Identification and ranking of barriers to implementing the 4th generation industry based on supply chain sustainability and circular economy with the ISM-DEMATEL hybrid method

Seyede khadije Hosseini*[1], Mansour Momeni [2], Ali Haji Gholam Saryazdi [3]

1. Department of Industrial Management, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Professor, Department of Industrial Management, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Management, and Research Director of System Dynamics, Imam Javad Institute of Higher Education, Tehran, Iran.

*. Corresponding Author: khadijehosseini@ut.ac.ir

Received: 22 February 2025 Revised: 7 September 2025 Accepted: 4 October 2025

Abstract

In the era of Industry 4, organizations aim to increase sustainability in global markets at the end of the product life cycle. However, due to the most important barriers, the adoption of digital and sustainable solutions is challenging. This study is mixed research in terms of applied purpose and data collection that, by analyzing the literature and expert opinions, examined the barriers to supply chain sustainability using a qualitative meta-synthesis method, which determined twenty-three indicators and then selected the final fourteen variables using Delphi analysis and Kendall coefficient in SPSS. Then, using the DEMATEL-ISM hybrid method in MATLAB and EXCEL, the levels of importance of the barriers and their classification into the group of causal and effect variables were carried out. The lack of specialized staff and insufficient training in the field of sustainability concepts are the most influential factors and are among the causal variables. The lack of circular design and the lack of awareness of consumers and manufacturers about some circular products are among the most influential factors. Also, technical limitations, lack of resources, high cost of system integration, high initial investment cost, lack of integration and misuse of data, problems and concerns related to cybersecurity and limited environmental knowledge, lack of innovation and cooperation with environmental institutions are highlighted in the ISM model.

Keywords: Circular economy, Sustainability, ISM-DEMATEL hybrid method, Fourth generation industry, MICMAC

Citation: Hosseini, S. K., Momeni, M., Haji Gholam Saryazdi, A. (2025). Identification and ranking of barriers to implementing the 4th generation industry based on supply chain sustainability and circular economy with the ISM-DEMATEL hybrid method, *Journal of Technology Development Management*, 12(4), 85-120. https://doi.org/10.22104/jtdm.2025.7298.3380

شناسایی و رتبه بندی موانع پیاده‌سازی صنعت نسل ۴ بر مبنای پایداری زنجیره تامین و اقتصاد دایره‌ای با روش ترکیبیISM-DEMATEL

سیده خدیجه حسینی[*۱]؛ منصور مومنی[۲]؛ علی حاجی غلام سریزدی[۳]

۱. گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه مدیریت و مدیر پژوهشی پویایی‌شناسی سیستم‌ها، موسسه آموزش عالی امام جواد

*. نویسنده مسئول: khadijehosseini@ut.ac.ir

دریافت: ۰۵ آبان ۱۴۰۳ بازنگری: ۱۱ شهریور ۱۴۰۴ پذیرش: ۱۲ مهر ۱۴۰۴

چکیده

در عصر صنعت ۴ هدف سازمان‌ها افزایش پایداری در بازارهای جهانی در پایان چرخه عمر محصولات است. با این حال، پذیرش راه‌حل‌های دیجیتال و پایدار چالش برانگیز است. این مطالعه از نظر هدف کاربردی و برحسب گردآوری داده‌ها پژوهشی آمیخته است که با تجزیه و تحلیل ادبیات و نظرات کارشناسان، موانع موجود در پایداری زنجیره تامین را با روش کیفی فراترکیب بررسی، که بیست‌وسه شاخص تعیین و سپس چهارده متغیر نهایی با استفاده از تحلیل دلفی و ضریب کندال در SPSS انتخاب شدند. سپس با روش ترکیبی ISM-DEMATEL در MATLAB و EXCEL سطوح اهمیت موانع و سطح‌بندی آن‌ها در گروه متغیرهای علّی و معلول صورت گرفت. فقدان کارکنان متخصص و آموزش ناکافی در زمینه مفاهیم پایداری، تاثیرگذارترین عامل و جز متغیرهای علّی می‌باشد. فقدان طراحی دایره‌ای و عدم آگاهی مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان از برخی محصولات دایره‌ای جز تاثیرپذیرترین عوامل می‌باشند. همچنین محدودیت‌های فنی، کمبود منابع، هزینه بالای یکپارچه‌سازی سیستم، هزینه بالا سرمایه‌گذاری اولیه، عدم یکپارچگی و استفاده نادرست از داده‌ها، مشکلات و نگرانی‌های مربوط به امنیت سایبری و دانش محیطی محدود، نبود نوآوری و همکاری با مؤسسات زیست محیطی در مدل ISM برجسته شده است. تجزیه و تحلیل MICMAC نیز ثابت می‌کند که همه موانع جزء موانع تاثیرگذار کلیدی، ناپایدار و پیوندی هستند.

کلمات کلیدی: اقتصاد دایره‌ای، پایداری، روش ترکیبی ISM-DEMATEL، صنعت نسل چهارم، MICMAC

مقدمه

امروزه منابع طبیعی دو برابر میزان تولید مصرف می‌شوند و تا سال ۲۰۵۰ این میزان می‌تواند تا سه برابر افزایش یابد(ماک آرتور[۱]، ۲۰۱۳، آنوفریو و همکاران، ۲۰۲۵). علاوه بر افزایش مصرف در سطح جهانی، چندین پدیده از جمله همه‌گیری ناشی از ویروس کرونا[۲]، تغییرات آب و هوایی، گرسنگی و ضایعات فراوان غذا، اقتصاد بی‌ثبات و بلایای طبیعی نیاز فوری به بازنگری فرآیندها و جایگزین‌های جدیدی مانند صنعت نسل[۳]۴.۰ (صنعت ۴.۰)، هوش مصنوعی و اقتصاد دایره‌ای[۴] CE (اقتصاد چرخشی- مدور) را بستری ایده‌آل برای تقویت تولید پایدار (ویلز و کلمکریان[۵]، ۲۰۲۲ ، جین و همکاران، ۲۰۲۵)، تبدیل محصولات در پایان چرخه عمرشان به محصولات جدید با کاربردهای متفاوت(مستوس و نیزامیس[۶]، ۲۰۲۱)، کاهش تولید زباله و ضایعات(لوپز [۷] و همکاران، ۲۰۲۱)، کاهش زمان پاسخگویی به مشتری(خانزده [۸] و همکاران، ۲۰۲۳)، مدیریت مصرف انرژی، فروش مواد قابل بازیافت، مدیریت مصرف آب و خرید مواد سبز (قربان‌پور و همکاران، ۱۴۰۱)، روش‌های جدید تولید(سیلوا و سهنم[۹]، ۲۰۲۲) و ایجاد شغل‌های جدید مانند فروش زباله به صورت آنلاین با اپلیکیشن‌های مختلف (بونز و فرند[۱۰]، ۲۰۱۳) تبدیل می‌کند. تا به امروز، توسعه پایدار که در سیاست‌های توسعه بسیاری از کشورها و مناطق گنجانده شده است به یک راه مهم برای حل معضل جهانی کمبود منابع و محیط‌زیست تبدیل شده است. اجرای استراتژی‌های توسعه پایدار با استفاده از مفاهیمی نوین مانند اقتصاد دایره‌ای تسریع می‌گردد (سوزانی [۱۱]و همکاران، ۲۰۲۰). اقتصاد دایره‌ای یک زنجیره تامین حلقه بسته با تمرکز بر استفاده مجدد از محصولات دورریختنی با هدف افزایش کارایی منابع و محافظت از محیط‌زیست و اجتماع به نفع نسل‌های آینده در سطوح مختلف زنجیره تامین بوده (کسور[۱۲] و همکاران، ۲۰۲۲؛ راجپوت و سینگ[۱۳]، ۲۰۱۹) و مفهوم استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و حذف مواد شیمیایی سمی را با تمرکز بر طراحی مواد، محصولات و سیستم‌ها به صورت هوشمند انجام می‌دهد. هدف اقتصاد دایره‌ای غلبه بر مدل

