Journal of
Improvement Management
Vol. 20 No. 4, Winter 2027 (Serial 74)

Exploring the Challenges of Implementing Smart Circular Economy in the Steel Industry: A Hybrid Approach Based on Thematic Analysis and Fuzzy Cognitive Mapping

Raziye Bahaeloo[1], Zahra Sadeqi-Arani[2]☎, Esmaeil Mazroui Nasrabadi[3]

1- Master of Business Administration, Department of business Management Faculty of financial science, Management and Entrepreneurship, University of Kashan, Kashan, Iran
2- Associate Professor, Department of Marketing Management, Faculty of financial science, Management and Entrepreneurship, University of Kashan, Kashan, Iran
3- Associate Professor, Department of Business Management, Faculty of Financial Science, Management and Entrepreneurship, University of Kashan, Kashan, Iran.

Abstract:

Global crises and the inefficiency of linear development models have highlighted the necessity of transitioning toward sustainable development and a circular economy, particularly in the steel industry due to its high energy consumption and carbon emissions. This study was conducted with the aim of identifying the challenges associated with implementing a smart circular economy in the steel industry. The research adopted a mixed-methods approach (qualitative–quantitative). In the qualitative phase, thematic analysis was employed to identify the challenges, while in the quantitative phase, the relationships among these challenges were analyzed using Fuzzy Cognitive Mapping (FCM). The statistical population consisted of experts in the steel industry. Data were collected through interviews in the qualitative phase and questionnaires in the quantitative phase. The interview process continued until theoretical saturation was achieved, which occurred after conducting 15 interviews. The qualitative findings revealed that the implementation of a smart circular economy in the steel industry is confronted with a set of multidimensional challenges. In total, 58 basic themes (challenges) were extracted, which, after coding and aggregation, were categorized into 13 organizing themes and 6 global themes. FCM classified these challenges into three categories based on their level of influence: influential, influenced, and ordinary factors, indicating the systemic, interconnected, and interdependent nature of these challenges. Influential factors included “limited managerial attitudes and approaches”, “supportive laws and regulations”, “macro-level policies and external constraints”, “market conditions and supply chain status”, and “technical and technological infrastructure” which play a key driving role in implementing this approach. Accordingly, reforming managerial attitudes, expanding sustainable management training programs, strengthening transformational leadership, establishing green performance incentives, revising supportive regulations, and formulating incentive policies for investment in clean technologies can serve as key measures to facilities the transition toward a smart circular economy in the steel industry.

Keywords: Innovation Resistance, Smart Circular Economy; Systems Thinking; Sustainable Waste Management; Steel Industry.

DOI: 10.22034/jmi.2026.583742.3300

[1] Email: raziyebahaoo@gmail.com
[2] Corresponding author: Email: sadeqiarani@kashanu.ac.ir
[3] Email: drmazroui@kashanu.ac.ir

دوره ۲۰ شماره ۴ (پیاپی ۷۴)
فصل زمستان ۱۴۰۵

واکاوی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد: رویکرد ترکیبی تحلیل مضمون و نقشه شناختی فازی

نوع مقاله: پژوهشی (تاریخ دریافت: ۰۳/۰۷/ ۱۴۰۵ تاریخ پذیرش: ۰۱ /۰۸/ ۱۴۰۵) صفحات ۳۰ تا ۵۹

راضیه بهاءلو هوره[۱] کارشناسی ارشد مدیریت کسب و کار، دانشکده علوم مالی، مدیریت و کارآفرینی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
زهرا صادقی آرانی[۲]☎ دانشیار گروه مدیریت بازرگانی، دانشکده علوم مالی، مدیریت و کارآفرینی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.
اسماعیل مزروعی نصرآبادی[۳] دانشیار گروه مدیریت کسب وکار، دانشکده علوم مالی، مدیریت و کارآفرینی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

چکیده

بحران‌های جهانی و ناکارآمدی الگوهای توسعه خطی، ضرورت گذار به توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی را به‌ویژه در صنعت فولاد به دلیل مصرف بالای انرژی و انتشار کربن برجسته کرده است. این پژوهش با هدف شناسایی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد انجام شده است. روش تحقیق آمیخته (کیفی–کمی) است. در مرحله کیفی از روش تحلیل مضمون برای شناسایی چالش‌ها استفاده شد و در مرحله کمی، روابط میان این چالش‌ها با بهره‌گیری از نقشه شناختی فازی تحلیل گردید. جامعه آماری شامل خبرگان صنعت فولاد بوده و داده‌ها در بخش کیفی از طریق مصاحبه و در بخش کمی از طریق پرسش‌نامه جمع‌آوری شد. فرآیند مصاحبه تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت و در نهایت با انجام ۱۵ مصاحبه، اشباع حاصل شد. یافته‌های کیفی نشان داد که پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد با مجموعه‌ای از چالش‌های چندبعدی مواجه است. در مجموع ۵۸ مضمون پایه (چالش) استخراج شد که پس از فرآیند کدگذاری و تجمیع، در قالب ۱۳ مضمون سازمان‌دهنده و ۶ مضمون فراگیر طبقه‌بندی شد. در تحلیل نقشه شناختی فازی، این چالش‌ها بر اساس اهمیت در سه دسته اثرگذار، اثرپذیر و معمولی قرار می‌گیرد که نشان از ماهیتِ سیستمی، درهم‌تنیده و وابسته به یکدیگر این چالش‌هاست. عوامل اثرگذار شامل «نگرش و رویکرد مدیریتی محدود»، «قوانین و مقررات حمایتی»، «سیاست‌های کلان و محدودیت‌های خارجی»، «وضعیت بازار و زنجیره تأمین»و «زیرساخت‌های فنی و تکنولوژیک» هستند که نقش محرک‌های اصلی را در پیاده‌سازی این رویکرد دارند. بر این اساس، اصلاح نگرش مدیریتی، توسعه آموزش‌های مدیریت پایدار، تقویت رهبری تحول‌گرا، ایجاد مشوق‌های عملکرد سبز، اصلاح قوانین حمایتی و تدوین سیاست‌های تشویقی برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک می‌تواند به‌عنوان اقدامات کلیدی در گذار به اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد مؤثر باشد..

واژگان کلیدی: اقتصاد چرخشی هوشمند، دیدگاه سیستمی، صنعت فولاد، مقاومت در برای نوآوری، مدیریت پایدار پسماند.

۱. raziyebahaoo@gmail.com
۲. ☎مسئول مکاتبات:sadeqiarani@kashanu.ac.ir
۳. drmazroui@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، نظام اقتصادی جهانی با مجموعه‌ای از بحران‌های به‌هم‌پیوسته و چندلایه مواجه شده است که در ادبیات علمی معاصر با عنوان «چندبحران[1]» شناخته می‌شود (Lawrence et al. 2024). این بحران‌ها شامل تغییرات اقلیمی، کاهش تنوع زیستی، آلودگی گسترده و تشدید نابرابری‌های اجتماعی هستند که نه به‌صورت مجزا، بلکه به‌عنوان یک سیستم پیچیده و تقویت‌کننده یکدیگر عمل می‌کنند (Rakowski et al. 2025). در چنین شرایطی، الگوهای توسعه خطی سنتی دیگر قادر به پاسخ‌گویی به پیچیدگی‌های محیطی و اقتصادی نیستند و نیاز به گذار به رویکردهای یکپارچه و پایدار بیش از پیش احساس می‌شود (Gatto and Magazzino 2026).

در پاسخ به این چالش‌ها، مفهوم توسعه پایدار به‌عنوان چارچوبی بنیادین مطرح شده است که بر تعادل میان ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تأکید دارد (Ruggerio 2021). با این حال، پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که بُعد زیست‌محیطی نقش زیربنایی در پایداری سایر ابعاد دارد و بدون حفاظت از منابع طبیعی، تحقق توسعه اقتصادی و اجتماعی امکان‌پذیر نخواهد بود (Purvis, Mao, and Robinson 2019) که این مسئله اهمیت بازنگری در الگوهای تولید و مصرف را دوچندان کرده است.

در این راستا، اقتصاد چرخشی به‌عنوان یک رویکرد تحول‌آفرین مطرح شده که هدف آن کاهش وابستگی به منابع اولیه و ایجاد چرخه‌های بسته تولید و مصرف است (Corvellec, Stowell, and Johansson 2022). این رویکرد بر اصولی مانند کاهش مصرف، استفاده مجدد، بازیافت و بازیابی منابع استوار است و تلاش می‌کند ارزش مواد را در طول چرخه عمر آن حفظ کند (Velenturf and Purnell 2021). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که اقتصاد چرخشی می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، مزایای اقتصادی قابل‌توجهی از طریق افزایش بهره‌وری منابع ایجاد کند (Guerra et al. 2021).

در سال‌های اخیر، هم‌زمان با گسترش فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم، مفهوم جدیدی تحت عنوان «اقتصاد چرخشی هوشمند[2]» شکل گرفته است که در آن فناوری‌های دیجیتال مانند اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، بلاک‌چین و تحلیل کلان‌داده‌ها در خدمت تحقق اهداف اقتصاد چرخشی قرار می‌گیرند (Bressanelli et al. 2022). این رویکرد امکان پایش لحظه‌ای جریان مواد، بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش شفافیت در زنجیره تأمین را فراهم می‌سازد (Alcayaga and Hansen 2025). در واقع، اقتصاد چرخشی هوشمند را می‌توان همگرایی دو تحول بزرگ اقتصاد چرخشی و صنعت چهار[3] دانست. این همگرایی اگرچه ظرفیت بالایی برای بهبود بهره‌وری و کاهش اثرات زیست‌محیطی دارد، اما در عمل با موانعی همچون نبود استانداردهای داده، هزینه‌های بالای فناوری، ضعف یکپارچگی سیستم‌ها و مقاومت سازمانی روبه‌رو است (Rosa et al. 2020).

[1] Polycrisis
[2] Smart circular economy
[3] Industry 4.0

در این میان، بخش صنعت به‌ویژه صنایع انرژی‌بر و منابع‌محور مانند فولاد، نقش کلیدی در تشدید یا کاهش این بحران‌ها ایفا می‌کند. صنعت فولاد یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در جهان است و حدود ۷ تا ۱۰ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص می‌دهد (Zhang et al. 2025). همین موضوع باعث شده است که این صنعت در مرکز توجه سیاست‌های کاهش کربن و گذار به توسعه پایدار قرار گیرد. رشد تقاضای جهانی فولاد و افزایش تولید، فشار مضاعفی بر منابع طبیعی و محیط‌زیست وارد کرده است. در چنین شرایطی، حرکت به سمت مدل‌های چرخشی و هوشمند نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت راهبردی است (Walzberg and Carpenter 2024).

با وجود این مزایا، پژوهش‌ها نشان می‌دهند بیش از ۹۰ درصد صنایع همچنان بر اساس مدل خطی فعالیت می‌کنند و هنوز پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی با مجموعه‌ای از چالش‌های ساختاری، فناورانه، نهادی و رفتاری مواجه است (Guerra-Rodríguez et al. 2020; Saccani, Bressanelli, and Visintin 2023; Tamasiga et al. 2022; Torgautov et al. 2021). شناسایی و رفع این چالش‌ها برای پیاده‌سازی و استفاده کامل از مزایای اقتصاد چرخشی ضروری است. بررسی ادبیات نشان می‌دهد که تمرکز پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر معرفی فناوری‌ها یا مزایای اقتصاد چرخشی بوده و کمتر به تحلیل نظام‌مند چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی با تأکید بر هوشمندسازی آن پرداخته شده است (Chhimwal, Agrawal, and Kumar 2022).

نوآوری نخست این پژوهش در سطح مفهومی است. برخلاف مطالعات پیشین که اقتصاد چرخشی و فناوری‌های هوشمند را به‌صورت دو حوزه مستقل بررسی کرده‌اند، پژوهش حاضر با تمرکز بر مفهوم «اقتصاد چرخشی هوشمند»، چالش‌های گذار همزمان به چرخه‌پذیری و هوشمندسازی را به‌صورت یک نظام یکپارچه تحلیل می‌کند. این رویکرد امکان شناسایی موانع ناشی از همگرایی فناوری‌های دیجیتال، الزامات پایداری و الزامات عملیاتی صنعت فولاد را فراهم می‌سازد.

