظام‌مند ادبیات	استفاده مجدد بازیافت	اینترنت اشیا، هوش مصنوعی محاسبات ابری، پرینت سه بعدی تجزیه و تحلیل کلان داده‌ها	محدود به مراحل طراحی، استفاده و بازیابی؛ فاقد چارچوب جامع بهبود عملکرد پایدار
کمل و گوناسه کاران (۲۰۲۳)	نقش فناوری‌های صنعت ۴,۰ و شیوه‌های اقتصاد چرخشی در عملکرد پایدار	مدل‌سازی معادلات ساختاری	بازیابی	پردازش ابری، رباتیک، تجزیه و تحلیل کلان داده‌ها، واقعیت افزوده، سیستم‌های سایبر فیزیکی، پرینت سه بعدی	تمرکز بر اعتبارسنجی تجربی؛ عدم استخراج شاخص‌ها و فرایندها و عدم توجه به بعد زیست محیطی
مگنانو و همکاران (۲۰۲۴)	اقتصاد چرخشی و عملکرد پایدار (صنعت الکترونیک تایلند)	مرور نظام‌مند ادبیات	بازیافت، بازتولید	اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، تجزیه و تحلیل کلان داده‌ها، بلاک چین	عدم تمرکز بر نقش فناوری‌های صنعت ۴,۰

نویسنده و سال	حوزه تمرکز	روش پژوهش	مؤلفه‌های اقتصاد چرخشی	نوع فناوری	شکاف پژوهشی
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 استفاده مجدد	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	تجزیه و تحلیل کلان داده‌ها اینترنت اشیاء، 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	۱۰R	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 به عنوان توانمندساز اجرای R۱۰ 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 قابل توجهی داشته است. با این حال، شکاف‌های مهمی همچنان وجود دارد:

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

۱. علی‌رغم تأکید بر اهمیت عملکرد پایدار، بسیاری از مطالعات به طور هم‌زمان به هر سه بعد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی پرداخته‌اند 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 فرآیندهای اصلی زنجیره تأمین (شامل تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع و مصرف و نگهداری) تبیین کند، در ادبیات موجود به ندرت مشاهده می‌شود.

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

روش شناسی تحقیق^۱

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، یک مرور نظام‌مند ادبیات^۲ مبتنی بر رویکرد فراترکیب کیفی^۳ است. شایان ذکر است که مرور نظام‌مند و فراترکیب دو رویکرد مکمل هستند. مرور نظام‌مند به عنوان روش جست‌وجو، غربالگری و انتخاب نظام‌مند مقالات

^۱. method

^۲ Systematic Literature Review

^۳ Meta-Synthesis

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 به عنوان 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 با هدف تجمیع، تحلیل و یکپارچه‌سازی دانش پراکنده موجود درباره نقش هم‌افزایی اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت ۴,۰ در بهبود عملکرد پایدار به کار گرفته شده و امکان استخراج ساخت یافته مفاهیم، معیارها و شاخص‌ها را فراهم می‌کند. در راستای روش شناسی پژوهش از روش هفت مرحله ای سندلوسکی و باروسو (۲۰۰۷) استفاده شده است که این مراحل در شکل ۱ نشان داده شده است (Sandelowski ۲۰۰۷).



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

هدف اصلی این مرور سیستماتیک:

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

یافته‌ها

در **گام اول** تنظیم مولفه های پژوهش که بر اساس سوال اصلی پژوهش شکل گرفته است، می باشد. این بررسی با سوال اصلی تحقیق که مدل بهبود عملکرد پایدار مبتنی بر اصول اقتصاد چرخشی و فناوری های صنعت ۴,۰ چگونه می باشد در جدول ۳ نشان داده شده است. جدول ۳: مولفه های پژوهش

مولفه ها	سوالات	پاسخ
چه چیزی	شاخص های عملکرد پایدار که در ادبیات برای پیاده سازی همزمان اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰ شناسایی شده اند، کدام اند؟	شناسایی ابعاد و مولفه های تحقیق بر اساس پیشینه تحقیق
چه منابعی	منابع علمی مورد مطالعه برای دستیابی به ابعاد، مولفه ها و شاخص های تحقیق کدام است؟	در گام اول پایگاه های علمی و در مرحله بعد اساتید دانشگاه و خبرگان حوزه عملکرد پایدار، اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰
چه زمانی	مطالعات منتخب در چه دوره زمانی مورد بررسی قرار گرفتند؟	۲۰۱۵ الی ۲۰۲۶
چگونه	داده های مورد نظر تحقیق چگونه جمع آوری شده اند؟	روش تحلیل اسنادی، مقالات و کدگذاری آن ها