1. MacArthur
2. COVID-19
3. Industry4.0
4. Circular economy
5. Viles, Kalemkerian
6. Mastos, Nizamis
7. Lopes
8. Khanzode
9 . Silva and Sehnem
10. Boons and Freund
11. Suzanne
12. Cesur
13. Rajput and Singh

اقتصاد خطی(یعنی یک مدل اقتصادی سنتی بدون بازیافت) (رزا [۱]و همکاران، ۲۰۲۰)و حداقل کردن مصرف و اتلاف منابع و انرژی(آربیناتی[۲] و همکاران، ۲۰۱۷) و مصرف پایدار و مسئولانه است(بدوسی[۳] و همکاران، ۲۰۲۴). اقتصاد دایره‌ای پایدار (SCE)[۴] برای تقویت رابطه بین اقتصاد دایره‌ای و پایداری (نلز[۵] و همکاران، ۲۰۱۶؛ چو و یحیی[۶]، ۲۰۲۴) اخیراً در بین دانشمندان، نظریه پردازان، دانشگاهیان و متخصصان توجه بیشتری یافته است(نیکولاو[۷] و همکاران، ۲۰۲۱) که علاوه بر کاهش ۴ درصدی تولید ضایعات مانند ضایعات فلزی(مستور[۸] و همکاران، ۲۰۲۰) ابزاری است جهت همسویی بین سه بُعد پایداری(اقتصادی، محیطزیستی و اجتماعی)(مورنو و همکاران[۹]، ۲۰۲۴). صنعت نسل۴ و اقتصاد دایره‌ای بدون شک دو موضوع مرتبط و مورد بحث در دهه‌های گذشته و آینده هستند(بایی[۱۰] و همکاران، ۲۰۲۰). اصطلاح اقتصاد دایره‌ای ۴.۰[۱۱] طراحی، تجزیه و تحلیل و مدیریت عملیات متمرکز بر اقتصاد دایره‌ای است که توسط فناوری‌های صنعت نسل۴ به منظور استفاده کارآمد از مواد اولیه تجدیدپذیر برای ارتقای پایداری صورت می‌گیرد(تسلاکیس[۱۲] و همکاران، ۲۰۲۱). شبیه‌سازی و اینترنت اشیا ساختار لجستیک معکوس را فعال کرده و رایانش ابری، سیستمی را برای انتخاب تامین‌کنندگان در زنجیره تامین سبز ایجاد می‌کند(داولیویرا نتو و دا کونسیسائو سیلو[۱۳]، ۲۰۲۲). با توجه به اوج انتشار دی‌اکسیدکربن (CO_2) از سال ۲۰۱۸ و افزایش دورکاری پرسنل خصوصا از زمان انتشار ویروس کرونا، تعداد انتشارات در مورد اقتصاد دایره‌ای و صنعت ۴.۰ و مدیریت زنجیره تامین پایدار رشد فزاینده‌ای داشته است(لو و همکاران، ۲۰۲۲). اما تاکید اکثر این مقالات برفلسفه و مزایای اقتصاد دایره‌ای و یا مسائل مربوط به صنعت نسل چهارم(کومار و همکاران، ۲۰۲۱) یا مشکلاتی خاص می‌باشد و اثری از تحلیل سیستماتیک و یا ارتباط این مفاهیم وجود ندارد. علاوه بر این ادبیات دانشگاهی، توجه محدودی به بررسی اصول اقتصاد دایره‌ای در زنجیره تامین پایدار به عنوان یک مفهوم چند بُعدی داشته است(نیکولائو و استفاناکیس[۱۴]،۲۰۲۲). بررسی پژوهش‌های پیشین یک شکاف تحقیقاتی اساسی

1. Rosa
2. Urbinati
3. Beducci
4. Sustainable Circular Economy
5. Nelles
6. Chu and Yahya
7. Nikolaou
8. Mastos
9. Moreno
10. Bai
11. Circular Economy 4.0
12 Tsolakis
13. de Oliveira Neto and da Conceição Silva
14. Nikolaou and Stefanakis

جهت تصویرسازی ارتباط متقابل صنعت ۴.۰ و اقتصاد دایره‌ای و پایداری را آشکار می‌کند(یدوا [1]و همکاران، ۲۰۲۰؛ بگ[2] و همکاران، ۲۰۲۱؛,لو و همکاران، ۲۰۲۲). در نتیجه این حوزه به‌عنوان یک حوزه تحقیقاتی ناشناخته باقی مانده(دل‌جودیس[3] و همکاران، ۲۰۲۰) و هنوز هم نیازمند پژوهش‌های بیشتری در مورد اثرات و موانع پایداری صنعت ۴.۰ (قباخلو[4] ، ۲۰۲۰) و بررسی مسائل مربوط به امکان‌سنجی و ادغام مفاهیم صنعت ۴.۰ با اقتصاد دایره‌ای است. به این ترتیب، این مطالعه برای پر کردن شکاف‌های پژوهشی و پاسخ به پرسش‌های ذیل طراحی شده است.