نوآوری دوم پژوهش در زمینه کاربردی و بستر تحقیق است. صنعت فولاد به‌عنوان یکی از راهبردی‌ترین صنایع کشور (محمدی و همکاران، ۱۴۰۰)، علاوه بر سهم قابل توجه در مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها، با محدودیت‌های ویژه‌ای نظیر ناترازی انرژی، محدودیت‌های سرمایه‌گذاری، فرسودگی بخشی از زیرساخت‌ها و الزامات فزاینده زیست‌محیطی مواجه است. با وجود اهمیت این صنعت، مطالعات اندکی به بررسی چالش‌های استقرار اقتصاد چرخشی هوشمند در این بخش پرداخته‌اند. پژوهش حاضر با تمرکز بر صنعت فولاد، شواهدی زمینه‌محور ارائه می‌کند که می‌تواند مبنای طراحی سیاست‌ها و راهبردهای عملی برای تسریع گذار به تولید پایدار و هوشمند در صنایع سنگین باشد.

نوآوری سوم پژوهش در بعد روش‌شناختی نهفته است. این مطالعه با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی تحلیل مضمون و نقشه شناختی فازی، فراتر از شناسایی صرف چالش‌ها حرکت کرده و ساختار علّی و میزان اثرگذاری متقابل میان آن‌ها را نیز آشکار می‌سازد. در حالی که اغلب مطالعات پیشین به فهرست‌سازی یا اولویت‌بندی چالش‌ها محدود بوده‌اند، نقشه شناختی فازی امکان مدل‌سازی روابط

پیچیده، بازخوردی و غیرخطی میان عوامل را فراهم کرده و زمینه شناسایی چالش‌های پیشران، وابسته و اهرمی را مهیا می‌کند. از این طریق، سیاست‌گذاران و مدیران می‌توانند منابع محدود خود را بر مهم‌ترین عوامل اثرگذار متمرکز سازند. این رویکرد ترکیبی، می‌تواند سیاست‌گذاران و مجریان را تخصیص بهینه منابع و مدیریت بهینه ریسک یاری کند.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف شناسایی و اولویت‌بندی نظام‌مند و جامع چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد انجام شده است. این پژوهش به دنبال پاسخ‌گویی به دو سؤال پژوهشی زیر است:

- چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد کدامند؟
- اولویت‌بندی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد بر اساس روش نقشه شناختی فازی چگونه است؟

نتایج این پژوهش می‌تواند به بهبود سیاست‌گذاری صنعتی، ارتقای بهره‌وری منابع و تسریع گذار به سمت اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد کمک کند.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱ اقتصاد چرخشی

همزمان با افزایش دیدگاه‌های انتقادی نسبت به الگوی رشد خطی دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ مفهوم اقتصاد چرخشی به وجود آمد. اقتصاد چرخشی در تقابل با مدل خطی «استخراج-تولید-مصرف-دورریز» قرار دارد و منابع را دارایی‌هایی قابل تعمیر، بازتولید و بازیافت می‌داند (Corvellec, Stowell, and Johansson 2022). در این الگو، زباله به‌عنوان ورودی جدید تولید تعریف می‌شود و طراحی محصولات بادوام و قابل تعمیر اهمیت اساسی دارد (Tamasiga et al. 2022). این رویکرد به‌عنوان راهبردی برای توسعه پایدار معرفی شده که هدف آن کاهش فشار بر محیط‌زیست و افزایش کارایی منابع است (Velenturf and Purnell 2021).

اقتصاد چرخشی بر سه اصل اساسی شامل حذف آلودگی از مرحله طراحی، حفظ ارزش مواد و محصولات در چرخه استفاده، و بازسازی سیستم‌های طبیعی استوار است (Corvellec, Stowell, and Johansson 2022; Bressanelli et al. 2022). بنابراین، اقتصاد چرخشی سیستمی است که هدف آن حذف ضایعات و استفاده مداوم از منابع از طریق بازطراحی محصولات، مواد و فرآیندها است. در این رویکرد، ارزش محصولات و مواد تا حد ممکن در چرخه اقتصاد حفظ می‌شود (Geissdoerfer, Kanda, and Kirchherr 2026). مطالعات نشان می‌دهد این رویکرد نه تنها به کاهش فشارهای زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه به‌عنوان یک مدل اقتصادی نوآورانه می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری، نوآوری در مدل‌های کسب‌وکار و ایجاد ارزش اقتصادی پایدار شود (Guerra et al. 2021; Guerra-Rodríguez et al. 2020; Tamasiga et al. 2022).

۲-۲ هوشمندسازی صنعت و صنعت نسل چهار

هوشمندسازی صنعت و مفهوم «صنعت نسل چهار» به تحول دیجیتال در فرایندهای تولید و مدیریت صنعتی اشاره دارد که با استفاده از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده، رایانش ابری و سیستم‌های سایبر-فیزیکی تحقق می‌یابد (Oztemel and Gursev 2020). هدف اصلی این رویکرد، افزایش بهره‌وری، انعطاف‌پذیری، کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت تولید است (Fragapane et al. 2022; Enrique et al. 2023). در صنعت نسل چهار، ماشین‌ها و تجهیزات به‌صورت هوشمند با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و داده‌ها را در زمان واقعی تحلیل می‌کنند (شهرزاد حقیقی نژاد و همکاران، ۱۴۰۵). در نتیجه تصمیم‌گیری‌ها سریع‌تر و دقیق‌تر انجام می‌شود. همچنین هوشمندسازی صنعت باعث توسعه نگهداری پیش‌بینانه، کاهش خطاهای انسانی و شخصی‌سازی محصولات بر اساس نیاز مشتریان می‌شود (Humphries, Ryan, and Van de Ven 2023). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت چهار می‌تواند مزیت رقابتی سازمان‌ها را افزایش داده و تحول قابل‌توجهی در زنجیره تأمین و مدل‌های کسب‌وکار ایجاد کند (Agostini and Nosella 2021).

۲-۳- اقتصاد چرخشی هوشمند

اقتصاد چرخشی هوشمند به نظامی صنعتی اطلاق می‌شود که در آن اصول بنیادین اقتصاد چرخشی با فناوری‌های نوین و راهبردهای دیجیتال نظیر اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی، داده‌های بزرگ و بلاک‌چین تلفیق می‌شوند. این تلفیق، امکان مدیریت هوشمند چرخه عمر محصول از طراحی تا بازیافت را فراهم کرده و اجرای راهبردهای چرخشی مانند کاهش مصرف، بازاستفاده، بازساخت و بازیافت را به‌صورت کارآمدتر و ارزش‌آفرین‌تر ممکن می‌سازد (Guerra-Rodríguez et al. 2020). برای مثال، از طریق حسگرهای هوشمند و اینترنت اشیاء می‌تواند وضعیت تجهیزات و محصولات را در لحظه پایش کند و هوش مصنوعی با تحلیل داده‌ها، بهترین زمان تعمیر یا بازیافت را پیشنهاد داد. این امر علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید، موجب افزایش بهره‌وری و کاهش اثرات زیست‌محیطی می‌شود. همچنین اقتصاد چرخشی هوشمند به شرکت‌ها کمک می‌کند تا مدل‌های کسب‌وکار پایدار مانند «محصول به‌عنوان خدمت» را توسعه دهند (Rotilio 2021; Turskis and Šniokienė 2024).

اقتصاد چرخشی هوشمند مزایای متعددی برای سازمان‌ها و محیط‌زیست دارد. این رویکرد با استفاده از فناوری‌های دیجیتال، موجب کاهش مصرف منابع طبیعی، افزایش بهره‌وری و کاهش تولید پسماند می‌شود. همچنین بازیافت و استفاده مجدد از مواد را تسهیل کرده و هزینه‌های تولید و انرژی را کاهش می‌دهد (Bressanelli et al. 2022). به‌کارگیری هوش مصنوعی و اینترنت اشیا امکان پایش لحظه‌ای فرایندها و تصمیم‌گیری دقیق‌تر را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، اقتصاد چرخشی هوشمند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه کسب‌وکارهای پایدار و افزایش مزیت رقابتی شرکت‌ها کمک

می‌کند و زمینه تحقق اهداف توسعه پایدار و اقتصاد سبز را فراهم می‌سازد (Khaw-ngern et al. 2021; Hernandez et al. 2025; Alcayaga and Hansen 2025).

۲-۴ پیشینه پژوهش

در ادامه به برخی از پژوهش‌های پیشین در حوزه چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی اشاره می‌شود:

کیانی، مهرداد، عندلیب اردکانی (۱۴۰۱) در پژوهشی به بررسی چالش‌های اقتصاد چرخشی در صنعت شیشه‌سازی یزد پرداختند. در این پژوهش از روکرد فراترکیب برای شناسایی و روش دیمتل-فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی جهت ارائه الگوی روابط بین این چالش‌ها استفاده شد. یافته‌های بخش کیفی شامل شناسایی ۲۷ چالش در ۶ بُعد چالش‌های اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی، مدیریتی، سازمانی، زیرساختی و فناوری، بازار و طراحی بود. در بخش کمی، یافته‌ها نشان داد که چالش‌های اقتصادی تأثیرگذارترین و چالش‌های بازار و طراحی تأثیرپذیرترین چالش‌ها در پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی محسوب می‌شوند. همچنین، چالش‌های سازمانی تعامل بیشتری با سایر چالش‌ها دارد.

روزا و همکاران (Rosa, Sassanelli, and Terzi 2019) با هدف بررسی موانع و عوامل مؤثر بر اجرای مدل‌های کسب‌وکار چرخشی در صنعت مبلمان ایتالیا انجام شد. داده‌ها از طریق مصاحبه نیمه‌ساختاریافته با مدیران شش شرکت تولیدی جمع‌آوری و با تحلیل محتوای کیفی بررسی گردید. نتایج نشان داد چالش‌ها شامل عوامل سازمانی، فناورانه، فرهنگی و زنجیره تأمین است. مهم‌ترین موانع شامل کمبود آگاهی، مقاومت در برابر تغییر، هزینه‌های بالا و محدودیت دسترسی به مواد بازیافتی بود. موفقیت این مدل‌ها نیازمند همکاری بین‌بنگاهی، رهبری مؤثر و حمایت سیاستی است .

بیلی‌توسکی (Bilitewski 2012) در یک مطالعه تحلیلی-مفهومی به بررسی مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی اقتصاد چرخشی پرداخت. داده‌ها از طریق مرور اسناد، سیاست‌ها و مطالعات موردی در کشورهای مختلف گردآوری شد. نتایج نشان داد نبود نظام جهانی ارزیابی ریسک در فرآیند بازیافت می‌تواند منجر به انتشار مواد خطرناک و تهدید سلامت انسان شود. وجود ترکیبات و فلزات سنگین این نگرانی را تقویت کرد. همچنین بر ضرورت تدوین استانداردهای جهانی، طراحی اکولوژیک و ایجاد سیستم مدیریت ریسک تأکید شد.

کوهل و همکاران (Kühl et al. 2018) با مرور نظام‌مند ادبیات به بررسی پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در سیستم‌های محصول-خدمت پرداختند. داده‌ها از پایگاه‌های علمی معتبر جمع‌آوری و بر اساس سه بعد زنجیره تأمین، طراحی محصول و فناوری اطلاعات تحلیل شدند. نتایج نشان داد این سیستم‌ها ظرفیت بالایی برای تحقق اقتصاد چرخشی دارند، اما با چالش‌هایی مانند نبود فرآیندهای رسمی بازیافت، محدودیت‌های طراحی و کمبود زیرساخت مواجه‌اند. در مجموع، توسعه فناوری و بازطراحی ساختارهای عملیاتی برای موفقیت این مدل‌ها ضروری است.

نادیم و همکاران (Nadeem, Garza-Reyes, and Glanville 2018) با مرور نظام‌مند ادبیات، چالش‌ها و عوامل کلیدی اقتصاد چرخشی را در سه سطح کلان، میانه و خرد بررسی کردند. نتایج نشان داد سیاست‌گذاری مؤثر، توسعه فناوری و مشارکت عمومی از عوامل حیاتی موفقیت هستند. همچنین نقش حسابداران در طراحی شاخص‌های غیرمالی و سیستم‌های هزینه‌یابی نوین برجسته شد. چارچوب‌هایی مانند BS8001:2017 نیز به‌عنوان راهنمای اجرایی معرفی گردید. در این مطالعه، موانع ساختاری و الزامات نهادی به‌طور مستقیم تحلیل شده و بر اهمیت هم‌راستایی سیاست‌ها تأکید شده است.