در **گام دوم**، به بررسی نظام مند متون منابع علمی پژوهش، کلیه اسناد علمی، گزارش های پژوهشی، پایگاه های داده، مجلات داخلی و خارجی در خصوص عملکرد پایدار، اصول اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰ مرتبط با سوال پژوهش پرداخته شد. برای شناسایی مطالعات مرتبط، جست و جوی نظام مند در پایگاه های معتبر بین المللی نظیر Scopus، Web of Science، ScienceDirect و پایگاه های مکمل انجام شده است. در این جست و جو از ترکیبی از کلیدواژه ها در سه خوشه اصلی استفاده شده است: صنعت ۴,۰ و فناوری های دیجیتال مرتبط، اقتصاد چرخشی و پایداری/عملکرد پایدار. برای کاهش سوگیری، جست و جو در عنوان، چکیده و کلیدواژه ها 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 ۴: کلیدواژه‌های جستجوی منابع

خوشه ۱: صنعت ۴,۰ و فناوری‌های مرتبط

"Industry ۴,۰" OR "Fourth industrial revolution"
"digitalization" OR "digital transformation"
"physical systems" OR "CPS.cyber"
"Internet of Things" OR "IoT"
"Big data analytics" OR "big data"
"Artificial intelligence" OR "AI"
"Additive manufacturing" OR "3D printing"
"blockchain"
"Cloud computing" OR "edge computing"

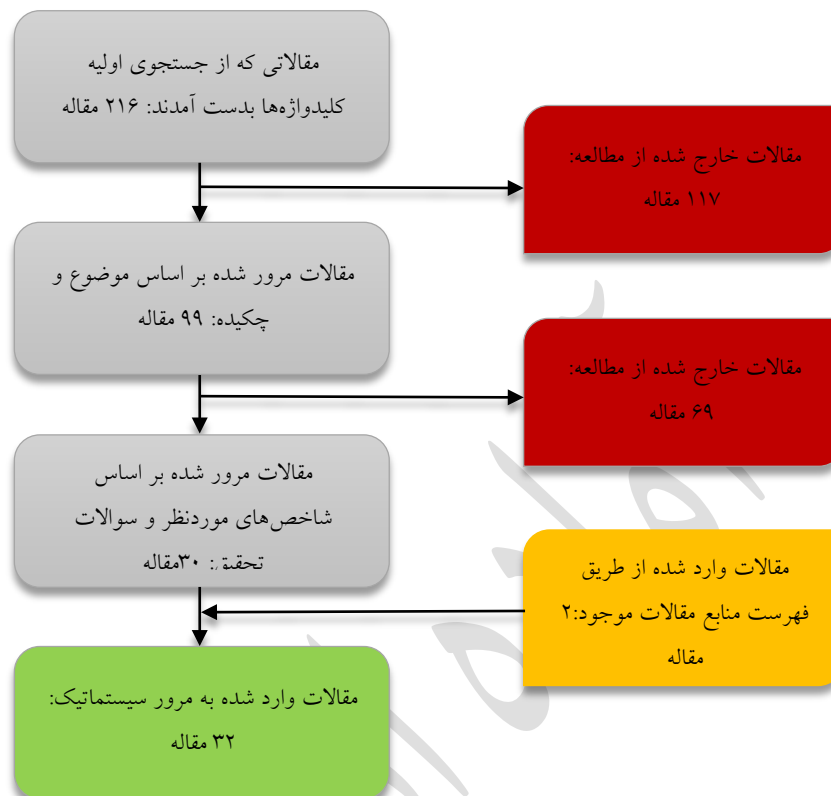
خوشه ۲: اقتصاد چرخشی

"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 سوال تحقیق که توسط نشریات دارای اعتبار علمی و پژوهشی در ۱۰ سال اخیر چاپ شده‌اند از طریق پایگاه‌های داده شامل



شکل ۲: غربالگری و انتخاب مطالعات

سیویلیکا، مگ ایران و اس ای دی با توجه به شاخص‌های دسترسی و به دلیل پوشش تمامی مطالب غیر تکراری به منظور شناسایی و گردآوری مطالعات مختلف مورد جستجوی قرار گرفته است. در این مرحله بر اساس معیارهای ورود و خروج ۳۲ مقاله مطابق شکل ۲ به عنوان مقالات نهایی انتخاب گردیده‌اند.

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 پرداخته اند:

0 صنعت ۴,۰ و اقتصاد چرخشی

0 اقتصاد چرخشی و پایداری/عملکرد پایدار

0 صنعت ۴,۰ و پایداری/عملکرد پایدار

- و ترجیحاً آن دسته از مطالعاتی که هر سه مفهوم را به صورت هم‌زمان بررسی نموده اند.
- مقالات به زبان انگلیسی (و در صورت نیاز، فارسی) در بازه زمانی مشخص (۲۰۱۵، ۲۰۲۶).

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 به صورت طبقه‌بندی شده ثبت شد. سپس مقالات بر اساس روش ارزیابی مقایسه‌ای منابع، مورد غربال و ارزشیابی قرار گرفتند.
- به منظور سنجش کیفیت، اعتبار و اهمیت مطالعات، از ابزار ^۱CASP استفاده شد. این ارزیابی توسط پژوهشگر با مشارکت اعضای تیم و کارشناسان خبره انجام گرفت. بر اساس ارزیابی انجام شده، ۳۲ مقاله از حداقل کیفیت قابل قبول برای ورود به مرحله تحلیل برخوردار بودند و همگی برای فرآیند کدگذاری و فراترکیب تأیید شدند.