- چالش‌های مؤثر در ارتباط بین اقتصاد دایره‌ای و صنعت نسل ۴ در زنجیره تامین پایدار چیست؟ (روش دلفی)
- مدل‌سازی و تجزیه‌وتحلیل شاخص‌های مؤثر چگونه است؟ (روش ISM)
- چگونه می‌توان این چالش‌ها را اولویت‌بندی و طبقه‌بندی کرد؟ (روش DEMATEL)

این مقاله در پاسخ به این پرسش‌های پژوهشی به شرح زیر سازماندهی شده است. بخش ۲ مبانی نظری صنعت نسل ۴ و عملیات پایدار را بررسی و درک اقتصاد دایره‌ای را تسهیل، بخش ۳ روش استفاده شده و بخش ۴ یافته‌ها را در مورد چالش‌ها در اجرا برجسته می‌کند. بخش پنجم با پذیرش محدودیت‌ها و پیشنهاد راه‌هایی برای تحقیقات آینده به پایان می‌رسد.

پیشینه تحقیق

صنعت نسل ۴

مفهوم صنعت نسل۴ برای اولین بار در نمایشگاه هانوفر آلمان در سال ۲۰۱۱ مطرح که از طریق شبکه‌های ارتباطی و مدل‌های کسب‌وکار جدید مبتنی بر فناوری‌های نوظهور، راه‌حل بسیاری از مشکلات اجتماعی است(چاوهان و سینگ،۲۰۱۹[5]). گروه مشاوره بوستون فناوری‌ها صنعت نسل ۴ را شامل تجزیه و تحلیل کلان‌داده‌ها[6]، ربات‌ها[7]،

1. Yadav
2. Bag
3. Del Giudice
4. Ghobakhloo
5. Chauhan and Singh
6. Big Data Analytics
7. Robots

ساخت افزودنی[۱]، شبیه‌سازی[۲]، واقعیت افزوده و مجازی[۳]، یکپارچه‌سازی سیستم افقی/عمودی، اینترنت اشیا[۴]، فناوری‌های ابری[۵]، بلاک‌چین[۶] و امنیت سایبری می‌دانند(روبمان[۷]، ۲۰۱۵). از بعد زیست محیطی، صنعت ۴ با استفاده از بازیافت و انرژی‌های تجدیدپذیر، ضایعات تولید، میزان انتشار و تولید کربن، ریسک‌های عملیاتی و میزان مصرف منابع را با پشتیبانی استانداردها و مقررات مناسب کاهش و عملکرد مالی را از طریق تصمیم‌گیری هوشمند افزایش می‌دهد(سلیمان[۸] و همکاران، ۲۰۲۲). صنعت ۴.۰ با تغییر ساختار مدیریت زنجیره تامین از مواد خام تا پایان عمر محصول (لوترا[۹] و همکاران، ۲۰۲۰)، مدیریت زنجیره تامین دایره‌ای را به کمک مدل ReSOLVE امکان پذیر و با توسعه محصولات و مدیریت زنجیره تامین سبز، تولید پایدار محیطی را تقویت می‌کند(د سوزا جبور[۱۰]، ۲۰۱۸). تأثیر صنعت ۴.۰ بر اجزای مختلف پایداری در جدول ۱ ارائه شده است.

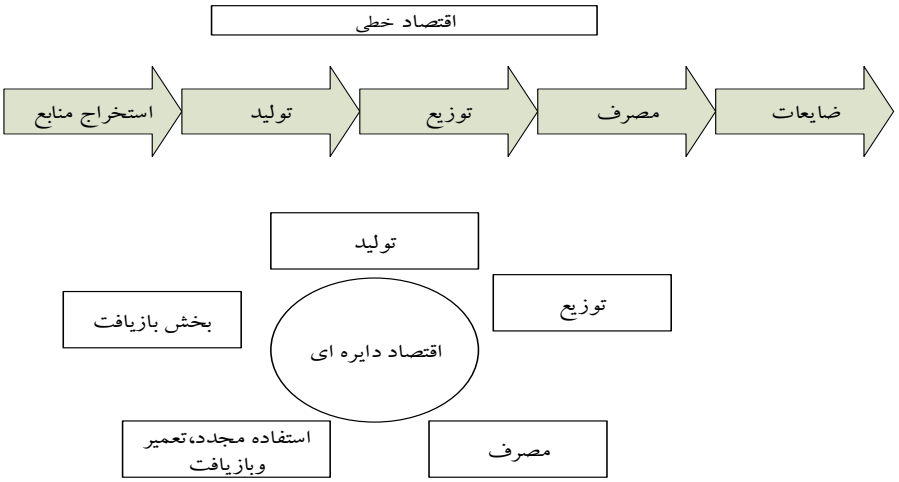
جدول ۱: تاثیر صنعت ۴ بر سه جز پایداری

نام بعد پایداری	تأثیر مهم از صنعت نسل ۴	منبع
اجتماعی	استخدام، همکاری بهتر بین ذی‌نفعان، کاهش تصادفات، بهبود شرایط زندگی برای جوامع وشرایط کاری، اتوماسیون فرایند و ایمنی، مدل‌های کسب‌وکار جدید.	(جاموال[۱۱] و همکاران، ۲۰۲۱ ؛ مولر و همکاران، ۲۰۱۸ ؛کمبل و همکاران، ۲۰۱۸)
اقتصادی	ایجاد ارزش پایدار، کارایی و سود، کاهش هزینه‌های عملیاتی و کاهش موجودی، تأثیر بر سهم بازار، گردش مالی.	(جاموال و همکاران، ۲۰۲۱)
زیست‌محیطی	کاهش ضایعات صنعتی، ترویج اقتصاد دایره‌ای، استفاده و تولید منابع تجدیدپذیر، کاهش استفاده از منابع تجدیدناپذیر و مصرف انرژی و کاهش گرمایش جهانی، کاهش مصرف منابع، کاهش مصرف انرژی، حفاظت از محیط‌زیست.	(جاموال و همکاران، ۲۰۲۱؛ کمبل و همکاران، ۲۰۱۸؛ گوناسکاران و گوانکار،۲۰۱۸)

1. Additive Manufacturing
2. simulation
3. Augmented Reality (AR)
4. internet of things
5. Cloud computing
6. blockchain
7. RÜBMANN
8. Suleiman
9. Luthra
10. de Sousa Jabbour
11. Jamwal

اقتصاد دایره‌ای (مدور - چرخشی)

اقتصاد دایره‌ای در سال ۱۹۹۶ در آلمان شکل گرفته (متن[۱]، ۱۹۹۶) که به عنوان یک چرخه و ابزاری مناسب برای ارتقای اهداف پایداری (ساوی[۲] و همکاران، ۲۰۱۶)، کاهش چشمگیر آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف منابع تجدیدناپذیر است (جیا [۳]و همکاران، ۲۰۲۰؛ سندین و پیتر[۴]، ۲۰۱۸). علاوه بر این امکان بازسازی محصولات جهت استفاده مجدد را داشته، ذخایر محدود طبیعی را حفظ، بازده منابع را بهینه و خطرات سیستم را به حداقل می‌رساند. در شکل ۱ تفاوت بین اقتصاد خطی مصرف‌گرا و اقتصاد دایره‌ای دیده می‌شود (بلانک و ورثمان[۵]، ۲۰۱۷). هم چنین اقتصاد دایره‌ای با ارائه ابزارهایی مانند[۶] R۳ (کاهش مصرف منابع، استفاده مجدد از محصول و بازیافت) و R۶ [۷] رسیدن به اهداف پایداری را تکمیل می‌کند (گیسدورفر[۸] و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۱: اقتصاد خطی و دایره ای