راجپوت و همکاران (Rajput and Singh 2019) روابط علّی میان مؤلفه‌های اقتصاد چرخشی و فناوری‌های صنعت چهار را در زنجیره تأمین بررسی کردند. داده‌ها از طریق پرسش‌نامه و تحلیل دیمتل و PCA تحلیل شد. نتایج نشان داد ۶ عامل کلیدی شامل هوش مصنوعی، اکوسیستم تولید، سیاست‌ها و چابکی شبکه نقش محوری دارند. همچنین چالش‌هایی مانند پیچیدگی سیستم، هزینه بالا و عدم هم‌راستایی استانداردها شناسایی شد. یافته‌ها چارچوبی برای پیوند دیجیتالی‌سازی صنعتی و پایداری محیط‌زیستی ارائه می‌دهد.

زوچلا و همکاران (Zucchella and Urban 2020) نقش مدل‌های کسب‌وکار چرخشی را در گذار به اقتصاد پایدار بررسی کردند. مطالعه بر اساس مرور منابع و تحلیل تطبیقی شرکت‌های بزرگ و نوپا انجام شد. نتایج نشان داد شرکت‌های نوپا نوآورتر اما کم‌منبع‌تر هستند، در حالی که شرکت‌های بزرگ منابع بیشتری دارند اما با مقاومت سازمانی مواجه‌اند. موفقیت این مدل‌ها نیازمند بازطراحی زنجیره ارزش، مشارکت ذی‌نفعان و ایجاد اکوسیستم هماهنگ است. چالش‌هایی مانند محدودیت منابع، مقاومت فرهنگی و عدم پذیرش مصرف‌کننده نیز برجسته شد.

کنتو و همکاران (Cantú, Aguiñaga, and Scheel 2021) چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در SMEهای مکزیک را بررسی کردند. داده‌ها از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و تحلیل تماتیک گردآوری شد. نتایج نشان داد موانع اصلی شامل نبود زیرساخت بازیافت، ضعف لجستیک معکوس، محدودیت مالی، فرهنگ مالکیت و آگاهی پایین مدیریتی است. همچنین عدم انطباق مدل‌های کسب‌وکار با شرایط محلی از چالش‌های مهم بود. مطالعه تأکید دارد موفقیت در اقتصادهای نوظهور نیازمند تطبیق محلی و توسعه ظرفیت یادگیری سازمانی است.

سینگ و همکاران (Singh et al. 2021) در یک مرور نظام‌مند، چالش‌ها و فرصت‌های اقتصاد چرخشی را در صنایع مختلف بررسی کردند. داده‌ها از ۳۰۰۰ مطالعه علمی و با تحلیل هم‌رخدادی کلیدواژه‌ها در VOSviewer تحلیل شد. نتایج نشان داد با وجود توسعه نظری، پیاده‌سازی عملی با موانع ساختاری، فناورانه و نهادی مواجه است. همچنین کمبود داده‌های قابل اعتماد و نبود مدل‌های استاندارد از چالش‌های مهم بود. پژوهش بر نقش داده‌های باکیفیت، مدل‌های کسب‌وکار نوین و مشارکت ذی‌نفعان تأکید دارد.

پیلا و همکاران (Piila et al. 2022) محرک‌ها و چالش‌های اقتصاد چرخشی را در شرکت‌های فنلاند بررسی کردند. داده‌ها از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و تحلیل مضمون جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد عوامل مؤثر بر اساس زمان ورود شرکت‌ها و سطح بلوغ مدل کسب‌وکار متفاوت است. چالش‌ها شامل کمبود منابع، محدودیت رشد، نبود حمایت بیرونی و موانع قانونی بودند. همچنین تفاوت در بلوغ شرکت‌ها باعث تفاوت در نوع محرک‌ها و موانع شده است.

دویودی و همکاران (Dwivedi et al. 2022) چالش‌های هم‌زمان اقتصاد چرخشی و صنعت چهار را در صنعت کفش بنگلادش بررسی کردند. داده‌ها از پرسش‌نامه، طوفان فکری و دیمتل جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد ضعف سیاست‌گذاری، کمبود شایستگی مدیریتی، نبود هماهنگی زنجیره تأمین و ابهام در منافع اقتصادی از مهم‌ترین موانع هستند. همچنین حمایت نهادی ناکافی نقش کلیدی در شکست پیاده‌سازی دارد. پژوهش روابط علّی میان چالش‌ها را تبیین کرد.

کومار و همکاران (Kumar et al. 2023) چالش‌های اقتصاد چرخشی در زنجیره تأمین غذایی هند را تحلیل کردند. داده‌ها از طریق دلفی و مصاحبه خبرگان جمع‌آوری و با ISM و دیمتل تحلیل شد. نتایج نشان داد چالش‌ها در سه سطح ریشه‌ای، میانی و سطحی قرار دارند. سیاست‌گذاری ضعیف و نبود زیرساخت از عوامل ریشه‌ای بودند. همچنین نبود شفافیت زنجیره تأمین و شاخص‌های عملکردی از چالش‌های میانی محسوب شدند. مطالعه چارچوبی برای سیاست‌گذاری پایدار ارائه داد.

آگی‌یکوم و همکاران (Agyekum and Amudjie 2024) چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در صنعت ساخت‌وساز غنا را بررسی کردند. داده‌ها از ۱۶۲ متخصص و از طریق پرسش‌نامه ساخت‌یافته گردآوری شد. تحلیل با روش‌های آماری، تحلیل عاملی و آزمون‌های استنباطی انجام گرفت. نتایج نشان داد چالش‌ها در هفت دسته شامل زیرساختی، مالی، فناورانه، زیست‌محیطی، مقرراتی، بازار و مصرف‌کننده طبقه‌بندی می‌شوند. این پژوهش یک مدل معتبر برای تحلیل چالش‌های مشابه در سایر صنایع ارائه کرد.

رشید و همکاران (Rashid et al. 2025) در پژوهش به بررسی چالش‌های اقتصاد چرخشی در بخش لوازم جانبی پوشاک در کشور بنگلادش پرداخته اند. در این پژوهش از یک چارچوب یکپارچه تصمیم‌گیری فازی برای شناسایی و رتبه‌بندی استفاده شد. سیزده شناسایی که در بین آن‌ها چالش «رهبری ناکافی و تعهد مدیریت ارشد»، «کمبود تخصص و منابع» و «اجرای ناکافی مقررات زیست‌محیطی» به عنوان مهم‌ترین موانع پدیدار شدند.

۳- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از روش‌شناسی آمیخته استفاده می‌کند که شامل دو فاز کیفی و کمی است. در فاز کیفی و در پاسخ به سؤال پژوهشی اول، با استفاده از روش تحلیل مضمون[1]، چالش‌های پیاده‌سازی

[1] Thematic analysis

اقتصاد چرخشی هوشمند شناسایی و در فاز کمی و در پاسخ به سؤال پژوهشی دوم با بهره‌گیری از روش نقشه شناختی فازی[1]، روابط بین این عوامل مدل‌سازی و تحلیل گردید.

جامعه آماری پژوهش حاضر شامل خبرگان صنعت فولاد است که واجد ویژگی‌های مشخصی شامل حداقل سه سال سابقه کاری مرتبط، تحصیلات دانشگاهی و تجربه اجرایی در حوزه صنعت فولاد یا زمینه‌های کاربردی مرتبط با اقتصاد چرخشی بوده و همچنین خبرگان دانشگاهی که در زمینه‌های اقتصاد چرخشی هوشمند و صنعت فولاد دارای مطالعات و پژوهش‌های علمی بودند. این گروه شامل مدیران و کارشناسان ارشد فعال در شرکت‌های فولاد مبارکه اصفهان، ذوب‌آهن اصفهان، فولاد سبا، فولاد آلیاژی، فولاد تکنیک، آهن پایا، سریر صنعت تام و شرکت پشتیبانی و توسعه فناوری و نوآوری فولاد مبارکه بود. روش نمونه‌گیری هدفمند و گلوله برفی[2] بوده که با هر خبره به طور میانگین ۴۰ دقیقه مصاحبه صورت گرفت. مصاحبه‌ها تا اشباع نظری[3] داده‌ها (زمانی که اطلاعات جدیدی از مصاحبه‌ها حاصل نگردد و الگوهای مفهومی موجود تثبیت شوند) ادامه پیدا کرد. فرآیند گردآوری داده‌ها تا رسیدن به مصاحبه پانزدهم ادامه یافت و نهایتاً با انجام پانزده مصاحبه، اشباع نظری محقق شد.

برای تحلیل داده‌ها از روش تحلیل مضمون استفاده شده است. این روش شامل مراحلی نظام‌مند برای استخراج، سازمان‌دهی و تفسیر مضمون‌ها و الگوهای مفهومی موجود در داده‌ها است. به‌کارگیری این رویکرد، پژوهشگر را قادر می‌سازد تا الگوهای مفهومی و مضامین کلیدی مرتبط با موضوع را شناسایی و تبیین نماید. گام‌های روش تحلیل مضمون عبارت‌اند از آشنایی عمیق با داده‌ها از طریق بازخوانی مکرر مصاحبه‌ها، استخراج و کدگذاری مفاهیم اولیه، سازمان‌دهی کدها و شناسایی مضامین اصلی و فرعی، بازبینی و ارزیابی انسجام و اعتبار مضمون‌ها، تعریف و نام‌گذاری دقیق مضامین برای تبیین مرزهای مفهومی، و در نهایت تدوین گزارش نهایی. نتیجه این فرایند، ارائه شبکه‌ای منسجم از مضامین و روابط مفهومی برای تفسیر و درک عمیق پدیده مورد مطالعه است.

در این پژوهش، برای افزایش روایی و پایایی، از روش‌های مختلفی استفاده شد. مثلث‌سازی داده‌ها[4] با بهره‌گیری از مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان صنعتی و دانشگاهی، امکان بررسی چندبعدی پدیده را فراهم کرد. برای تضمین پایایی، روش بازبینی توسط همکار[5] به‌کار گرفته شد؛ به‌گونه‌ای که کدهای استخراج‌شده توسط کدگذار دوم بررسی، اصلاح و پالایش شدند و کدهای نامرتبط حذف گردیدند. این فرایند رفت‌وبرگشتی موجب کاهش سوگیری و افزایش دقت تحلیل شد. همچنین، حسابرسی پژوهش[6] از طریق مستندسازی شفاف مراحل تحلیل، ارائه پروتکل مصاحبه و متن کامل مصاحبه‌ها، امکان ارزیابی مستقل یافته‌ها را فراهم و اعتمادپذیری پژوهش را تقویت کرد.

[1] Fuzzy Cognitive Map
[2] Snowball sampling
[3] Theoretical saturation
[4] Data triangulation
[5] peer review
[6] research auditing

به‌منظور گردآوری داده‌ها در فاز کمی تحقیق، از روش میدانی و پرسشنامه محقق‌ساخته (با استفاده از معیارهای استخراج شده از مرحله کیفی) استفاده شد. با توجه به اعتبارسنجی‌های کیفی فاز اول تحقیق، روایی پرسش‌نامه تأیید شد. پایایی پرسشنامه نیز از طریق اتفاق نظر حداقل ۸۰ درصدی خبرگان تأیید شد.

در فاز دوم و به منظور تعیین اثرگذاری و روابط بین چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در صنعت فولاد از نقشه شناختی فازی استفاده شد. نقشه شناختی فازی یک روش تحلیلی است که در آن روابط علت و معلولی بین مفاهیم مدل‌سازی می‌شوند. این روش نخستین بار توسط کوسکو[1] در سال ۱۹۸۶ معرفی شد (Kosko 1986). نقشه شناختی فازی برای مدل‌سازی روابط علت و معلولی و تحلیل روابط پیچیده بین مفاهیم استفاده می‌شود (Karatzinis and Boutalis 2025). این روش در حوزه‌های مختلف ازجمله علوم اجتماعی، علوم سیاسی، آموزش و مهندسی کاربرد دارد (Felix et al. 2019). در روش نقشه شناختی فازی از چهار ماتریس استفاده می‌شود که گام‌های آن عبارت‌اند از:

ایجاد ماتریس اولیه: ماتریس اولیه ماتریسی با ابعاد n*m است. n بیانگر چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در صنعت فولاد است و m بیانگر تعداد خبره‌ها است. هر درایه نشان‌دهنده میزان وزن یا اهمیتی است که خبره (j) به عامل موفقیت (i) داده است.