^۱ Critical appraisal skills program

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. فرآیند این مرحله شامل استخراج اولیه داده‌ها، ورود داده‌ها به فراترکیب و تحلیل نهایی آن‌ها بود.

مقالات منتخب به صورت 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 به عنوان کدهای اولیه شناسایی و سپس در قالب مفاهیم و زیرموضوع‌ها 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 فرآیند اصلی سازمانی (تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع، مصرف و نگهداری)
- برای درک بهتر فرآیند 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 با ثبات		طراحی برای افزایش طول عمر محصول	طراحی برای افزایش طول عمر محصول

بعد	معیار	شاخص نهایی	تحلیل مفهومی و اقدام انجام شده	کدهای باز استخراج شده از منابع
طراحی و توسعه		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 می شود، 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 فرآیند کد گذاری محوری، این کدهای هم معنا و هم پوشان در قالب یک شاخص واحد با عنوان «طراحی برای افزایش طول عمر محصول» ادغام شدند. این شاخص در نهایت در ذیل معیار «طراحی با ثبات» و بعد کلان «طراحی و توسعه» طبقه بندی گردید.

این رویه برای تمام ۴۰۷ کد اولیه به صورت نظام مند اجرا گردید و در نهایت منجر به استخراج ۴۹ شاخص نهایی در قالب ۳۳ معیار و ۵ بعد اصلی عملکرد پایدار شد.

در نهایت مقالات مطالعه شده در حوزه عملکرد پایدار، اقتصاد چرخشی، صنعت ۴،۰ از طریق کلیدواژه های جدول ۳ بررسی شده و بخشی از مهمترین آن ها در جدول ۶ (پیوست ۱) آمده است که ابعاد فرایند عملکرد پایدار، معیارها، شاخص ها، اصول CE، فناوری I۴،۰ و ابعاد پایداری همسو با اهداف پژوهش را نشان می دهد.

در گام ششم، به منظور سنجش پایایی مدل و کنترل کیفیت کد گذاری، 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.

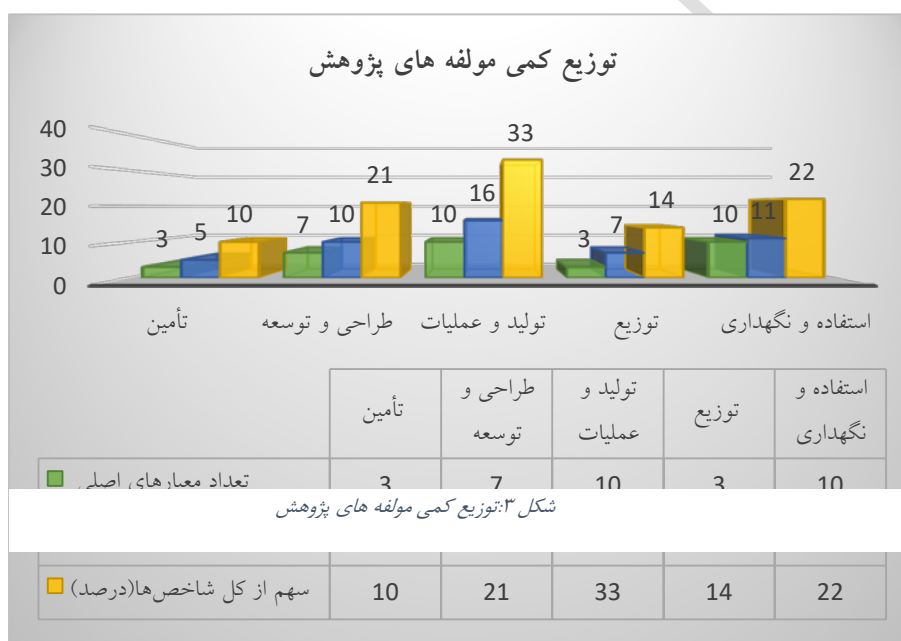
$$\text{توافقات مشاهده شده} = \frac{A+D}{N} = \frac{20}{25} = 0/852941176$$

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

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

در مرحله نهایی، با تلفیق نظام‌مند یافته‌های پیشین، چارچوب مفهومی جامعی طراحی شد که نحوه تعامل اقتصاد چرخشی (CE) و فناوری‌های صنعت ۴,۰ (I۴,۰) را در ارتقای عملکرد پایدار در قالب یک رویکرد فرآیندمحور تبیین می‌کند.

این چارچوب بر پایه تحلیل ۴۰۷ کد اولیه استخراج شده از ۳۲ مقاله منتخب و تلخیص آن‌ها در قالب ۴۹ شاخص کلیدی شکل گرفت. شاخص‌های نهایی در پنج فرآیند 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. نمودار ۳ نشان می‌دهد، تمرکز غالب بر فرآیند «تولید و عملیات» است. این فرآیند 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.