با توجه به جدول ۲، مطالعات سینگ و همکاران (۲۰۲۳)، کومار[۹] و همکاران (۲۰۲۲) و (۲۰۲۱)، سرما و همکاران (۲۰۲۲)، یداو[۱۰] و همکاران (۲۰۲۰) و کوسی‌سارپونگ[۱۱] و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی موانع و توانمندسازهای پذیرش با روش‌های MCDM[۱۲] پرداختند. در ادبیات، ابزار تصمیم‌گیری چندمعیاره باتوجه به

1. Matten
2. Sauvé
3. Jia
4. Sandin and Peters
5. Blunck and Werthmann
6. Refuse- Rethink- Reduce. Reuse
7. Repair. - Refurbish- Remanufacture- Repurpose- Recycle- Recover.
8. Geissdoerfer
9. Kumar
10. Yadav
11. Kusi-Sarpong
12. Multi-Criteria Decision-Making

ویژگی‌های خاص خود مانند استفاده هم‌زمان از چند معیار برای ارزیابی گزینه‌ها حتی گزینه‌های متضاد ابزار مناسبی است که بسیار توصیه شده است. می‌توان این روش‌ها را با ۵ تا ۱۰ کارشناس اجرا کرد (گوپتا [۱]و همکاران، ۲۰۲۱). راجپوت[۲] و سینگ[۳](۲۰۲۲) یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط از صنعت ۴.۰ برای دستیابی به اقتصاد دایره‌ای شامل لجستیک معکوس پیشنهاد می‌کنند. گوزو[۴] و همکاران (۲۰۲۲) یک چارچوب مبتنی بر پویایی شناسی سیستم(SD[۵]) برای بررسی اقتصاد دایره‌ای برای تصمیم‌گیری در سطوح خرد، میانی و کلان ارائه کرده‌اند. لو و همکاران (۲۰۲۲) تجزیه و تحلیلی از کاربردهای مرتبط با ادغام صنعت ۴ و پایداری در زنجیره‌تامین را از طریق بررسی سیستماتیک ارائه نمودند. خان و همکاران (۲۰۲۲) نیز با تمرکز بر بعد زیست محیطی، اقتصاد دایره‌ای را در شرکت‌های متفاوت بررسی کرده‌اند. دماتوس ناسیمنتو[۶] و همکاران(۲۰۲۴) نیز به شناسایی مرتبط‌ترین فناوری‌های صنعت۴ برای بهبود اصول اقتصاد دایره‌ای و پر کردن شکاف‌های موجود در ادبیات مربوط به اصول 10R اقتصاد دایره‌ای پرداختند. السوهیبانی(۲۰۲۵) بررسی می‌کند که چگونه ترکیب اقتصاد دایره‌ای و نوآوری دیجیتال می‌تواند به پایداری بخش نفت و گاز در عربستان سعودی کمک کند و با استفاده از داده‌های ۳۴۸ مدیر، نشان می‌دهد که این رویکردها به کاهش چالش‌های پایداری و رقابت‌پذیری در این بخش کمک می‌کنند. با مطالعه پیشینه پژوهش درمی‌یابیم که بیشتر تحقیقات گذشته یا فقط مروری بوده‌اند و یا از تکنیک‌های مختلف با تمرکز بیشتر بر ابعاد اقتصادی و زیست محیطی و توجه کمتر به بُعد اجتماعی، شرکت‌های متفاوت یا صنایع خاصی را بررسی کرده‌اند. مطالعات گذشته کمتر به پیگیری و تحلیل موانع برای عملیات پایدار در چارچوب اقتصاد دایره‌ای و صنعت ۴ پرداخته‌است و ادبیات بسیار کمی در مورد ادغام این سه مفهوم با نگرش جامع در دسترس است و اکثر مطالعات موانع را به طور جداگانه تجزیه و تحلیل کرده اند. با توجه به توانایی تکنیک DEMATEL [۷]و ISM [۸] در میان روش‌های دیگر MCDM در شناسایی عوامل تاثیرگذار کلیدی و آشکار ساختن سلسله مراتب منطقی عوامل(محسنی کبیر و همکاران، ۱۴۰۳) و نشان دادن روابط بین معیارها به بهترین شکل ممکن(شاکری و خلیل‌زاده، ۲۰۲۰) این پژوهش این دو روش را برای تجزیه و تحلیل نتایج انتخاب کرد.

1. Gupta
2. Rajput
3. Singh
4. Guzzo
5. System dynamics
6. de Mattos Nascimento
7. Decision making trial and evaluation laboratory
8. Interpretive Structural Modeling