ایجاد ماتریس فازی: در این قسمت، بردارهای عددی موجود در ماتریس مرحله قبل تبدیل به مجموعه‌های فازی می‌شوند که این تبدیل در بازه صفر تا یک انجام می‌شود. در این گام از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\boldsymbol{Max(O_{iq}) \rightarrow Xi(O_{iq}) = 1} \quad (۱)$$

$$Min(O_{iq}) \rightarrow Xi(O_{iq}) = 0 \quad (۲)$$

$$Xi(O_{ij}) = \frac{O_{ij} - Min(O_{iq})}{Max(O_{iq}) - Min(O_{iq})} \quad (۳)$$

Xi (Oij) به معنای درجه عضویت درایه Oi_j در بردار Vi است. برای منطقی‌تر شدن عضویت‌ها لازم است کران بالا و پایین تعریف شود. بر این اساس اگر V_i برداری عددی با m درایه باشد که به هر مفهوم i تخصیص پیدا می‌کند و $j=1,2,\ldots,M$ باشد مقدار کران بالا αu و کران پایین αl به صورت فرمول ۴ و ۵ تعیین می‌شود:

$$(Oij \geq \alpha u) \rightarrow Xi\ (Oij) = 1 \forall\ \mathbf{j = 1, \ldots, m} \quad (۴)$$

$$\forall\ j = 1, \ldots, m\ Oij\ (Oij \leq \alpha l) \rightarrow Xi\ (Oij) = 0 \quad (۵)$$

ایجاد ماتریس قدرت روابط: در این ماتریس سطرها و ستون‌ها نشان‌دهنده چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در صنعت فولاد و به هر درایه عددی در بازه یک *تا* منفی یک اختصاص می‌یابد. هر چالش به صورت یک بردار عددی (S_i) که دارای n درایه است نشان داده می‌شود. اگر

[1] Kosko

بردارهای V_1 و V_2 دارای رابطه مستقیم باشند نزدیک‌ترین رابطه میان آن‌ها برای هر j به شکل رابطه ۶ و اگر رابطه غیرمستقیم داشته باشند به شکل رابطه ۷ خواهد بود:

$$\boldsymbol{d_j = x_1(v_j) - x_2(v_j)} \quad (۶)$$

$$d_j = x_1(v_j) - \left(1 - x_2(v_j)\right) \quad (۷)$$

$$AD = \frac{\sum_{i=1}^{m}|d_j|}{m} \quad (۸)$$

$$s = 1 - AD \quad (۹)$$

ایجاد ماتریس نهایی و تعیین روابط بین مؤلفه‌ها: بعد از تکمیل ماتریس قدرت روابط، بعضی از داده‌ها می‌تواند گمراه‌کننده باشند درنتیجه با نظر خبرگان، این روابط تعدیل می‌شود.

ترسیم شبکه مضامین در فاز اول به وسیله نرم افزار ایکس مایند[1] و در فاز دوم با استفاده از نرم‌افزار آنلاین منتال مدلر[2] صورت گرفت.

۴- یافته‌ها

به‌منظور تعیین چالش‌ها، پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در صنعت فولاد، مصاحبه‌هایی با خبرگان صنعتی و دانشگاهی انجام شد. آمار توصیفی مربوط به خبرگان مشارکت‌کننده در پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: آمار توصیفی خبرگان فاز اول پژوهش

کد	سن	تحصیلات	سابقه کاری	حوزه فعالیت	فاز مورد استفاده
۱	۴۹	دکتری مهندسی مکانیک	۲۳	خبره دانشگاهی	فاز ۱ و ۲
۲	۵۵	دکتری مهندسی مواد و متالورژی	۳۰	خبره دانشگاهی	فاز ۱ و ۲
۳	۴۵	دکتری مهندسی صنایع و برنامه‌ریزی سیستم‌ها	۱۸	خبره دانشگاهی	فاز ۱ و ۲
۴	۵۶	دکتری مهندسی صنایع و برنامه ریزی سیستم‌ها	۲۹	خبره دانشگاهی	فاز ۱ و ۲
۵	۳۷	کارشناسی ارشد برق	۷	حوزه اتوماسیون سازی خط فولاد	فاز ۱ و ۲
۶	۳۶	کارشناسی ارشد مهندسی شیمی	۸	عضو کارگروه پسماند اقتصاد چرخشی فولاد	فاز ۱ و ۲
۷	۳۴	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع	۱۰	عضو کارگروه انرژی اقتصاد چرخشی فولاد	فاز ۱ و ۲

[1] X mind
[2] Mental Modeler

کد	سن	تحصیلات	سابقه کاری	حوزه فعالیت	فاز مورد استفاده
۸	۳۸	کارشناسی ارشد مکانیک	۷	کارشناس مکانیک واحد پشتیبانی فنی فولاد	فاز ۱ و ۲
۹	۳۶	کارشناسی ارشد مواد و متالورژی	۱۱	کارشناس تولید خط نورد گرم فولاد	فاز ۱ و ۲
۱۰	۲۹	کارشناسی حسابداری	۵	حسابدار و انباردار	فاز ۱ و ۲
۱۱	۴۰	کارشناسی مکانیک	۶	کارشناس تحقیق و توسعه	فاز ۱ و ۲
۱۲	۳۳	کارشناسی ارشد عمران	۷	کارشناس پروژه	فاز ۱ و ۲
۱۳	۳۵	کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی	۵	کارشناس تولید خط نورد سرد فولاد	فاز ۱ و ۲
۱۴	۲۸	کارشناسی ارشد مدیریت کارآفرینی	۷	خریدوفروش قطعات فولادی	فاز ۱ و ۲
۱۵	۵۱	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع	۲۵	معاونت برنامه‌ریزی و توسعه	فاز ۱

پس از انجام مصاحبه‌ها و کدگذاری اولیه گزاره‌های کلامی، نمونه‌ای از چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد شناسایی شد. در گام نخست، مفاهیم اولیه استخراج‌شده از داده‌های مصاحبه در جدول ۲ ارائه‌شده‌اند. این مفاهیم، پایه و مبنای تشکیل مضامین اصلی در مراحل بعدی تحلیل مضمون بوده‌اند.

جدول ۲: نمونه‌هایی از گزاره‌های کلامی و مضامین پایه (چالش‌های اقتصاد چرخشی هوشمند درصنعت فولاد)

گزاره‌های کلامی	مفهوم استخراج‌شده اولیه
همکاری و کار تیمی به نظر ضعیفه توی این صنعت (فولاد) (P2). ضعف در کار تیمی و همکاری میان کارکنان فولادسازی یکی از عوامل اصلی افت کیفیت تولید و یکی از چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمندِ(P4).	ضعف کار تیمی
چالش اصلی که ما توی پروژه هوشمند سازی خط نورد داشتیم تو داده‌هایی بود که در واقع تو سیستم ثبت میشه ولی این داده‌ها دقت لازم رو نداره (P4) . این نیروها خسته‌اند و دقت کافی در ورود داده‌ها ندارن.(P4) .	ضعف در ثبت داده‌ها
ما استادامون یا کت و شلواری ان یا خیلی اهل علم نیستن... نتونستن ارتباط صنعت و دانشگاه رو ایجاد کنن(P5) . دانشگاه پروژه‌های سطحی میده که به درد هوشمندسازی اقتصادچرخشی نمی‌خوره (P5).	ضعف ارتباط صنعت با دانشگاه دشواری در هماهنگی تیم‌های علمی و صنعتی کم‌کیفیت بودن همکاری صنعت با دانشگاه

گزاره‌های کلامی	مفهوم استخراج‌شده اولیه
قوانین و مقررات ما هنوز به صورت کامل با مفاهیم اقتصاد چرخشی هماهنگ نیستن. مثلاً نبود مشوق‌های مالیاتی یا جرائم کافی برای آلودگی هم باعث شده که انگیزه شرکت‌ها برای حرکت به سمت اقتصاد چرخشی هوشمند کاهش پیدا کنه (P8).	ضعف در هماهنگی قانون و مقررات با مفاهیم اقتصادچرخشی هوشمند
	ضعف در ضمانت اجرایی و عدم حمایت قانونی
	نبود مشوق های مالیاتی
در صنعت هوشمندسازی اقتصادچرخشی فولاد دو تا چالش خیلی بزرگ تو کشور داریم، یکی تولید گریدهای فولادی با ارزش افزوده پایین((P5)	ارزش افزوده پایین محصولات
	ناتوانی در تولید محصولات فولادی با ارزش افزوده بالا
آب‌هایی که توی دستگاه استفاده میشود خود فولاد تصفیه میکند ولی خب بحث گرد و غباری که غبارگیرها میگیرند و سرباره هنوز به این درجه نرسیده(P12).	مدیریت ناقص پسماند و گردوغبار
یکی از چالش هامون برای هوشمند سازی اقتصاد چرخشی اتوماتیک کردن تمامی تجهیزات و گرفتن فیدبک‌های آنلاینه به گونه ای که بتوان بین تمامی اجزای درگیر در تولید ورق فولادی ارتباط لحظه ای و آنلاین ایجاد کرد(P9).	ضعف در هوشمندسازی خطوط
چالش بعدی به‌روزرسانی تجهیزات که باید قابلیت اتوماسیون داشته باشن(P9).	نوسازی زیرساخت‌ها
خب لازمه این کار اینه که تکنولوژی این دستگاه‌ها بخواد عوض بشه (P8).	
محصولات فناورانه و هوشمند صنعت فولاد هنوز به مرحله‌ای نرسیدن که در محیط واقعی فولاد قابل استفاده باشن(P6).	ضعف در تجاری‌سازی فناوری‌های هوشمند
به‌عنوان مجری دستمون باز نیست که نیرو زیاد بگیریم نیروی خوب بگیریم چون این پول (P4).	کمبود منابع مالی
در حوزه هوشمندسازی خط تولید باید منابع مالی قوی داشته باشیم (P8).	ضعف در تسهیلات بانکی
هزینه اولیه پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند خیلی بالاست. مخصوصاً وقتی بخواییم تجهیزات جدید وارد کنیم یا نرم‌افزارهای پیشرفته نصب کنیم. از اون طرف، بانک‌ها و نهادهای مالی هم تمایل زیادی به حمایت از پروژه‌های بلندمدت یا نوآور ندارن. (P6)	هزینه‌های اولیه هنگفت پیاده‌سازی
	هزینه بالای خرید و واردات تجهیزات
	عدم تمایل بانک‌ها از پروژه‌های بلندمدت و نوآور
چالش اساسی و مهم‌ترین‌ش بحث تو حوزه هوشمندسازی اقتصادچرخشی سرمایه‌ای هست که شما برای این کار می‌خواین(P10).	نیاز به سرمایه‌گذاری بالا
سرمایه اولیه، سرمایه در گردش بالا میخواد چون آهن خیلی خیلی مبلغ سنگینی میخواد(P10).	نیاز به سرمایه درگردش بالا
یکی از مواد زائدی که در حین ساخت فولاد استحصال میشه سرباره هست که مقدارش مقدار قابل توجهی هست و الان یکی از چالش‌های زیست محیطی فولاد مبارکه بحث سربار تقریبا حدود ده تا بیست میلیون تن سرباره داخل فولاد که انباشته شده(P12).	مشکلات مدیریت پسماند
	مشکل انباشت سربارها
مسئله فرهنگی تو کشور ما اصلا بهش توجه نمیشه. متأسفانه فرهنگ مصرف‌گرایی و ترجیح کالاهای ارزان‌تر باعث می‌شه که پذیرش محصولات سبز یا بازیافتی سخت باشه. در سازمان‌ها هم فرهنگ تغییر و نوآوری به اندازه کافی قوی نیست و مقاومت در برابر تغییر زیاد دیده می‌شه (P14).	فرهنگ مصرف گرایی و ترجیح کالاهای ارزان
	پایین بودن آگاهی عمومی
	نبود فرهنگ نوآوری و تغییر در سازمان
یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مسیر تحقق اقتصاد چرخشی هوشمند، ناترازی در زیرساخت‌ها و انرژی است(P15) .	ناترازی انرژی
تأمین پایدار مواد اولیه هم معضل بزرگیه؛ چون ذخایر سنگ آهن محدوده و فعالیتهای اکتشافی کافی نبوده (P15).	ضعف در تأمین مواد اولیه پایدار