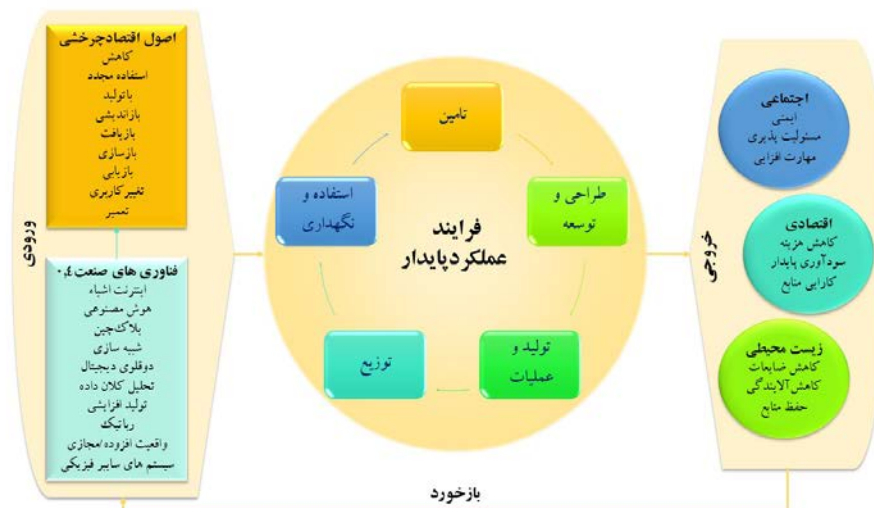
فرآیند «مصرف و نگهداری» با ۱۱ شاخص (۲۲,۴٪)، دومین فرآیند از نظر تراکم شاخص‌ها است. این یافته حاکی از اهمیت روزافزون مدل‌های خدماتی، نگهداری هوشمند و تعامل با مشتری در طولانی‌ترین مرحله چرخه عمر محصول است. داده‌های تولید شده در این مرحله به عنوان بازخوردی ارزشمند برای بهبود طراحی و تولید عمل می‌کنند.

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

فرآیندهای بالادستی و پایین‌دستی کمتر توسعه یافته: فرآیند «تأمین» با ۵ شاخص (۱۰,۲٪) و فرآیند «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.

در مجموع، نمودار ۳ بازتاب‌دهنده تمرکز غالب ادبیات بر مراحل عملیاتی و میانی چرخه عمر (تولید) است، در حالی که مراحل راهبردی اولیه (تأمین) و مراحل پایانی (توزیع) با وجود 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 به عنوان 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 فرآیند، مدل پارادایمی پنج‌فرآیندی بهبود عملکرد پایدار مبتنی بر اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰ است (شکل ۴).



شکل ۴: چارچوب مفهومی بهبود عملکرد با پارادایم های تعاملی اقتصاد چرخشی و صنعت ۴,۰

این چارچوب مفهومی نشان می دهد که دستیابی به عملکرد پایدار تنها از طریق تمرکز بر یک مرحله (مانند تولید) محقق نمی شود، بلکه نیازمند نگاهی یکپارچه و چرخه ای به تمامی مراحل عملکرد پایدار است. در این مدل، فناوری های صنعت ۴,۰ عمدتاً در نقش توانمندساز^۱ ظاهر می شوند که اجرای مؤثر اصول ده گانه اقتصاد چرخشی را در هر فرآیند ممکن می سازند. این چارچوب، افزون بر نمایش جریان مواد، اطلاعات و ارزش، بر ضرورت در نظرگیری توأمان ابعاد سه گانه پایداری (اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی) در هر فرآیند تأکید دارد.

بحث و نتیجه گیری

این پژوهش با هدف 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 به کارگیری رویکرد فراترکیب، ۴۹ شاخص عملکردی در قالب ۳۳ معیار و پنج فرایند اصلی سازماندهی شدند. یافته ها نشان داد که فناوری های صنعت ۴,۰ به عنوان توانمندسازهای اجرای اصول ده گانه اقتصاد چرخشی، از طریق بازآرایی پنج فرایند سازمانی (تأمین، طراحی و توسعه، تولید و عملیات، توزیع و مصرف و نگهداری)

^۱ Enabler

به ارتقای هم‌زمان ابعاد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی عملکرد پایدار منجر می‌شوند. در ادامه، به ترتیب 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 فرآیند اصلی شناسایی شده‌اند. سؤال دوم: شاخص‌ها از طریق فراترکیب و کدگذاری نظام‌مند چگونه به شکل‌گیری یک چارچوب فرآیندمحور برای عملکرد پایدار منجر می‌شوند؟

چارچوب فرآیندمحور 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 فرآیند) و کدگذاری انتخابی (طبقه‌بندی نهایی شاخص‌ها). این روش‌شناسی نشان می‌دهد عملکرد پایدار مفهومی انتزاعی نیست، بلکه از طریق شاخص‌های عینی در سطح فرآیندها قابل تحقق است. برخلاف مطالعات پیشین که بر روابط علی یا مرور ادبیات متمرکز بوده‌اند، این چارچوب نقشه‌راهی عملیاتی برای بهبود عملکرد پایدار ارائه می‌دهد.