جدول ۲: بررسی پژوهش‌های پیشین

عنوان مقاله	چکیده	هدف	روش مورد استفاده	رفرنس
نوآوری دیجیتال و اقتصاد دایره ای: پیوندی برای تحول پایدار بخش نفت و گاز در عربستان سعودی	با اجرای اصول اقتصاد دایره‌ای و اتخاذ نوآوری دیجیتال، بخش نفت و گاز می‌تواند به طور موثر بر چالش‌های پایداری که با آن مواجه است غلبه کند و در بازار رقابتی باقی بماند.	بررسی نقش اصول اقتصاد دایره‌ای و نوآوری دیجیتال در پایداری بخش نفت و گاز	مدل‌سازی معادلات ساختاری	السوهیبانی[1](۲۰۲۵)
روابط متقابل بین اقتصاد دایره ای و صنعت ۴.۰: تحقیقاتی برای زنجیره تامین پایدار	این مقاله یک طبقه‌بندی جدید از روابط بین فناوری‌های صنعت ۴.۰ و اصول اقتصاد دایره‌ای را ارائه می‌دهد و شکاف‌های تحقیقاتی موجود در این حوزه را شناسایی می‌کند.	طبقه‌بندی از روابط متقابل بین فناوری‌های صنعت ۴.۰ و اصول اقتصاد دایره‌ای .	دلفی فازی و مصاحبه گروهی	دماتوس ناسیمنتو و همکاران(۲۰۲۴)
تجزیه و تحلیل صنعت ۴.۰ و توانمندسازهای اقتصاد دایره ای: گامی به سمت مدیریت عملیات پایدار و انعطاف پذیر	با استفاده از یک روش ترکیبی چند مرحله‌ای، به شناسایی و اولویت‌بندی توانمندسازها و تحلیل حساسیت پرداخته است تا به صنایع کمک کند تا در محیط‌های آشفته و با رعایت اصول پایداری عمل کنند.	اولویت‌بندی توانمندسازهای ارتباط بین صنعت ۴ و اقتصاد دایره‌ای	PF-Delphi PF-AHP PF-CoCoSo	سینگ و همکاران(۲۰۲۳)
ادغام اقتصاد دایره‌ای و صنعت ۴.۰ برای مدیریت زنجیره تامین پایدار: دیدگاه قابلیت پویا	به بررسی چگونگی ادغام CE و صنعت ۴ در مدیریت زنجیره تامین پایدار به منظور بهبود کارایی عملیاتی می پردازد.	بررسی چگونگی ادغام CE و Industry 4.0 در زنجیره تأمین پایدار	مرور ادبیات	(لو[2] و همکاران، ۲۰۲۲)
چارچوبی مبتنی بر پویایی سیستم برای بررسی اقتصاد دایره‌ای	تصمیم‌گیرندگان در عرصه سیاست و تجارت به ابزارهایی برای مقابله با منابع متعدد پیچیدگی در گذارهای اقتصاد دایره‌ای نیاز دارند.	بررسی پیچیدگی اقتصاد دایره‌ای از طریق شناسایی ساختارهای علّی	سیستم دینامیک	(گوزو[3] و همکاران، ۲۰۲۲)
چارچوبی برای غلبه بر چالش‌های زنجیره تأمین پایدار از طریق صنعت ۴.۰ و اقتصاد دایره‌ای: مطالعه موردی صنعت خودرو	شناسایی ۲۸ چالش که در این میان چالش‌های مدیریتی، سازمانی و اقتصادی به‌عنوان حیاتی‌ترین چالش‌ها ظاهر می‌شوند.	شناسایی چالش‌های زنجیره تأمین پایدار از طریق صنعت ۴.۰ و اقتصاد دایره‌ای	BWM-ELECTRE	(یدوا[4] و همکاران، ۲۰۲۰)

1. Alsuhaibany
2. Lu
3. Guzzo
4. yadav

عنوان مقاله	چکیده	هدف	روش مورد استفاده	رفرنس
مدیریت زنجیره تأمین پایدار بر مبنای صنعت ۴.۰ و اقتصاد دایره‌ای: تجزیه‌وتحلیل موانع	دایره‌ای بودن منابع، افزایش سود حاصل از محصولات سبز و طراحی به‌عنوان معیارهای اصلی پایداری شناخته شده‌اند. موانع اصلی شامل نبود نیروی کار ماهر آشنا به صنعت ۴.۰ ، قوانین و کنترل‌های ناکارآمد و توجه به اهداف کوتاه‌مدت شرکت است.	تحلیل موانع برای بهبود پایداری زنجیره تأمین	ELECTRE-AHP	(کومار[1] و همکاران، ۲۰۲۱)
مدل صنعت ۴.۰ برای شبکه لجستیک معکوس اقتصاد دایره ای یکپارچه	حسگرهای اینترنت اشیا برای شفافیت و دقت اطلاعات جهت دستیابی به اقتصاد دایره‌ای شامل لجستیک معکوس پیشنهاد می‌شود.	برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)	بهینه‌سازی هزینه و به حداکثر رساندن عمر محصولات	(راجپوت وسینگ، ۲۰۲۲)
شناسایی و اولویت‌بندی موانع صنعت ۴.۰ برای تولید دیجیتال پایدار: روش ترکیبی	پس از شناسایی ۳۰ مانع اصلی، موانع سازمانی برجسته‌ترین مانع اقدامات پایداری برای تولید دیجیتال و پس از آن موانع زیست‌محیطی، فناوری، اقتصادی، اجتماعی و نهادی با وزن‌های کمتر قرار گرفتند.	مرور ادبیات سیستماتیک و (AHP)	بررسی موانع صنعت ۴.۰ برای تولید دیجیتال جهت پایداری طولانی مدت	(ورما و همکاران، ۲۰۲۲)
موانع پذیرش صنعت ۴.۰ در زنجیره تامین مواد غذایی پایدار: از چشم انداز اقتصاد دایره ای	عدم بلوغ تکنولوژیکی، سرمایه‌گذاری بالا، عدم‌آگاهی و پذیرش مشتری و محدودیت‌های تکنولوژیکی و فقدان نوآوری زیست‌محیطی به‌عنوان برجسته‌ترین موانع هستند.	تجزیه‌وتحلیل موانع برای پذیرش صنعت ۴ در زنجیره تامین مواد غذایی بر اساس اقتصاد دایره‌ای	Rough-DEMATEL	(کومار و همکاران، ۲۰۲۲)
انتخاب تأمین‌کننده پایدار بر اساس صنعت ۴.۰ در چارچوب اقتصاد دایره‌ای	به شناسایی چهار دسته اصلی و بیست و یک زیرمجموعه مرتبط با تصمیم انتخاب تأمین‌کننده پرداخته است. شرکت تولید نساجی پاکستان تأکید زیادی بر فناوری و زیرساخت (IT) و فرهنگ‌سازمانی مثبت نسبت به اجرای طرح‌های صنعت ۴.۰ و اقتصاد دایره‌ای دارد.	ارزیابی و انتخاب یک تأمین‌کننده پایدار در شرکت تولید نساجی پاکستان	(BWM) و VIKOR	(کوسی و همکاران، ۲۰۲۱)

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی، از نظر روش پیمایشی و از نظر جمع‌آوری داده‌ها تحقیق توصیفی محسوب می‌شود. در ابتدا مرور ادبیات موضوع با کمک کلمات کلیدی مرتبط در پایگاههای داده معتبر برای درک عمیق

1. Kumar

وضعیت و انتخاب و ارزیابی نقاط اشتراک مرتبط در روابط متقابل اقتصاد دایره‌ای با فناوری‌های صنعت ۴ صورت گرفت و از طریق مصاحبه با خبرگان پژوهش و جمع‌آوری شاخص‌های مرتبط از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و منابع پژوهش‌های الکترونیکی به شناسایی موانع ارتباط بین صنعت نسل ۴ و اقتصاد دایره‌ای در زنجیره تامین پرداخته است. سپس به کمک روش دلفی شاخص‌های موثر شناسایی و در نهایت به کمک روش ISM-DEMATEL و با استفاده از قضاوت‌های ذهنی جامعه و نمونه آماری پژوهش حاضر شامل ۴ نفر از خبرگان دارای صلاحیت عمومی(سابقه کاری و آشنایی به روش‌های مورد استفاده در پژوهش) و صلاحیت تخصصی(داشتن مقالات در مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی و خارجی، تحصیلات دانشگاهی مرتبط در حوزه صنعت ۴ و پایداری و برگزاری کارگاههای مرتبط) به بررسی روابط بین شاخص‌های موثر و اولویت‌بندی آن‌ها پرداخته است. مشخصات کارشناسان پانل دلفی و روش ISM-DEMATEL در این پژوهش در جدول ۳ ذکر شده است. ابزارگردآوری اطلاعات پرسشنامه مقایسه زوجی است که روایی و پایایی آن به ترتیب با استفاده از روایی محتوا و آزمون مجدد تأیید شده است.