گزاره‌های کلامی	مفهوم استخراج‌شده اولیه
با توجه به شرایط سیاسی منطقه‌ای حال حاضر کشور، برای پیاده‌سازی اقتصادچرخشی هوشمند در ایران اتصال به سرورهای هوش مصنوعی محدودیت داره(P13) .	محدودیت‌های دسترسی به فناوری‌های هوشمند
	محدودیت‌های سیاسی و امنیتی
به نظر من خیلی خلاء نظارتی وجود داره.(P14)	خلاهای نظارتی
تو این مدت (مدت زمان پیاده‌سازی طرح هوشمند سازی اقتصاد چرخشی) ممکنه حتی ما پسماند بیشتری هم داشته باشیم تا بهینه بشه، پس این چالش رو داریم(P7).	ضعف در بهینه‌سازی
	افزایش موقت پسماند در دوره‌ی گذار به فرآیندهای بهینه
یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها به نظر من بحث زیرساخت‌های فنی هست. الان خیلی از خط‌های تولید ما هنوز براساس سیستم‌های سنتی کار می‌کنن و هنوز دیجیتال‌سازی به شکل جدی توشون پیاده نشده. اقتصاد چرخشی وقتی معنا پیدا می‌کنه که همه‌چیز هوشمند و قابل رصد باشه(P4) .	زیرساخت های فنی
	پابرجا بودن سیستم‌های تولیدی سنتی کار
اما مثلا قراضه‌هایی که تو سطح شهر جمع‌آوری میشن سیستمی وجود نداره برای رهگیری شون(P7) .	نبود سیستم یکپارچه برای مدیریت قراضه‌ها
اما خیلی از پروژه‌های اقتصاد چرخشی هوشمند پروژه‌های طولانی‌مدت هستند که مثلا به زودی به نتیجه اقتصادی نرسی(P7) .	طولانی‌مدت بودن پیاده‌سازی طرح
	دیربازده بودن پیاده‌سازی طرح
خیلی از کارکنان و حتی مدیران دانش کافی درباره مفاهیم اقتصاد چرخشی هوشمند، فناوری‌های جدید و روش‌های مدیریتی نوین ندارند. یا حتی اصلا مایل به یادگیری نیستن... نیروی متخصص نداریم (P14).	دانش و مهارت لازم کارکنان
	نبود انگیزه یادگیری میان کارکنان
	نبود افراد متخصص و با تجربه حوزه هوشمندسازی
به نظر من چیزی که توی فولاد مبارکه جا افتاده اینه که اقتصاد چرخشی هوشمندحتما باید درآمدزا باشه توجیه اقتصادی داشته باشه(P6) . در صورتی که هدف اصلیش رسیدن به زیرو ویسته، یعنی هیچ ضایعاتی نداشته باشیم . (P6) هدفشون از استفاده مجدد ضایعات صرفاً سود اقتصادی بوده(P14) . مدیران میخوان هر کاری که میکنن حتما سود هم داشته باشه(P6).	نگرش اشتباه نسبت به توسعه پایدار
	درک نادرست مدیران از اهداف اقتصاد چرخشی
	نگرش مدیران به اقتصاد چرخشی صرفاً به‌عنوان منبع سود مالی
این کار لازمه‌اش اینه که تکنولوژی این دستگاه بخواد عوض بشه مدیر باید اینو درک کرده باشه(P8) .	چالش به‌روزرسانی تکنولوژی
	نگرش مدیر نسبت به فناوری و هوشمندسازی
هنوز خیلی‌ها اقتصاد چرخشی هوشمند رو به عنوان یک ضرورت نمی‌بینن و بیشتر دنبال حفظ وضعیت فعلی هستن. چرا وقتی سود من ار راه های ساده تر تامین میشه راه سخت تر رو انتخاب کنم؟(P8)	ضروری نبودن اجرای اقتصادچرخشی هوشمند از دید مدیران
	سود نگر بودن و کوتاه نگری مدیران
هزینه بارگیری عرف شده، قانونی نیست کارت به کارت می‌کنن(P14) .	هزینه‌های غیر رسمی بخش لجستیک
هنوز بازار محصولات سبز یا بازیافتی به خوبی شکل نگرفته و چون قاعدتا قیمت تمام شده این محصولات بالاتره مشتریان زیادی حاضر نیستند قیمت بالاتر برای محصولات دوستدار محیط زیست پرداخت کنن (P14).	شکل نگرفتن بازار فولاد سبز
	قیمت تمام شده بالای فولاد سبز
هوش مصنوعی موقعی بهره‌وری داره که برای استفاده ازش دانش پایه‌ای وجود داشته باشه(P14). ولی هنوز از نظر دانش فناوری ضعف داریم (P15).	کمبود دانش فنی پایه

گزاره‌های کلامی	مفهوم استخراج‌شده اولیه
اولین و مهم ترین پارامتری که برای این کار واجبه اینکه شما بتونید مسائل اقتصاد و مالی رو درست کنید که بتونه رقابت کنه (P12).	ضعف در توجیه‌پذیری اقتصادی در اجرای پروژه‌های زیست‌محیطی
	اولویت‌یافتن منافع اقتصادی بر اهداف زیست‌محیطی
هزینه اجرا و پیاده‌سازی این طرح‌ها خیلی بالاست (P1).	هزینه بالا اجرای پروژه
وقتی دو دو تا چهار تا محاسبه میکنیم از نظر اقتصادی به سختی میتونیم مدیران را راضی کنیم (چالش پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند)(P1).	ضعف توجیه اقتصادی طرح‌ها برای مدیران
چالش سیاسی میشه وقتی که یه کلان روندی در کل کشور دچار مشکله (P1).	ضعف در کلان روندهای مملکتی
یه موضوع دیگه ای چالش‌ها که میشه سیاسی (چالش پیاده‌سازی اقتصادچرخشی هوشمند) به نظر من ارتباط‌های بین المللیه(P1).	محدودیت در تعاملات فناورانه بین‌المللی
گفتم برای پیاده‌سازی اقتصادچرخشی هوشمند از نظر فنی هم باید کلی کار کنیم دیگه و دسترسی هم نداریم به منابع بین المللی خودمون(P1).	محدودیت دسترسی به دانش و منابع فنی بین‌المللی
شرکتهای فولادی خصوصی برعکس اینکه با صنایع دیگه ای کار میکنن و شرکتهای خصوصی خیلی خوب کار میکنن اما شرکتهای فولادی خصوصی به حد. به اصطلاح تکنولوژی‌های بالا نرسیده است(P1).	شکاف فناوری بین شرکت‌های بزرگ و کوچک
در هر صورت انگیزه ای از سمت مدیران در این زمینه نیست.در حالی که تکنولوژی‌های تو کل دنیا وجود داره (P1).	نبود انگیزه مدیربرای بهره‌گیری از فناوری
اشکال در اشتغال زایی از طریق سیستم چرخشی هوشمند فولاد و اشتغال زدایی و کاهش نیروی انسانی بالاخص اپراتورهای دستگاه‌ها(P11). هوشمندسازی کار خودشو خراب میکنه. ممکنه بیکارش کنه(P6).	تهدید امنیت شغلی اپراتورها
	نگرانی کارکنان از جایگزینی توسط فناوری
در داخل سازمان‌ها، ساختارهای قدیمی مانع از انعطاف و نوآوری می‌شن. به علاوه، نبود فرهنگ همکاری بین بخش‌ها. کارمندی که ۴۰ -۵۰ سالشه اصلا انگیزه نداره برای اینکه تغییر کنه (P14).	ساختار قدیمی سازمانی و عدم انطباق با نوآوری
	نبود فرهنگ همکاری بین بخشی
به‌همون علتی که خیلی از فرآیندهای فولادی اپراتور بیس هست و این کار رو برای پیاده‌سازی اقتصادچرخشی هوشمند دشوار میکنه (P5).	وابستگی فرآیندهای تولید به مهارت اپراتور

بر اساس استخراج مفاهیم اولیه ارائه‌شده در جدول ۲، چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد در قالب ۵۸ مضمون پایه، ۱۳ مضمون سازمان‌دهنده و ۶ مضمون فراگیر دسته‌بندی شدند. نتایج این دسته‌بندی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: دسته بندی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند صنعت فولاد

مضمون پایه	مضمون سازمان‌دهنده	مضمون فراگیر
نگرش اشتباه نسبت به توسعه پایدار درک نادرست مدیران از اهداف اقتصاد چرخشی نگرش مدیران به اقتصاد چرخشی صرفاً به‌عنوان منبع سود مالی الزام‌آور نبودن اجرای اقتصاد چرخشی هوشمند از دید مدیران سودنگر بودن و کوتاه‌نگری مدیران	نگرش و رویکرد مدیریتی محدود	چالش‌های ساختاری و مدیریتی

مضمون پایه	مضمون سازمان‌دهنده	مضمون فراگیر
اولویت‌یافتن منافع اقتصادی بر اهداف زیست‌محیطی نگرش منفی مدیران نسبت به فناوری و هوشمندسازی عدم انگیزه مدیران برای بهره‌گیری از فناوری		
ضعف کار تیمی نبود فرهنگ همکاری بین‌بخشی	فرهنگ سازمانی و تعاملات درونی	
نبود انگیزه یادگیری میان کارکنان نبود فرهنگ نوآوری و تغییر در سازمان ساختار قدیمی سازمانی و عدم انطباق با نوآوری	مقاومت در برابر تغییر و نوآوری	
طولانی‌مدت بودن پیاده‌سازی طرح ضعف در توجیه‌پذیری اقتصادی پروژه‌های زیست‌محیطی ضعف توجیه اقتصادی طرح‌ها برای مدیران دیربازده بودن پیاده‌سازی طرح قیمت تمام‌شده بالای فولاد سبز	توجیه‌پذیری و بازگشت سرمایه	چالش های مالی و اقتصادی
هزینه‌های اولیه هنگفت پیاده‌سازی و تجهیز هزینه‌های مضاعف واردات تجهیزات نیاز به سرمایه در گردش بالا کمبود منابع مالی ضعف در تخصیص تسهیلات بانکی به فعالیت‌های سبز عدم تمایل بانک‌ها به پروژه‌های بلندمدت نوآوری	هزینه‌ها و تأمین منابع مالی	
ضعف در نوسازی زیرساخت‌های فنی لازم جهت هوشمندسازی فرایندها پابرجا بودن و تعصب به سیستم‌های تولیدی سنتی دشورای تطبیق و هماهنگی ساختار سنتی و ساختار جدید فناوری محدودیت‌های دسترسی به فناوری‌های هوشمند شکاف فناوری بین شرکت‌های بزرگ و کوچک	زیرساخت‌های فنی و تکنولوژیک	محدودیت‌های فناوری و زیرساختی
عدم همکاری مناسب بین صنعت با دانشگاه در پروژه‌های سبز کیفیت پایین پروژه‌های مشترک بین صنعت با دانشگاه در پروژه‌های سبز دشواری در هماهنگی تیم‌های علمی و صنعتی در پروژه‌های سبز	شکاف دانشگاه و صنعت	
نبود افراد متخصص و با تجربه در حوزه هوشمندسازی عدم تطبیق‌پذیری دانش سنتی و جدید کارکنان کمبود دانش فنی پایه موردنیاز وابستگی فرآیندهای تولید به مهارت اپراتور	مهارت و تخصص نیروی انسانی	چالش‌های منابع انسانی و مهارتی

مضمون پایه	مضمون سازمان‌دهنده	مضمون فراگیر
تهدید امنیت شغلی اپراتورها در اثر دیجیتال‌سازی نگرانی کارکنان از جایگزینی توسط فناوری عدم توازن بین تعاملات ربات-انسان	سلامت و انگیزه شغلی	
ضعف در هماهنگی قانون و مقررات با اقتصاد چرخشی هوشمند ضعف در ضمانت اجرایی و عدم حمایت قانونی نبود مشوق‌های مالیاتی مناسب جهت پیاده‌سازی خلاءهای نظارتی مناسب برای اجرای فرایندهای سبز	قوانین و مقررات حمایتی	بستر قانونی، سیاستی و بین‌المللی
ضعف در کلان‌روندهای مملکتی محدودیت‌های سیاسی و امنیتی محدودیت در تعاملات فناورانه بین‌المللی محدودیت دسترسی به دانش و منابع فنی بین‌المللی	سیاست‌های کلان و محدودیت‌های خارجی	
عدم شکل‌گیری بازار فولاد سبز ضعف در تجاری‌سازی فناوری‌های هوشمند ضعف در تأمین مواد اولیه پایدار هزینه‌های غیررسمی بخش لجستیک فرهنگ مصرف‌گرایی نگرش منفی نسبت به کیفیت محصولات بازیافتی پایین بودن آگاهی عمومی	بازار و زنجیره تأمین	موانع زیست‌محیطی و بازار
مدیریت ناقص پسماند مشکل انباشت سرباره‌های سنگین بخش فولاد افزایش موقت پسماند در دوره‌ی گذار به فرآیندهای بهینه نبود سیستم یکپارچه برای مدیریت قراضه‌ها	مدیریت پسماند و آلودگی	

به‌منظور تبیین روابط میان مضامین اصلی، شبکه مضامین مربوط به چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد در شکل ۱ ترسیم شده است که ساختار مفهومی این بخش از یافته‌ها را به‌صورت یکپارچه نمایش می‌دهد



شکل ۱: شبکه مضامین چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد

در فاز دوم تحقیق و در گام نخست طراحی نقشه شناختی فازی چالش‌ها، یک ماتریس اولیه موفقیت تشکیل می‌شود. در این مرحله، بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از پرسشنامه‌های تکمیل‌شده توسط n نفر از خبرگان و ارزیابی m مضمون سازمان‌دهنده، ماتریسی با ابعاد n*m ایجاد می‌گردد (رابطه ۱). هر سطر این ماتریس نشان‌دهنده نظر یک خبره و هر ستون بیانگر یکی از مضمون‌های سازمان‌دهنده شناسایی‌شده در حوزه چالش‌هاست و این ماتریس بیانگر دیدگاه و امتیازهای خبرگان نسبت به وضعیت

هر یک از مضمون‌های اصلی در مقیاس ۱ تا ۱۰ است (جدول ۴)؛ این ماتریس پایه‌ای برای تحلیل روابط علی میان چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد و ایجاد نقشه شناختی فازی در مراحل بعدی پژوهش فراهم می‌سازد.