سؤال سوم: چارچوب فرآیندمحور 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 R۱۰ قرار گیرند و در بستر فرآیندهای سازمانی بازآرایی شوند. در فرآیند 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

زیست محیطی را امکان پذیر می سازند. این هم افزایی به کاهش هزینه های تأمین، جلوگیری از اتلاف منابع، بهبود بهره وری اقتصادی و کاهش اثرات زیست محیطی منجر می شود و از طریق افزایش شفافیت و پاسخ گویی، پیامدهای اجتماعی مثبتی نیز ایجاد می کند.

در فرآیند طراحی و توسعه، تحلیل کلان داده، هوش مصنوعی و مدیریت چرخه عمر دیجیتال در تعامل با اصول طراحی برای تعمیرپذیری، بازسازی، بازتولید، ارتقاء و کاهش مصرف مواد و انرژی، به شکل گیری طراحی سبز داده محور مبتنی بر چرخه عمر منجر می شود. داده های استخراج شده از مرحله مصرف و نگهداری به عنوان بازخورد تحلیلی به تیم های طراحی بازمی گردد و امکان بازپیکربندی ساختار محصول، افزایش ماژولار بودن، تسهیل جداسازی و افزایش طول عمر را فراهم می کند. پیامد این باز آرای، کاهش هزینه های چرخه عمر، محدود شدن استخراج منابع، کاهش پسماند و افزایش رضایت و دسترس پذیری خدمات برای کاربران است که به صورت هم زمان ابعاد اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی عملکرد پایدار را تقویت می کند.

در فرآیند تولید و عملیات، سیستم های سایبرفیزیکی، نگهداری پیش بینانه، اتوماسیون هوشمند و تحلیل بلادرنگ داده ها در تعامل با اصول کاهش مصرف منابع، کاهش ضایعات و بهینه سازی استفاده از انرژی، به افزایش بهره وری تجهیزات، کاهش توقفات ناخواسته و بهبود کیفیت محصول منجر می شوند. این تحولات ضمن کاهش هزینه های عملیاتی و افزایش بازده سرمایه، شدت مصرف انرژی و انتشار آلاینده ها را کاهش داده و از طریق ارتقای ایمنی، سلامت و مهارت کارکنان، بعد اجتماعی عملکرد پایدار را نیز تقویت می کند.

در فرآیند توزیع، تحلیل داده های حمل و نقل، مسیریابی هوشمند و مدیریت دیجیتال جریان کالا در کنار اصل کاهش انتشار و بهینه سازی جریان محصول، به کاهش مصرف سوخت، کاهش رد پای کربن و افزایش کارایی لجستیکی منجر می شود. این امر نه تنها هزینه های توزیع و زمان تحویل را کاهش می دهد، بلکه اثرات زیست محیطی فعالیت های لجستیکی را محدود کرده و کیفیت خدمات رسانی به مشتریان را ارتقا می بخشد.

در فرآیند 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.

بدین ترتیب، 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 به صورت 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 پیش تعیین‌شده.

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 به کار گیرند.

نوآوری پژوهش

نوآوری پژوهش در ارائه چارچوبی مفهومی، سیستمی و فرآیندمحور برای بهبود عملکرد پایدار است که برخلاف مطالعات پیشین، شاخص‌های عملکرد پایدار را در قالب پنج فرآیند عینی سازمانی دسته‌بندی کرده و سازوکار تحقق عملی آن را از طریق تبیین نحوه تعامل فناوری‌های صنعت ۴,۰ به عنوان توانمندساز اصول ده‌گانه اقتصاد چرخشی تشریح

می‌کند. این چارچوب با تحلیل ۴۰۷ کد اولیه از ۳۲ مقاله معتبر استخراج شده و نشان می‌دهد چگونه بازآرایی پنج فرآیند 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 فرآیند زنجیره تأمین، از چه ترکیبی از فناوری‌های صنعت ۴,۰ و اصول اقتصاد چرخشی برای بهبود عملکرد پایدار استفاده کنند.

پیشنهادهای

بر اساس یافته‌های پژوهش و با توجه به شکاف‌های شناسایی شده 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، فرهنگ سازمانی و فشارهای نهادی را به عنوان 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 بین صنعتی و بین کشوری: پژوهش‌های آتی می‌توانند با مقایسه صنایع مختلف یا کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه، اولویت‌های اختصاصی هر بافت را شناسایی کنند.

محدودیت‌های پژوهش

پژوهش حاضر با وجود 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. از این رو، اعتبارسنجی تجربی چارچوب‌های مفهومی ضروری است. علاوه بر این، با وجود تلاش برای جامعیت بخشی 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 پیش از این 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 قابل تعمیم به صنایع مختلف تدوین شده است و امکان دارد برای صنایع خاص با ویژگی‌های منحصر به فرد، 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 به صورت جزئی به آن پرداخته نشده است. پیاده‌سازی عملی این چارچوب نیز نیازمند زیرساخت‌های دیجیتال و بلوغ سازمانی است که ممکن است برای همه سازمان‌ها به صورت یکسان فراهم نباشد.