جدول ۳: ویژگی‌های خبرگان پژوهش

میزان تحصیلات	میزان تجربه کاری	سن	سمت شغلی
دکتری تخصصی هوش مصنوعی	۶ سال	۳۷	کارمند سازمان برنامه‌وبودجه
دکتری تخصصی مدیریت صنعتی	۱۰ سال	۴۵	عضو هیئت‌علمی دانشگاه
دانشجوی دکتری تخصصی مدیریت صنعتی	۲ سال	۲۸	پژوهشگر
دانشجوی دکتری تخصصی مدیریت صنعتی	۵ سال	۳۱	پژوهشگر

روش دلفی

روش دلفی توسط نورمن دالکی در دهه ۱۹۵۰ برای یک پروژه نظامی تحت حمایت ایالات متحده توسعه یافته است. تعداد خبرگان معمولا بین ۸ تا ۱۰ نفر و تعداد دورهای نظرسنجی از یک تا سه دور کافی است. اما تعداد خبره بین ۴ تا ۱۷ نفر نیز در تحقیقات پیشین مشاهده شده است(اسکولموسکی[1] و همکاران، ۲۰۰۷). پس از شروع نظرسنجی دور اول پاسخ‌دهندگان می‌توانند در پاسخ خود در دور بعدی تجدید نظر و یا آن را اصلاح کنند و این روند تا رسیدن به اجماع بین خبرگان ادامه دارد(اکولی و پالوسکی[2]، ۲۰۰۴) . از کارشناسان خواسته می‌شود تا عوامل را در مقیاس ۱-۹ نمره‌گذاری کنند به طوری که ۱کمترین ترجیح و ۹ بسیار مرجح می‌باشد. پس از

1. Skulmoski
2.Okoli and Pawlowski

جمع‌آوری نظر خبرگان، فاکتورهایی که امتیاز بالاتر از ۵ داشتند پذیرفته و سایرعوامل غیر مهم حذف می‌شوند (کوپتا و همکاران[1]، ۲۰۲۱).

روش ترکیبی DEMATEL-ISM

رویکرد ترکیبی[2] DEMATEL و ISM[3] به دلیل شباهت‌های بین دو تکنیک، یک رویکرد قوی برای مطالعه روابط علت و معلولی بوده است. هر دو روش DEMATEL , ISM ثابت کرده‌اند که تکنیک‌های قدرتمندی برای شناسایی روابط پیچیده یک سیستم هستند. رویکرد ISM، علی‌رغم ارائه بینش‌های ارزشمند در مورد روابط سلسله مراتبی و وابستگی‌های متقابل بین متغیرها، اندازه‌گیری کمی از میزان نفوذ بین این موانع را ارائه نمی‌کند. برای پرداختن به این شکاف، از تکنیک DEMATEL (رجب[4] و همکاران، ۲۰۲۴) با مراحل زیر استفاده شده است(تری‌وی‌دی[5] و همکاران، ۲۰۲۱):

مرحله ۱: از خبرگان خواسته شد که تأثیر فاکتور i را بر روی فاکتورj با مقیاسa_{ij} از ۰ تا ۴ نشان دهند. «۰» نشان‌دهنده «بدون تأثیر»، «۱» نشان‌دهنده «تأثیر بسیار کم»، «۲» نشان‌دهنده «تأثیر کم»، «۳» نشان‌دهنده «تأثیر زیاد» و «۴» نشان‌دهنده «تأثیر بسیار زیاد» است. ماتریس رابطه مستقیم[6] A یک مقایسه زوجی از روابط علی بین عوامل برای n متغیر/عامل در معادله ۱ نشان داده شده است.

$$A=\begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (۱)$$

مرحله ۲: ماتریس رابطه مستقیم با استفاده از معادله (۲) و (۳) نرمال‌سازی می‌شود. تمام مقادیر ماتریس نرمال‌شده بین ۰ و ۱ هستند.

$$N=\frac{A}{U} \quad (۲)$$

$$U = MAX\ 1 \le i \le n\left\{\sum_{j=1}^{n} aij\right\} \quad (۳)$$

مرحله ۳: ماتریس رابطه کل M از ماتریس نرمال شده N، با استفاده از معادله ۴ به دست می‌آید. I ماتریس همانی است.

1. Gupta
2. hybrid DEMATEL and ISM
3. Interpretive structural modelling
4. Rejeb
5. Trivedi
6. direct relation matrix

$$M=N(I-N)^{-1} \quad (۴)$$

مرحله ۴: مجموع ردیف‌ها و ستون‌ها به طور جداگانه با استفاده از معادله (۵) برای به دست آوردن ماتریس‌های D و R که نشان دهنده قابلیت دسترسی و وابستگی عوامل هستند محاسبه می‌شوند.

(۵)

$$R=\left[\sum_{j=1}^{n} mij\right]_{n*1}=(r_1,r_2,\ldots,r_i,\ldots r_n)$$
$$D=\left[\sum_{i=1}^{n} mij\right]_{1*n}=(d_1,d_2,\ldots,d_i,\ldots,d_n)$$
$$M=m_{ij} \quad I,j=1,2,3,\ldots.n$$

مرحله ۵: ایجاد نمودار علت و معلول با استفاده از D و R با رسم مجموعه داده های(r_i+d_i,r_i-d_i) ¥i£n به صورتی که (r_i+d_i) محور افقی نمودار و (r_i-d_i) محور عمودی نمودار را به تصویر می‌کشند. در ادامه به توضیح روش ISM که یک رویکرد شناخته شده توسط وارفیلد[1]است می‌پردازیم(وارفیلد، ۱۹۷۴):

مرحله ۶: تشکیل یک ماتریس خودتعامل ساختاری(SSIM[2])با توجه به نظر خبرگان و روابط دوتایی بین عوامل با توجه به قوانین زیرجهت رابطه بین متغیرهای i وj است.

V : تابع i برتابع j اثر دارد. A : تابع j بر تابع i اثر دارد. X : توابع i و j بر هم اثر دارند. O : توابع i و j رابطه‌ای با هم ندارند.