جدول ۴: ماتریس اولیه چالش‌ها

خبره / چالش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
نگرش ورویکرد مدیریتی محدود	۱۰	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۸	۹	۱۰
فرهنگ سازمانی‌وتعاملات درونی	۹	۸	۹	۱۰	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹
مقاومت در برابر تغییر و نوآوری	۱۰	۹	۱۰	۱۰	۹	۹	۱۰	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹
توجیه‌پذیری و بازگشت سرمایه	۸	۸	۹	۹	۷	۸	۹	۹	۸	۸	۸	۹	۸	۸
هزینه‌ها و تأمین منابع مالی	۱۰	۹	۹	۹	۹	۹	۱۰	۹	۹	۱۰	۹	۹	۹	۹
زیرساخت‌های‌فنی و تکنولوژیک	۷	۸	۸	۶	۷	۸	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
شکاف دانشگاه و صنعت	۹	۹	۸	۹	۹	۹	۹	۸	۸	۹	۹	۹	۹	۹
مهارت و تخصص نیروی انسانی	۹	۸	۹	۸	۹	۹	۸	۹	۹	۹	۹	۹	۱۰	۱۰
سلامت و انگیزه شغلی	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
قوانین و مقررات حمایتی	۱۰	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
سیاست‌های‌کلان‌ومحدودیت‌های	۹	۱۰	۹	۹	۱۰	۹	۹	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
بازار و زنجیره تأمین	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
مدیریت پسماند و آلودگی	۱۰	۹	۸	۹	۱۰	۸	۸	۹	۸	۸	۸	۸	۸	۹

بعد از محاسبه ماتریس فوق، باید ماتریس فازی شده را ایجاد کرد. بر اساس فرمول‌های موجود در قسمت روش‌شناسی تحقیق، ماتریس نهایی موفقیت ایجاد و در **Error! Reference source not found.** آورده شد. در این ماتریس نمرات در فاصله ۱- تا ۱+ قرار دارند. نمراتی که داخل جدول هستند بیانگر میزان تأثیر هر عامل کلیدی موفقیت بر عامل کلیدی موفقیت دیگر است. اگر قدرمطلق عدد به ۱ نزدیک باشد شدت اثرگذاری بیشتر است. اگر عدد مورد بررسی مثبت باشد آن دو متغیر اثر مستقیم و اگر منفی باشد اثر معکوس دارند.

جدول ۵: ماتریس نهایی قدرت روابط

	(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)	(۹)	(۱۰)	(۱۱)	(۱۲)	(۱۳)
نگرش ورویکرد مدیریتی محدود	۰.۰۰	۰.۹۸۸	۱.۰۰۰	۰.۹۱۷	۱.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۹۶۴	۰.۹۶۴	۱.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۹۶۴
فرهنگ سازمانی‌وتعاملات درونی	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۹۸۸	۰.۹۱۷	۰.۹۸۸	۰.۰۰	۰.۹۶۴	۰.۹۶۴	۰.۹۸۸	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۹۵۲
مقاومت در برابر تغییر و نوآوری	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۰
توجیه‌پذیری و بازگشت سرمایه	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۰
هزینه‌ها و تأمین منابع مالی	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۰
زیرساخت‌های‌فنی و تکنولوژیک	۰.۰۰	۰.۸۲۱	۰.۰۰۰	۰.۸۵۷	۰.۷۸۶	۰.۰۰	۰.۸۲۱	۰.۸۲۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۸۵۷
شکاف دانشگاه و صنعت	۰.۰۰	۰.۹۶۴	۰.۹۶۴	۰.۹۱۷	۰.۹۶۴	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۹۶۴	۰.۹۶۴	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۹۵۲
مهارت و تخصص نیروی انسانی	۰.۰۰	۰.۹۶۴	۰.۹۶۴	۰.۹۱۷	۰.۹۶۴	۰.۰۰	۰.۹۶۴	۰.۰۰۰	۰.۹۶۴	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۹۵۲

	(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)	(۹)	(۱۰)	(۱۱)	(۱۲)	(۱۳)
سلامت و انگیزه شغلی	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۰
قوانین و مقررات حمایتی	۰.۰۰	۰.۹۸۸	۱.۰۰۰	۰.۹۱۷	۱.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۹۶۴	۰.۹۶۴	۱.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۹۶۴
سیاست‌های‌کلان‌ومحدودیت‌های	۰.۰۰	۰.۹۸۸	۱.۰۰۰	۰.۹۱۷	۱.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۹۶۴	۰.۹۶۴	۱.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۹۶۴
بازار و زنجیره تأمین	۰.۰۰	۰.۹۸۸	۱.۰۰۰	۰.۹۱۷	۱.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۹۶۴	۰.۹۶۴	۱.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۹۶۴
مدیریت پسماند و آلودگی	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰۰

جدول ۶ اطلاعات مدل نقشه شناختی فازی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد را نمایش می‌دهد.

جدول ۶: اطلاعات مدل نقشه شناختی فازی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد

حالت و معیارهای ترجیحی						
نوع	**مرکزیت**	**تأثیرگذاری**	**تأثیرپذیری**	**نام اجزاء**	**اجزاء**	**مجموع اجزاء**
اثرگذار	۷.۷۹	۷.۷۹	۰	**نگرش ورویکرد مدیریتی محدود**	C۱	۱۳
معمولی	۱۳.۴۶	۶.۷۶	۶.۷۰	**فرهنگ سازمانی‌وتعاملات درونی**	C۲	مجموع اتصال
اثرپذیر	۶.۹۱	۰	۶.۹۱	**مقاومت در برابر تغییر و نوآوری**	C۳	۵۹
اثرپذیر	۷.۲۷	۰	۷.۲۷	**توجیه‌پذیری و بازگشت سرمایه**	C۴	تراکم
اثرپذیر	۷.۷۰	۰	۷.۷۰	**هزینه‌ها و تأمین منابع مالی**	C۵	۰.۳۷
اثرگذار	۴.۹۶	۴.۹۶	۰	**زیرساخت‌های‌فنی و تکنولوژیک**	C۶	اتصال در هر جزء
معمولی	۱۳.۲۹	۶.۶۸	۶.۶۰	**شکاف دانشگاه و صنعت**	C۷	۴.۵۳
معمولی	۱۳.۲۹	۶.۶۸	۶.۶۰	**مهارت و تخصص نیروی انسانی**	C۸	تعداد جزء مستقل
اثرپذیر	۶.۹۱	۰	۶.۹۱	**سلامت و انگیزه شغلی**	C۹	۵
اثرگذار	۷.۷۹	۷.۷۹	۰	**قوانین و مقررات حمایتی**	C۱۰	تعداد جزء وابسته
اثرگذار	۷.۷۹	۷.۷۹	۰	**سیاست‌های‌کلان‌ومحدودیت‌ها**	C۱۱	۵
اثرگذار	۷.۷۹	۷.۷۹	۰	**بازار و زنجیره تأمین**	C۱۲	تعداد جزء معمولی
اثرپذیر	۷.۵۶	۰	۷.۵۶	**مدیریت پسماند و آلودگی**	C۱۳	۳
						امتیاز پیچیدگی
						۱

نتایج نقشه شناختی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در صنعت فولاد نشان می‌دهد که اجزاء شناسایی‌شده در سه دسته «اثرگذار»، «اثرپذیر» و «معمولی» قرار گرفته‌اند و هرکدام نقش متفاوتی در پویایی سیستم دارند. شاخص‌های کلان شبکه شامل ۱۳ جزء، ۵۹ اتصال و تراکم ۰.۳۷ بیانگر وجود شبکه‌ای نسبتاً متراکم و با تعاملات قابل‌توجه میان عوامل است. همچنین میانگین اتصال ۴.۵۳ نشان می‌دهد هر عامل به‌طور متوسط با بیش از چهار عامل دیگر در ارتباط است که بیانگر پیچیدگی ساختاری چالش‌ها است.

در میان اجزاء اثرگذار، «نگرش و رویکرد مدیریتی محدود»، «قوانین و مقررات حمایتی»، «سیاست‌های کلان و محدودیت‌های خارجی» و «بازار و زنجیره تأمین» «زیرساخت‌های فنی و تکنولوژیک» تأثیرگذاری ارزیابی شدند. این عوامل دارای تأثیرپذیری صفر هستند؛ بنابراین نقش

محرک‌های اصلی و ریشه‌ای سیستم را ایفا می‌کنند. به‌عبارت دیگر، ضعف در در هریک از این عوامل می‌توانند زنجیره‌ای از مشکلات دیگر را در مسیر استقرار اقتصاد چرخشی ایجاد کنند.

عوامل معمولی شامل «فرهنگ سازمانی و تعاملات درونی»، «شکاف دانشگاه و صنعت» و «مهارت و تخصص نیروی انسانی» هستند که هم‌زمان هم بر سایر عوامل اثر می‌گذارند و هم از آن‌ها تأثیر می‌پذیرند. این دسته از عوامل نقش واسطه‌ای و تعادلی در سیستم دارند. برای مثال، ضعف در فرهنگ سازمانی می‌تواند مقاومت در برابر نوآوری را افزایش دهد و درعین‌حال خود نیز تحت تأثیر سیاست‌های مدیریتی و شرایط محیطی قرار گیرد. همچنین شکاف میان دانشگاه و صنعت و کمبود مهارت‌های تخصصی، مانعی جدی در انتقال دانش و توسعه فناوری‌های چرخشی محسوب می‌شود.

در بخش عوامل اثرپذیر، «مقاومت در برابر تغییر و نوآوری»، «توجیه‌پذیری و بازگشت سرمایه»، «هزینه‌ها و تأمین منابع مالی»، «سلامت و انگیزه شغلی» و «مدیریت پسماند و آلودگی» قرار دارند. این عوامل بیش از آنکه نقش محرک داشته باشند، پیامد و نتیجه عملکرد سایر عوامل هستند. به‌عنوان نمونه، نبود قوانین حمایتی یا ضعف زیرساخت‌ها می‌تواند هزینه‌های اجرا را افزایش داده و توجیه اقتصادی پروژه‌های اقتصاد چرخشی را کاهش دهد. همچنین مقاومت کارکنان در برابر تغییر، می‌تواند ناشی از ضعف فرهنگ سازمانی، نبود آموزش تخصصی و نگرش محدود مدیریتی باشد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

نظام اقتصادی جهانی با بحران‌های به‌هم‌پیوسته‌ای مواجه است که الگوهای توسعه خطی را ناکارآمد کرده و ضرورت حرکت به سوی توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی را افزایش می‌دهد. در این میان، صنعت فولاد به دلیل مصرف بالای انرژی و سهم قابل‌توجه در انتشار کربن، نقشی کلیدی در این گذار دارد. یافته‌های حاصل از تحلیل مضمون داده‌های کیفی نشان می‌دهد که استقرار اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد با مجموعه‌ای از چالش‌های چندبعدی و متفاوتی مواجه است. در این پژوهش، با تحلیل داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها، در مجموع ۵۸ مضمون پایه، ۱۳ مضمون سازمان دهنده و ۶ مضمون فراگیر دسته‌بندی شد.