جدول ۴: خلاصه نتایج مرور سیستماتیک: شاخص‌های عملکرد پایدار در تلفیق اقتصاد چرخشی و صنعت ۴،۰

بعد	معیار	شاخص	اصول CE	فناوری I۴،۰	ابعاد پایداری
تأمین	تأمین سبز	استفاده از معیارهای زیست‌محیطی در انتخاب تأمین‌کننده	کاهش ردکردن	بلاک چین تحلیل کلان‌داده	اقتصادی زیست‌محیطی
	ارزایی تأمین‌کننده	پایش عملکرد پایداری تأمین‌کنندگان	بازاندیشی	هوش مصنوعی تحلیلی کلان‌داده	اقتصادی زیست‌محیطی اجتماعی
طراحی و توسعه	طراحی ساختاری	درجه ماژولار بودن محصول	باز یافت باز تولید بازاندیشی ردکردن تعمیر	سیستم‌های سایبرفیزیکی هوش مصنوعی تولید افزودنی دوقلوی دیجیتال اینترنت اشیاء	اقتصادی زیست‌محیطی
	طراحی با ثبات	طراحی برای افزایش طول عمر محصول	تعمیر استفاده مجدد	دوقلوهای دیجیتال تولید افزودنی بلاک چین	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

بعد	معیار	شاخص	اصول CE	فناوری I۴,۰	ابعاد پایداری
تولید و عملیات	کارایی منابع	کارایی مصرف مواد در تولید	کاهش بازآفرینی استفاده مجدد بازتولید بازسازی بازیافت	اینترنت اشیاء هوش مصنوعی دوقلوهای دیجیتال ربات تولید افزودنی	زیست محیطی اقتصادی
	تولید هوشمند	کاهش نرخ محصولات معیوب در تولید	کاهش بازیافت بازسازی استفاده مجدد	ربات اینترنت اشیاء تحلیل کلان داده هوش مصنوعی	اقتصادی زیست محیطی
		سطح اتوماسیون هوشمند تولید	بازاندیشی	رباتیک سیستم های سایبری، فیزیکی	اقتصادی
	عملکرد مالی	بهبود سودآوری عملیات تولید	بازاندیشی	تحلیل کلان داده هوش مصنوعی محاسبات ابری	اقتصادی
	ایمنی	کاهش حوادث شغلی با استفاده از فناوری هوشمند	بازاندیشی کاهش رد کردن	واقعیت افزوده/مجازی دوقلوهای دیجیتال محاسبات ابری رباتیک تولید افزودنی	اجتماعی
	سلامت	بهبود سلامت و ارگونومی کارکنان			
	مهارت	ارتقاء مهارت های فنی و دیجیتال کارکنان			
	بلوغ دیجیتال	بلوغ چرخشی در سازمان	۱۰R	بلاک چین محاسبات ابری تولید افزودنی	اقتصادی زیست محیطی اجتماعی

بعد	معیار	شاخص	اصول CE	فناوری I۴,۰	ابعاد پایداری
توزیع	لجستیک معکوس	ردیابی جریان محصولات بازگشتی	استفاده مجدد بازتولید باز یافت	اینترنت اشیاء هوش مصنوعی تولید افزودنی بلاک چین	اقتصادی زیست محیطی
	حمل و نقل	مسیریابی و مدیریت زمان حمل و نقل	کاهش	تحلیل کلان داده هوش مصنوعی	اقتصادی زیست محیطی
	مدیریت موجودی	برنامه ریزی مواد	کاهش	تحلیل کلان داده	اقتصادی
مصرف و نگهداری	مدل خدماتی	توسعه سیستم های محصول، خدمت	استفاده مجدد بازاندیشی	اینترنت اشیاء محاسبات ابری بلاک چین	اقتصادی، زیست محیطی
	نگهداری	نگهداری و تعمیرات پیش گیرانه	تعمیر	اینترنت اشیاء واقعیت افزوده/مجازی هوش مصنوعی رباتیک تحلیل کلان داده محاسبات ابری تولید افزودنی	اقتصادی
	خدمات	کیفیت خدمات پس از فروش	تعمیر بازسازی باز یافت استفاده مجدد بازاندیشی	اینترنت اشیاء تحلیل کلان داده محاسبات ابری	اقتصادی اجتماعی
	آموزش مشتری	آموزش به منظور افزایش آگاهی در استفاده پایدار	کاهش بازاندیشی استفاده مجدد	واقعیت افزوده/مجازی	زیست محیطی اجتماعی

بعد	معیار	شاخص	اصول CE	فناوری I۴,۰	ابعاد پایداری
	تغییر کاربری	استفاده مجدد برای هدف جدید	تغییر کاربری تولید افزودنی (چاپگر سه بعدی) بازاندیشی	اینترنت اشیاء	زیست محیطی اقتصادی
نمونه هایی از منابع	(Kumar and Kandpal ۲۰۲۰)، (Bindeeba, Tukamushaba, and Bakashaba ۲۰۲۰)، (Ciano et al. ۲۰۲۰)، (Sharma et al. ۲۰۲۰)، (Gupta and Singh ۲۰۲۴)، (Skalli et al. ۲۰۲۴)، (Lu, Zhao, and Liu ۲۰۲۴)، (Magnano et al. ۲۰۲۴)، (Han et al. ۲۰۲۳)، (Karmaker et al. ۲۰۲۳)، (Nudurupati et al. ۲۰۲۲)، (Godinho Filho et al. ۲۰۲۲)، (Saroha, Garg, and Luthra ۲۰۲۰).				