مرحله ۷: ماتریس دسترسی اولیه به کمک ماتریس خودتعاملی‌ساختاری ایجاد می‌شود. در این ماتریس V; A؛ X و O با مقادیر باینری۱و۰ جایگزین می‌شود. سپس ماتریس دستیابی نهایی با استفاده از ضرب بولی به دست می‌آید.

مرحله ۸: مجموعه دسترسی‌پذیری[3] و مجموعه‌های مقدم برای هر عامل تشکیل می‌شود. مجموعه دسترسی شامل تمام عواملی است که متغیر مورد بررسی بر آنها اثر دارد، در حالی که مجموعه مقدم شامل همه عواملی است که بر متغیر اثر می‌گذارند. عناصر مشترک این مجموعه‌ها یک مجموعه تقاطع را تشکیل می‌دهند.

مرحله ۹: تجزیه و تحلیل MICMAC بر اساس قدرت محرکه و وابستگی عوامل با ایجاد یک نمودار به صورت بصری تمام متغیرها را در چهار خوشه طبقه‌بندی می‌کند.

1. Warfield
2. Structural Self-interaction Matrix
3. Reachability Set (RS)

یافته‌ها

اگرچه به کارگیری هم‌زمان صنعت ۴، پایداری و اقتصاد دایره‌ای مزایایی برای سازمان‌ها دارد اما به کارگیری آن‌ها چالش‌هایی را نیز به وجود می‌آورد. پژوهش حاضر به دنبال شناسایی موانع ارتباط سه مفهوم در ایران در سال ۱۴۰۳ می‌باشد. برای ارزیابی در ابتدا با مرور ادبیات و نظرسنجی از خبرگان به شناسایی شاخص‌های مرتبط در ۳ گروه ابعاد پایداری و۲۳ معیار در جدول ۴ پرداخته و پس از شناسایی متغیرهای اولیه با روش دلفی، برای درک بهتر رابطه بین موانع موثر پرسشنامه ساختاری جهت مدل‌سازی و ترسیم روابط بین شاخص‌ها و دسته‌بندی آن‌ها در گروه علّی یا معلول استفاده شده است. موانع شناسایی شده در دور اول روش دلفی پس از تایید خبرگان از طریق طوفان مغزی در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۴: موانع ارتباط صنعت نسل ۴ و اقتصاد دایره ای

نماد	نام مانع و چالش	ابعاد پایداری	تعریف	منبع
E1	محدودیت‌های فنی و کمبود منابع (مالی، فنی، انسانی و غیره)	اقتصادی	محدودیت‌های فنی و فناوری در ظرفیت مانع از سرمایه‌گذاری‌ها و اجرای موفقیت آمیز سیاست‌ها می‌گردد..	(کومار و همکاران، ۲۰۲۴؛آگاروال و همکاران، ۲۰۲۴؛ تادی و همکاران، ۲۰۲۴)
E2	هزینه بالای یکپارچه‌سازی سیستم		یکپارچه‌سازی سیستم با تجهیزات به معنی قابلیت همکاری بین دستگاه‌ها و سیستم‌های هوشمند مختلف می‌توانند به طور مستقل با در ارتباط با یکدیگر است.	(سان و همکاران، ۲۰۲۱؛ تادی[1] و همکاران، ۲۰۲۴)
E3	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا و خطرات سرمایه‌گذاری		آگاهی کم دررابطه با بازگشت بلندمدت سرمایه‌گذاری وجود دارد.	(مورا و همکاران(۲۰۲۰)؛یدوا و همکاران،۲۰۲۰؛کومار و همکاران، ۲۰۲۱؛ استایرو و همکاران، ۲۰۲۲؛شارما و همکاران، ۲۰۲۳)
E4	نبود روش‌های کمی و تحلیلی برای ارزیابی مزایای اقتصادی و تأثیرات شاخص‌های پایداری با استفاده از صنعت ۴.۰ در سیستم‌های لجستیکی.		استفاده از ربات‌ها در یک انبار نه‌تنها بر یک فعالیت واحد تأثیر می‌گذارد؛ بلکه بر سایر عملیات و عملکرد کل سیستم لجستیک نیز تأثیر می‌گذارد.	(سان و همکاران، ۲۰۲۱)

1. Taddei

نماد	نام مانع و چالش	ابعاد پایداری	تعریف	منبع
S1	مدیریت و رهبری	اجتماعی	مدیر ضعیف موجب کاهش عملکرد فروش و نرخ گردش مالی، ازدست‌دادن انگیزه و روحیه و عدم مشارکت شده و آسیب زیادی به شرکت وارد می‌کند .	(روسی و همکاران، ۲۰۲۰؛ چاهان و همکاران، ۲۰۲۱)
S2	عدم یکپارچگی داده‌ها و استفاده نادرست از داده‌ها در سازمان		به دلیل حجم و تنوع داده‌های مختلف از منابع مختلف گاهی از آن‌ها استفاده غیرسازنده می‌شود.	(راجپوت و سینگ، ۲۰۱۹)
S3	عدم چابکی شرکت‌ها در اجرای فناوری دیجیتال		شرکت‌ها فاقد انگیزه، نوآوری و چابکی در اجرای فناوری دیجیتال هستند.	(شارما و همکاران، ۲۰۲۳؛آگاروال و همکاران، ۲۰۱۹)
S4	مشکلات امنیتی و نگرانی‌های مربوط به امنیت سایبری و داده.		به دلیل تبادل اطلاعات بین ذینفعان مختلف لجستیکی مسائل امنیت سایبری در تدارکات مطرح می‌شود.	(برسانلی و همکاران، ۲۰۱۹؛سان و همکاران، ۲۰۲۱؛آگاروال و همکاران، ۲۰۲۴)
S5	فقدان نیروی متخصص و آموزش ناکارآمد کارکنان برای یادگیری مفاهیم پایداری		آموزش و مشارکت کارکنان در زمینه پایداری برای بهبود کارایی زنجیره تأمین بسیار مهم است.	(استایر[1]و و همکاران، ۲۰۲۰؛کینبر و همکاران، ۲۰۲۴)
S6	ترس ازدست‌دادن شغل و مشکلات فنی و روانی برای کارگران مسن.		اضطراب کارکنان قدیمی و سالخورده ، از لحاظ فنی و روانی برای انطباق با این تحول جدید یا از دست دادن شغل وجود دارد.	(مولر و همکاران، ۲۰۱۸؛ سان و همکاران، ۲۰۲۱)
S7	مقاومت در برابر تغییر فرهنگ و نبود مدیریت تغییر		کارکنان گاهی در برابر فرهنگ پایداری مقاومت می‌کنند	یدوا و همکاران، ۲۰۲۰؛ استایرو [2]و همکاران، ۲۰۲۲؛ شارما و همکاران، ۲۰۲۳)