در سطح نخست، نگرش و رویکرد مدیریتی محدود یکی از بنیادی‌ترین موانع محسوب می‌شود. در بسیاری از واحدهای صنعتی، همچنان منطق غالب بر پایه مدل خطی تولید–مصرف–دفع و تمرکز بر سود کوتاه‌مدت است. در چنین چارچوبی، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته ردیابی مواد، بازیافت یا تغییر مدل کسب‌وکار به سمت خدمت‌محوری، پرهزینه و پرریسک تلقی می‌شود. این ذهنیت مانع شکل‌گیری تحول ساختاری شده و سایر چالش‌ها را نیز تشدید می‌کند، زیرا تصمیم‌گیری‌های راهبردی را در سطحی محدود نگه می‌دارد.

در ادامه، فرهنگ سازمانی و نحوه تعاملات داخلی نقش مهمی در ناکارآمدی این گذار دارد. بسیاری از سازمان‌های بزرگ صنعتی ساختاری سلسله‌مراتبی و بخش‌بندی‌شده دارند که در آن شفافیت اطلاعات

و همکاری میان‌بخشی محدود است. این در حالی است که اقتصاد چرخشی هوشمند نیازمند همکاری فرابخشی، اشتراک‌گذاری داده و هماهنگی کامل بین واحدهای تولید، مالی، فروش و محیط‌زیست است. نبود فرهنگ مشترک مبتنی بر چرخش منابع باعث می‌شود جریان کار برای بهینه‌سازی چرخه مواد ناقص و ناهماهنگ باقی بماند.

از سوی دیگر، مقاومت در برابر تغییر و نوآوری یکی از موانع رفتاری مهم است. این مقاومت معمولاً ناشی از ترس از ناشناخته‌ها، کمبود دانش یا نگرانی از تغییر جایگاه شغلی است. کارکنان و حتی مدیران میانی ممکن است تحول دیجیتال و چرخشی را تهدیدی برای امنیت شغلی یا مهارت‌های فعلی خود بدانند. این وضعیت سرعت یادگیری سازمانی را کاهش داده و هزینه‌های اجرای تغییر را افزایش می‌دهد.

یکی دیگر از چالش‌های اساسی، مسئله توجیه‌پذیری اقتصادی و بازگشت سرمایه است. در شرایط بی‌ثبات اقتصادی، نوسان قیمت فولاد، نرخ ارز و هزینه‌های مالی بالا، تحلیل اقتصادی بلندمدت را دشوار می‌کند. بسیاری از مزایای اقتصاد چرخشی مانند افزایش تاب‌آوری یا کاهش ریسک‌های آینده، ماهیت غیرمستقیم دارند و به سختی در مدل‌های مالی کوتاه‌مدت قابل اندازه‌گیری هستند. در نتیجه، مدیران تحت فشار سودآوری فوری، تمایل کمتری به سرمایه‌گذاری در این حوزه دارند.

در کنار این مسئله، محدودیت‌های مالی و هزینه‌های سنگین اجرا قرار دارد. پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند نیازمند سرمایه‌گذاری در فناوری‌های دیجیتال، بازطراحی فرآیندها و آموزش نیروی انسانی است. اما صنعت فولاد با مشکلات نقدینگی، محدودیت‌های تحریمی و کمبود سرمایه در گردش مواجه است. علاوه بر این، دسترسی به منابع مالی خارجی نیز محدود بوده و نرخ بهره بالا، سرمایه‌گذاری بلندمدت را غیرجذاب می‌کند.

زیرساخت‌های فنی و تکنولوژیک نیز از دیگر موانع کلیدی هستند. این صنعت با کمبود زیرساخت‌های فیزیکی مانند سیستم‌های جمع‌آوری و بازیافت قراضه و فناوری‌های بازیافت انرژی مواجه است. همچنین زیرساخت‌های دیجیتال مانند شبکه‌های داده‌ای امن، پلتفرم‌های یکپارچه و سیستم‌های پردازش داده‌های کلان توسعه نیافته‌اند. این ضعف زیرساختی امکان ردیابی و بهینه‌سازی چرخه مواد را به شدت محدود می‌کند.

از منظر دانشی، شکاف میان دانشگاه و صنعت یکی دیگر از مشکلات ساختاری است. تحقیقات دانشگاهی اغلب نظری و غیرکاربردی هستند و با نیازهای واقعی صنعت فولاد هم‌خوانی ندارند. در مقابل، صنعت نیز از ظرفیت‌های علمی داخلی به‌درستی استفاده نمی‌کند. نبود سازوکارهای انتقال فناوری و پروژه‌های مشترک پایدار، باعث وابستگی به راه‌حل‌های خارجی و افزایش هزینه‌ها شده است.

در حوزه منابع انسانی، شکاف مهارتی یکی از جدی‌ترین موانع اجرایی محسوب می‌شود. اقتصاد چرخشی هوشمند نیازمند مهارت‌های جدیدی مانند تحلیل داده، مهندسی نرم‌افزار، نگهداری پیش‌بینانه و مدیریت زنجیره تأمین چرخشی است. سیستم آموزشی فعلی اما همچنان بر مهارت‌های سنتی متمرکز

است. این عدم تطابق باعث می‌شود حتی در صورت وجود فناوری، نیروی انسانی توان بهره‌برداری مؤثر از آن را نداشته باشد.

در کنار آن، وضعیت سلامت شغلی و انگیزه کارکنان نیز اهمیت دارد. فشارهای اقتصادی، شرایط کاری سخت و نبود نظام‌های انگیزشی مناسب، انگیزه نیروی انسانی را کاهش می‌دهد. کارکنانی که دغدغه معیشتی یا امنیت شغلی دارند، کمتر توان و تمایل ورود به فرآیندهای نوآورانه و یادگیری مهارت‌های جدید را خواهند داشت. بنابراین ایجاد محیط کاری ایمن و انگیزه‌بخش ضروری است.

در سطح نهادی، قوانین و مقررات نیز اغلب ناکارآمد یا بازدارنده هستند. چارچوب‌های قانونی موجود بر اساس اقتصاد خطی طراحی شده‌اند و مشوق کافی برای فعالیت‌های چرخشی ارائه نمی‌دهند. برای مثال، مالیات‌ها یا استانداردها بیشتر بر حجم تولید متمرکز هستند تا میزان پایداری یا شدت مصرف منابع. نبود مشوق‌های مالیاتی و سیاست‌های تنبیهی مؤثر، انگیزه تغییر را کاهش می‌دهد.

در سطح کلان، سیاست‌های اقتصادی و محدودیت‌های خارجی نیز نقش تعیین‌کننده دارند. تغییرات مداوم سیاست‌های ارزی، تجاری و انرژی، برنامه‌ریزی بلندمدت را دشوار می‌کند. علاوه بر آن، تحریم‌ها دسترسی به فناوری‌های نوین، تجهیزات پیشرفته و شبکه‌های علمی بین‌المللی را محدود کرده و صنعت را در وضعیت انزوا قرار می‌دهد.

بازار و زنجیره تأمین نیز با چالش‌های جدی مواجه است. بازار فولاد عمدتاً قیمت‌محور است و معیارهای پایداری نقش کمی در آن دارند. همچنین زنجیره تأمین قراضه ساختارمند نیست و از شبکه‌های غیررسمی تشکیل شده است. نبود استانداردهای مشخص و نوسانات شدید قیمت، برنامه‌ریزی پایدار را دشوار می‌کند.

در نهایت، مدیریت پسماند و آلودگی یکی از حلقه‌های ناقص اقتصاد چرخشی در این صنعت است. حجم بالای پسماندهای صنعتی مانند سرباره و غبارها بدون سیستم‌های بازیافت پیشرفته دفع می‌شوند. این امر علاوه بر آسیب زیست‌محیطی، موجب هدررفت منابع ارزشمند نیز می‌شود و نشان می‌دهد چرخه مواد در صنعت فولاد هنوز کامل نشده است.

با توجه به پیشینه تحقیق، چالش‌های گوناگونی در مسیر پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی شناسایی شده است. کیانی و عندلیب اردکانی (۱۴۰۱)، در صنعت شیشه‌سازی ۶ چالش اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی، مدیریتی، سازمانی، زیرساختی و فناوری، بازار و طراحی را شناسایی کردند. روزا و همکاران (Rosa, Sassanelli, and Terzi 2019)، در صنعت مبلمان به چالش‌های سازمانی، فرهنگی، فناورانه و زنجیره تأمین اشاره نمودند. زوچلا و همکاران (Zucchella and Urban 2020)، مقاومت فرهنگی، محدودیت منابع و عدم پذیرش مصرف‌کننده را مطرح کردند. بیلی‌توسکی (Bilitewski 2012)، چالش‌های زیست‌محیطی و فقدان نظام ارزیابی جهانی ریسک را مورد تأکید قرار داد. راجپوت و همکاران (Rajput and Singh 2019) به چالش‌های پیچیدگی طراحی و هزینه‌های بالا، کنتو و همکاران (Cantú, Aguiñaga, and Scheel 2021) به چالش‌های مالی، فناورانه و فرهنگی، سینگ و همکاران (Singh et al.

2021) به چالش‌های ساختاری و داده‌ای، پیلا و همکاران (Piila et al. 2022) به محدودیت منابع، دویودی و همکاران (Dwivedi et al. 2022) به ضعف شایستگی‌ها و سیاست‌های حمایتی، کومار و همکاران (Kumar et al. 2023) به ناکارآمدی زیرساختی و ضعف سیاستی و آگی‌یکوم و همکاران (Agyekum and Amudjie 2024) به هفت بعد چالش از جمله دانشی، مالی، فناورانه و مقرراتی اشاره کرده‌اند. به‌طور کلی، اغلب این مطالعات تعداد محدودی چالش را در صنایع خاص شناسایی کرده و تمرکز آن‌ها عمدتا بر ابعاد فنی، نهادی و فرهنگی بوده است. در مقایسه با مطالعات پیشین، پژوهش حاضر با شناسایی ۵۸ چالش در قالب ۱۳ مضمون سازمان‌دهنده و ۶ مضمون فراگیر در حوزه‌ی اقتصاد چرخشی هوشمند در صنعت فولاد، بررسی جامعی هم از نظر روش‌شناختی تحقیق و هم از نظر مورد مطالعه در این زمینه به‌شمار می‌آید.

نتایج حاصل از تحلیل نقشه‌شناختی فازی نشان می‌دهد که چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی در صنعت فولاد، ماهیتی سیستمی و به‌هم‌پیوسته دارند. بنابراین، تمرکز صرف بر رفع عوامل اثرپذیر نمی‌تواند به موفقیت پایدار منجر شود؛ بلکه سیاست‌گذاران و مدیران باید ابتدا عوامل ریشه‌ای و اثرگذار به‌ویژه «نگرش مدیریتی محدود»، «قوانین و مقررات حمایتی»، «سیاست‌گذاری‌های کلان و محدودیت‌های خارجی»، «بازار و زنجیره تأمین» و «زیرساخت‌های فنی و تکنولوژیکی» را اصلاح کنند تا زمینه برای بهبود سایر متغیرها و تحقق اقتصاد چرخشی فراهم شود. بنابراین مجموعه‌ای از پیشنهادات کاربردی برای رفع این چالش‌ها در سه سطح راهبردی، سازمانی و عملیاتی ارائه می‌شود که هدف آن‌ها تسهیل گذار به اقتصاد چرخشی هوشمند و کاهش موانع ساختاری موجود است.

در سطح راهبردی، با توجه به اینکه «نگرش و رویکرد مدیریتی محدود» یکی از اثرگذارترین عوامل شناسایی‌شده در مدل است، پیشنهاد می‌شود شرکت‌های فولادی برنامه‌های توسعه رهبری تحول‌آفرین، آموزش مدیریت پایدار و ارزیابی عملکرد مبتنی بر شاخص‌های زیست‌محیطی و چرخشی را در سطح مدیران ارشد و میانی اجرا کنند. همچنین، گنجاندن شاخص‌های اقتصاد چرخشی هوشمند در نظام ارزیابی مدیران می‌تواند زمینه تغییر نگرش از رویکرد کوتاه‌مدت به رویکرد ارزش‌آفرینی بلندمدت را فراهم سازد.

در کنار آن، «اصلاح قوانین و مقررات حمایتی و تدوین سیاست‌های تشویقی» برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک، بازیافت و تولید کم‌کربن ضروری است. ایجاد استانداردهای ملی برای مواد بازیافتی و تدوین نقشه راه ملی اقتصاد چرخشی در صنعت فولاد باید در اولویت سیاست‌گذاران قرار گیرد. همچنین، توسعه سازوکارهای تأمین مالی سبز یکی از مهم‌ترین اقداماتی است که می‌توان انجام داد. در این راستا، ایجاد صندوق‌های تخصصی تأمین مالی سبز، انتشار اوراق قرضه سبز، اعطای وام‌های کم‌بهره برای پروژه‌های بازیافت و دیجیتالی‌سازی و استفاده از مدل‌های مشارکت عمومی-خصوصی می‌تواند فرایند استقرار اقتصاد چرخشی هوشمند را تسریع کند. همچنین، سیاست‌های کلان و محدودیت‌های

خارجی باید از طریق توسعه همکاری‌های بین‌المللی، انتقال فناوری و جذب سرمایه خارجی مدیریت شوند.