تعارض منافع : نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع ندارند.

ORCID

Maryam Heidari		https://orcid.org/۰۰۰۹-۰۰۰۷-۹۴۰۸-۱۷۷۸
Akbar Alemtabriz		https://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۲-۴۵۶۲-۸۰۳۲
Mostafa Zandieh		https://orcid.org/۰۰۰۰-۰۰۰۳-۱۲۰۹-۹۵۱۴
Davood Talebi		https://orcid.org/۰۰۰۹-۰۰۰۱-۱۸۳۶-۷۶۵۸

References

١. Alsaoudi, Than'a, Adolf Acquaye, Vikas Swarnakar, and Malik Khalfan. ٢٠٢٥. "Exploring the Intersection of Industry ٤.٠ Technologies, Circular Economy, and Sustainable Performance: A Systematic Literature Review and Future Research Directions." *Heliyon* ١١(١٢). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e3029>
٢. Bindeeba, Dedrix Stephenson, Eddy Kurobuza Tukamushaba, and Rennie Bakashaba. ٢٠٢٥. "Digital Transformation and Its Multidimensional Impact on Sustainable Business Performance: Evidence from a Meta-Analytic Review." *Future Business Journal* ١١(١):٩٠. <https://doi.org/10.1186/s43093-025-00011-z>
٣. Ciano, Maria Pia, Mirco Peron, Luigi Panza, and Rossella Pozzi. ٢٠٢٥. "Industry ٤.٠ Technologies in Support of Circular Economy: A ١٠R-Based Integration Framework." *Computers & Industrial Engineering* ٢٠١:١١٠٨٦٧. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.110867>
٤. Dwivedi, Ashish, and Jitender Madaan. ٢٠٢٠. "A Hybrid Approach for Modeling the Key Performance Indicators of Information Facilitated Product Recovery System." *Journal of Modelling in Management* ١٥(٣):٩٣٣-٦٥. <https://doi.org/10.1108/JM2-01-2019-003>
٥. Elkington, J. ١٩٩٧. "Cannibals with Forks. The Triple Bottom Line of ٢١st Century Business. Capston, Publishing Ltd."
٦. Esmailian, Behzad, Joe Sarkis, Kemper Lewis, and Sara Behdad. ٢٠٢٠. "Blockchain for the Future of Sustainable Supply Chain Management in Industry ٤.٠." *Resources, Conservation and Recycling* ١٦٣:١٠٥٠٦٤. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105064>
٧. Frank, Alejandro Germán, Lucas Santos Dalenogare, and Néstor Fabián Ayala. ٢٠١٩. "Industry ٤.٠ Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies."

International Journal of Production Economics 210:10–26.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>

8. Godinho Filho, Moacir, Luiza Monteiro, Renata de Oliveira Mota, Jessica dos Santos Leite Gonella, and Lucila Maria de Souza Campos. 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, Anchal, and Rajesh Kumar Singh. 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):401–22. <https://doi.org/10.1080/13370067.2021.1980090>
10. Han, Yafeng, Tetiana Shevchenko, Bernard Yannou, Meisam Ranjbari, Zahra Shams Esfandabadi, Michael Saidani, Ghada Bouillass, Kseniia Bliumska-Danko, and Guohou Li. 2023. “Exploring How Digital Technologies Enable a Circular Economy of Products.” *Sustainability* 15(3):2067. <https://doi.org/10.3390/su15032067>
11. Hofmann, Erik, and Marco Rüsch. 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, Sachin, Angappa Gunasekaran, and Neelkanth C. Dhone. 2020. “Industry 4.0 and Lean Manufacturing Practices for Sustainable Organisational Performance in Indian Manufacturing Companies.” *International Journal of Production Research* 58(5):1319–37. <https://doi.org/10.1080/00207179.2019.1630772>
13. Karmaker, Chitra Lekha, Ridwan Al Aziz, Tazim Ahmed, S. M. Misbauddin, and Md Abdul Moktadir. 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* ٤١٩:١٣٨٢٤٩.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138249>

١٤. Kirchherr, Julian, Denise Reike, and Marko Hekkert. ٢٠١٧. “Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of ١١٤ Definitions.” *Resources, Conservation and Recycling* ١٢٧:٢٢١–٣٢. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
١٥. Kouhizadeh, Mahtab, Sara Saberi, and Joseph Sarkis. ٢٠٢١. “Blockchain Technology and the Sustainable Supply Chain: Theoretically Exploring Adoption Barriers.” *International Journal of Production Economics* ٢٣١:١٠٧٨٣١. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107831>
١٦. Kumar, Rakesh, and Vinay Kandpal. ٢٠٢٥. “Factors Affecting the Adoption of Industry ٤.٠ Technologies in Circular Economy: Interpretive Structure Modelling (ISM) Approach for Future Sustainability.” *Discover Sustainability* ٦(١):٣٥١. <https://doi.org/10.1007/s43621-020-0166-3>
١٧. Lu, Haiyan, Guoqing Zhao, and Shaofeng Liu. ٢٠٢٤. “Integrating Circular Economy and Industry ٤.٠ for Sustainable Supply Chain Management: A Dynamic Capability View.” *Production Planning & Control* ٣٥(٢):١٧٠–١٨٦. <https://doi.org/10.1080/09537287.2022.2096130>
١٨. Magnano, Diana Giovanni, Siv Marina Flø Grimstad, Richard Glavee-Geo, and Fahim Anwar. ٢٠٢٤. “Disentangling Circular Economy Practices and Firm’s Sustainability Performance: A Systematic Literature Review of Past Achievements and Future Promises.” *Journal of Environmental Management* ٣٥٣:١٢٠١٣٨. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120138>
١٩. Mulindwa, Mike Ssempe, Jackson Akor, Mary Auta, Elke Nijman-Ross, and Moses Onyango Ogutu. ٢٠٢٤. “Assessing the Circularity Status of Waste Management among Manufacturing, Waste Management, and Recycling Companies in Kigali, Rwanda.” *Frontiers in Sustainability* ٤:١٢١٥٥٥٤. <https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1215554>

٢٠. Nudurupati, Sai Sudhakar, Pawan Budhwar, Raja Phani Pappu, Soumyadeb Chowdhury, Mukesh Kondala, Ayon Chakraborty, and Sadhan Kumar Ghosh. ٢٠٢٢. "Transforming Sustainability of Indian Small and Medium-Sized Enterprises through Circular Economy Adoption." *Journal of Business Research* ١٤٩:٢٥٠–٦٩. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.05.036>.
٢١. Patyal, V. S., P. R. S. Sarma, S. Modgil, T. Nag, and D. Dennehy. ٢٠٢٢. "Mapping the Links between Industry ٤.٠, Circular Economy and Sustainability: A Systematic Literature Review." *JOURNAL OF ENTERPRISE INFORMATION MANAGEMENT* ٣٥(١):١–٣٥. <https://doi.org/10.1108/JEIM-05-2021-0197>.
٢٢. Rajput, Shubhangini, and Surya Prakash Singh. ٢٠١٩. "Connecting Circular Economy and Industry ٤.٠." *International Journal of Information Management* ٤٩:٩٨–١١٣. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.002>
٢٣. Rizvi, S. W. H., S. Agrawal, and Q. Murtaza. ٢٠٢٣. "Automotive Industry and Industry ٤.٠-Circular Economy Nexus through the Consumers' and Manufacturers' Perspectives: A Case Study." *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS* ١٨٣. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113017>.
٢٤. Rosa, P., C. Sassanelli, A. Urbinati, D. Chiaroni, and S. Terzi. ٢٠٢٠. "Assessing Relations between Circular Economy and Industry ٤.٠: A Systematic Literature Review." *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH* ٥٨(٦):١٦٦٢–٨٧. <https://doi.org/10.1080/00207179.2019.1680896>.
٢٥. Sandelowski, M. ٢٠٠٧. "Handbook for Synthesizing Qualitative Research."
٢٦. Saroha, Manju, Dixit Garg, and Sunil Luthra. ٢٠٢٠. "Pressures in Implementation of Circular Supply Chain Management for Sustainability: An Analysis from Indian Industries Perspective." *Management of Environmental Quality: An*

International Journal ٣١(٥):١٠٩١-١١١٠.
<https://doi.org/10.1108/MEQ-08-2019-0178>

٢٧. Sharma, Rohit, Taab Ahmad Samad, Charbel Jose Chiappetta Jabbour, and Mauricio Juca de Queiroz. ٢٠٢٥. "Leveraging Blockchain Technology for Circularity in Agricultural Supply Chains: Evidence from a Fast-Growing Economy." *Journal of Enterprise Information Management* ٣٨(١):٣٢-٦٧.
<https://doi.org/10.1108/JEIM-10-2023-006>.
٢٨. Skalli, Dounia, Abdelkabir Charkaoui, Anass Cherrafi, Jose Arturo Garza-Reyes, Jiju Antony, and Alireza Shokri. ٢٠٢٤. "Analyzing the Integrated Effect of Circular Economy, Lean Six Sigma, and Industry ٤.٠ on Sustainable Manufacturing Performance from a Practice-based View Perspective." *Business Strategy and the Environment* ٣٣(٢):١٢٠٨-٢٦.
<https://doi.org/10.1002/bse.٣٥٤٠>