در حوزه «بازار و زنجیره تأمین» نیز ایجاد زیرساخت‌های بازار سبز و تقویت زیرساخت‌های فنی و تکنولوژیک از طریق سرمایه‌گذاری در دیجیتالی‌سازی، هوشمندسازی فرآیندهای تولید و توسعه فناوری‌های بازیافت پیشرفته نیز از الزامات کلیدی است. در این راستا ایجاد پلتفرم‌های اشتراک داده و تدوین سازوکارهای شفاف معاملاتی بین اعضای زنجیره تأمین می‌تواند همکاری میان تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و بازیافت‌کنندگان را تقویت کند.

در نهایت با توجه به نقش محوری «زیرساخت‌های فناورانه»، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های اینترنت اشیاء صنعتی، هوش مصنوعی، کلان‌داده، سامانه‌های ردیابی مواد و پلتفرم‌های مدیریت چرخه عمر محصول باید در دستور کار شرکت‌های فولادی قرار گیرد. از منظر پژوهشی، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده به سمت شناسایی چگونگی کاهش چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی هوشمند و ارائه‌ی راه‌کارهای مؤثرتر و عملیاتیتر برای گذار به اقتصاد چرخشی هوشمند در صنایع فولاد و صنایع مشابه منجر شود.

منابع

شهرزاد حقیقی نژاد، ندا، میرقادری،سیدهادی، محمدی،علی و رونقی، محمدحسین. (۱۴۰۵). «شناسایی و اولویت‌بندی عناصر خوشه صنعتی چهار با استفاده از روش های دلفی خاکستری و بهترین- بدترین خاکستری». *بهبود مدیریت*، ۲۰(۱)، ۲۹-۵۸.

کیانی، مهرداد، عندلیب اردکانی، داود ۱۴۰۱، «ارائه الگوی چالش‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور در صنایع آلاینده:رویکرد فراترکیب و دیمتل-فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی»، *مدیریت بهره‌وری*، ۴ (۱۶)، ۱۸۴-۱۴۷.

محمدی، اکبر، مختارزاده، نیما، جعفرنژاد چقوشی، احمد، نیلفروشان،هادی و محمدی،مهدی . (۱۴۰۰). «تحلیل تاریخی زنجیره تولید فولاد کشور از منظر کارکردهای یکپارچه سازی فناوری های جدید». *بهبود مدیریت*، ۱۵(۴)، ۶۹-۱۰۴.

Agostini, Lara, and Anna Nosella. 2021. "Industry 4.0 and business models: a bibliometric literature review." *Business Process Management Journal* 27 (5):1633-1655.

Agyekum, Kofi, and Judith Amudjie. 2024. "Challenges to implementing circular economy: empirical evidence among built environment firms in Ghana." *International Journal of Construction Management* 24 (3):281-297.

Alcayaga, Andres, and Erik G Hansen. 2025. "Smart circular economy as a service business model: an activity system framework and research agenda." *R&D Management* 55 (2):508-530.

Bilitewski, Bernd. 2012. "The circular economy and its risks." *Waste management* 32 (1):1-2.

Bressanelli, Gianmarco, Federico Adrodegari, Daniela CA Pigosso, and Vinit Parida. 2022. "Towards the smart circular economy paradigm: A definition, conceptualization, and research agenda." *Sustainability* 14 (9):4960.

Cantú, Andrea, Eduardo Aguiñaga, and Carlos Scheel. 2021. "Learning from failure and success: The challenges for circular economy implementation in SMEs in an emerging economy." *Sustainability* 13 (3):1529.

Chhimwal, Madhukar, Saurabh Agrawal, and Girish Kumar. 2022. "Challenges in the implementation of circular economy in manufacturing industry." *Journal of Modelling in Management* 17 (4):1049-1077.

Corvellec, Hervé, Alison F Stowell, and Nils Johansson. 2022. "Critiques of the circular economy." *Journal of industrial ecology* 26 (2):421-432.

Dwivedi, Ashish, Md Abdul Moktadir, Charbel José Chiappetta Jabbour, and Daniel Estima de Carvalho. 2022. "Integrating the circular economy and industry 4.0 for sustainable development: implications for responsible footwear production in a big data-driven world." *Technological Forecasting and Social Change* 175:121335.

Enrique, Daisy Valle, Giuliano Almeida Marodin, Fernando Bigares Charrua Santos, and Alejandro G Frank. 2023. "Implementing industry 4.0 for flexibility, quality, and productivity improvement: technology

arrangements for different purposes." *International Journal of Production Research* 61 (20):7001.٧٠٢٦-

Felix, Gerardo, Gonzalo Nápoles, Rafael Falcon, Wojciech Froelich, Koen Vanhoof, and Rafael Bello. 2019. "A review on methods and software for fuzzy cognitive maps." *Artificial intelligence review* 52 (3):1707-1737.

Fragapane, Giuseppe, Dmitry Ivanov, Mirco Peron, Fabio Sgarbossa, and Jan Ola Strandhagen. 2022. "Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics." *Annals of operations research* 308 (1):125-143.

Gatto, Andrea, and Cosimo Magazzino. 2026. "The polycrisis needs a sustainability-and resilience-oriented paradigm shift through innovation." *Environmental Science & Policy* 180:104371.

Geissdoerfer, Martin, Wisdom Kanda, and Julian Kirchherr. 2026. "Conceptualizing circular ecosystems: an analysis of 45 definitions." *Business Strategy and the Environment* 35 (2):2368-2394.

Guerra-Rodríguez, Sonia, Paula Oulego, Encarnación Rodríguez, Devendra Narain Singh, and Jorge Rodríguez-Chueca. 2020. "Towards the implementation of circular economy in the wastewater sector: Challenges and opportunities." *Water* 12 (5):1431.

Guerra, Beatriz C, Sheida Shahi, Aida Mollaei, Nathalie Skaf, Olaf Weber, Fernanda Leite, and Carl Haas. 2021. "Circular economy applications in the construction industry: A global scan of trends and opportunities." *Journal of cleaner production* 324:129125.

Hernandez, Juan Camilo Rua, Eliana Villa-Enciso, Sebastián Cardona-Acevedo, Jackeline Valencia, and Sofia Velasquez Salas. 2025. "Smart innovation for a circular economy: a systematic review of emerging trends and the future of AI in the sustainable economy." *Sustainability* 17 (13):5793.

Humphries, Jacqueline, Alan Ryan, and Pepijn Van de Ven. 2023. "Reducing Error in Manufacturing in Industry 4.0 :A Systematic Literature Review." International Conference on Quality Innovation and Sustainability.

Karatzinis, Georgios D, and Yiannis S Boutalis. 2025. "A review study of fuzzy cognitive maps in engineering: applications, insights, and future directions ".*Eng* 6 (2):37.

Khaw-ngern, Kannikar, Lampong Klomkul, Prateep Peuchthonglang, and Chainarong Khaw-ngern. 2021. "A digital circular economy for smart cities." *Psychology and education* 58 (1):1432-1439.

Kosko, Bart. 1986. "Fuzzy cognitive maps." *International journal of man-machine studies* 24 (1):65-75.

Kühl, Carl, Benny Tjahjono, Michael Bourlakis, and Emel Aktas. 2018. "Implementation of Circular Economy principles in PSS operations." *Procedia CIRP* 73:124-129.

Kumar, Mukesh, Rakesh D Raut, Sandeep Jagtap, and Vikas Kumar Choubey. 2023. "Circular economy adoption challenges in the food supply chain for sustainable development." *Business Strategy and the Environment* 32 (4):1334-1356.

Lawrence, Michael, Thomas Homer-Dixon, Scott Janzwood, Johan Rockström, Ortwin Renn, and Jonathan F Donges. 2024. "Global polycrisis: the causal mechanisms of crisis entanglement." *Global Sustainability* 7:e6.

Nadeem, Simon Peter, Jose Arturo Garza-Reyes, and Denise Glanville. 2018. "The challenges of the circular economy." In *Contemporary issues in accounting: The current developments in accounting beyond the numbers*, 37-60. Springer.

Oztemel, Ercan, and Samet Gursev. 2020. "Literature review of Industry 4.0 and related technologies." *Journal of intelligent manufacturing* 31 (1):127-182.

Piila, Noora, Milla Sarja, Tiina Onkila, and Marileena Mäkelä. 2022. "Organisational drivers and challenges in circular economy implementation: An issue life cycle approach." *Organization & Environment* 35 (4):523-550.

Purvis, Ben, Yong Mao, and Darren Robinson. 2019. "Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins." *Sustainability science* 14 (3):681-695.

Rajput, Shubhangini, and Surya Prakash Singh. 2019. "Connecting circular economy and industry 4.0." *International journal of information management* 49:98-113.

Rakowski, Judith J, Linn N Schaan, Roel van Klink, Iryna Herzon, Adina Arth, Gregor Hagedorn, Julian Rode, Felix Creutzig, and Guy Pe'er. 2025. "Characterizing the global polycrisis: A systematic review of recent literature." *Annual Review of Environment and Resources* 50 (1):159-183.

Rashid, Kh Harun Or, Ridwan Al Aziz, Chitra Lekha Karmaker, ABM Mainul Bari, and Asif Raihan. 2025. "Evaluating the challenges to circular economy implementation in the apparel accessories industry: Implications for sustainable development." *Green Technologies and Sustainability* 3 (2):100140.

Rosa, Paolo, Claudio Sassanelli, and Sergio Terzi. 2019. "Circular business models versus circular benefits: an assessment in the waste from electrical

and electronic equipments sector." *Journal of cleaner production* 231:940-952.

Rosa, Paolo, Claudio Sassanelli, Andrea Urbinati, Davide Chiaroni, and Sergio Terzi. 2020. "Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review." *International Journal of Production Research* 58 (6):1662-1687.

Rotilio, Marianna. 2021. "Product innovation between circular economy and Industry 4.0." *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*:192-200.

Ruggerio, Carlos Alberto. 2021. "Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions." *Science of the total environment* 786:147481.

Saccani, Nicola, Gianmarco Bressanelli, and Filippo Visintin. 2023. "Circular supply chain orchestration to overcome Circular Economy challenges: An empirical investigation in the textile and fashion industries." *Sustainable Production and Consumption* 35:469-482.

Singh, Shweta, Callie Babbitt, Gabrielle Gaustad, Matthew J Eckelman, Jeremy Gregory ,Erinn Ryen, Nehika Mathur, Miriam C Stevens, Abhijeet Parvatker, and Raj Buch. 2021. "Thematic exploration of sectoral and cross-cutting challenges to circular economy implementation." *Clean Technologies and Environmental Policy* 23 (3):915–936.

Tamasiga ,Phemelo, Taghi Miri, Helen Onyeaka, and Abarasi Hart. 2022. "Food waste and circular economy: Challenges and opportunities." *Sustainability* 14 (16):9896.

Torgautov, Beibut, Asset Zhanabayev, Aidana Tleuken, Ali Turkyilmaz, Mohammad Mustafa, and Ferhat Karaca. 2021. "Circular economy: Challenges and opportunities in the construction sector of Kazakhstan." *Buildings* 11 (11):501.

Turskis, Zenonas, and Violeta Šniokienė. 2024. "IoT-driven transformation of circular economy efficiency: an overview." *Mathematical and Computational Applications* 29 (4):49.

Velenturf, Anne PM, and Phil Purnell. 2021. "Principles for a sustainable circular economy." *Sustainable production and consumption* 27:1437-1457.

Walzberg, Julien, and Alberta Carpenter. 2024. "Circular economy contributions to decarbonizing the US Steel Sector." *Technology Innovation for the circular economy: recycling, remanufacturing, design, systems analysis and logistics*:725-738.

Zhang, Bin, Yang Lu, Hao Li, Niu Niu, Qingyao Xin, Changqing Xu, and Zhaohua Wang. 2025. "Iron ore substitution and carbon emission reduction by scrap steel recycling under carbon neutrality goal." *Journal of Industrial Ecology* 29 (1):217-232.

Zucchella, Antonella, and Sabine Urban. 2020. "The circular enterprise." *Symphonya. Emerging Issues in Management* 1 (1):62-69.