1. Satyro
2. Satyro

نماد	نام مانع و چالش	ابعاد پایداری	تعریف	منبع
S8	فقدان طراحی دایره‌ای محصولات و عدم آگاهی مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان از برخی محصولات دایره‌ای		مصرف‌کنندگان محصول نهایی تولید شده با مواد دور ریخته شده را به عنوان محصول بی‌کیفیت در نظر می‌گیرند و قیمت‌های بالا آن را نمی‌پذیرند.	(دی ژسوس و مندونسا[1]، ۲۰۱۸؛ هیدالگو[2] و همکاران، ۲۰۲۰؛ شارما و همکاران، ۲۰۲۳؛عبداللهی و همکاران، ۲۰۲۴)
S9	فقدان قوانین و مقررات و سیاست و مشوق مالیاتی و استانداردهای ارزیابی عملکرد و حمایت دولتی و اداری		فقدان حمایت دولتی، سیاست و قوانین و مقررات برای اقتصاد دایره‌ای و فناوری‌های جدید بر متخصصان و سایر ذی‌نفعان تأثیر می‌گذارد.	(ورنینگ و اسپینلر، ۲۰۲۰؛مورا و همکاران، ۲۰۲۰، شارما و همکاران، ۲۰۲۳؛ تادی و همکاران، ۲۰۲۴؛خالدی و همکاران(۱۴۰۲)
S10	فرهنگ ملی و تفاوت منطقه‌ای و عدم هماهنگی و همکاری بین اعضا، ذی‌نفعان بالادست و پایین‌دست و شرکا		تفاوت‌های فرهنگی بین شرکای زنجیره تامین و انگیزه پایین برای تبادل اطلاعات در میان بازیگران زنجیره‌تامین و ترس از دست دادن اطلاعات به دلیل اطلاعات مشترک وجود دارد.	(کومار و همکاران، ۲۰۲۰؛ تادی و همکاران، ۲۰۲۴؛ دسوسا جابور [3]و همکاران، ۲۰۱۸)
S11	درک پایین نسبت به فناوری تصفیه زیستی مرتبط با مفاهیم صنعت ۴.۰		به دلیل ناآگاهی سازمان‌ها از مزایای پیاده‌سازی این مفاهیم انگیزه‌ای برای وجود ندارد.	(کومار و همکاران، ۲۰۲۱؛ کومار و همکاران، ۲۰۲۴؛ مورنو و همکاران، ۲۰۲۴)
S12	نادیده‌گرفتن چشم‌انداز و آرمان سازمان و توجه به اهداف کوتاه‌مدت		با توجه به تمرکز مدیریت بر اهداف کوتاه‌مدت، سازمان‌ها برای سرمایه‌گذاری مالی مردد هستند.	(کومار و همکاران، ۲۰۲۱؛ کومار و همکاران، ۲۰۲۰)
EN1	مصرف زیاد انرژی و اثرات زیست‌محیطی	زیست محیطی	مصرف انرژی بالاتر و اثرات زیست‌محیطی به دلیل استفاده از تعداد زیادی حسگر، ربات‌ها و سایر دستگاه‌های هوشمند در عملیات لجستیکی وجود دارد.	(سان و همکاران، ۲۰۲۱)
EN2				

1. De Jesus and Mendonça
2. Hidalgo
3. de Sousa Jabbour

نماد	نام مانع و چالش	ابعاد پایداری	تعریف	منبع
	نبود دانش و آگاهی زیست‌محیطی		عدم درک پیامدهای محیط زیستی فناوری‌هایی مانند بلاک‌چین وجود دارد.	(شارما و همکاران، ۲۰۲۳؛کوهی زاده و همکاران، ۲۰۲۱)
EN3	فقدان نوآوری زیست‌محیطی		نوآوری سبز یک راه‌حل عالی برای افزایش شهرت و مزیت‌های رقابتی است.	(کومار و همکاران، ۲۰۲۴؛ هانگ و همکاران، ۲۰۲۲)
EN4	برآورد نامناسب هزینه برای بسته‌بندی سازگار با محیط‌زیست		هزینه بالای بسته‌بندی محصولات، پذیرش آن را در سازمان محدود می‌کند.	(لطفی و همکاران(۱۴۰۱)؛ یدوا و همکاران، ۲۰۲۰)
EN5	فقدان قوانین و مقررات زیست‌محیطی برای شیوه‌های سبز و محصولات بازیافتی		نقص در قوانین اجرایی و مقررات سیستماتیک نسبت به محیط‌زیست وجود دارد.	(کوهی زاده و همکاران، ۲۰۲۱؛ اوللّه[1] احمد و همکاران، ۲۰۲۱؛تادی و همکاران، ۲۰۲۴)
EN6	هزینه‌های بالای دفع و بازیافت		هزینه‌های بالای دفع، سازمان را از اتخاذ پایداری در زنجیره تأمین منصرف می‌کند	(اوللّه حمد و همکاران، ۲۰۲۱؛ یدوا و همکاران، ۲۰۲۰)
EN7	عدم همکاری با نهادهای زیست‌محیطی		باید بین نوآوری فناوری با ISO ۱۴۰۰۱ نیز رابطه معناداری پیدا کرد.	(اوللّه حمد و همکاران، ۲۰۲۱؛ عبید و همکاران،۲۰۲۲)

معیار اتفاق‌نظر در روش دلفی یا ضریب کندال و طیف لیکرت ، عددی بین ۰ تا ۱ است. هرچه ضریب به بدست آمده به یک نزدیکتر باشد توافق بیشتر و هر چه به صفر نزدیکتر باشد توافق کمتر است. ضریب کندال در نرم افزار SPSS در جدول ۵ در دور دوم ۰/۴۲۵ که نشان از اتفاق‌نظر متوسط بین خبرگان و در مرحله سوم ۰/۶۳۹ به‌دست‌آمده که نشان از اتفاق‌نظر بین خبرگان دارد؛ در راند سوم که معمولاً آخرین راند روش دلفی است خبرگان با آگاهی از نظر سایر متخصصان در پاسخ خود تجدیدنظر کرده و برخی شاخص‌ها با امتیاز کمتر را حذف می‌کنند. پس از اتمام روش دلفی، با این ۱۴ شاخص که امتیاز بالاتر از حد آستانه یعنی ۵ را دارند بخش کمی پژوهش آغاز می‌شود. نتایج در جدول ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۵: تحلیل دور دوم و سوم ضریب کندال

دور سوم	N	4
	Kendall's W[a]	.639
	Chi-Square	33.229
	df	13

دور دوم	N	4
	Kendall's W[a]	.425
	Chi-Square	37.401
	df	22

1. Ullah

	Asymp. Sig.	.021		Asymp. Sig.	.002

جدول ۶: شاخص‌های نهایی انتخاب شده با روش دلفی

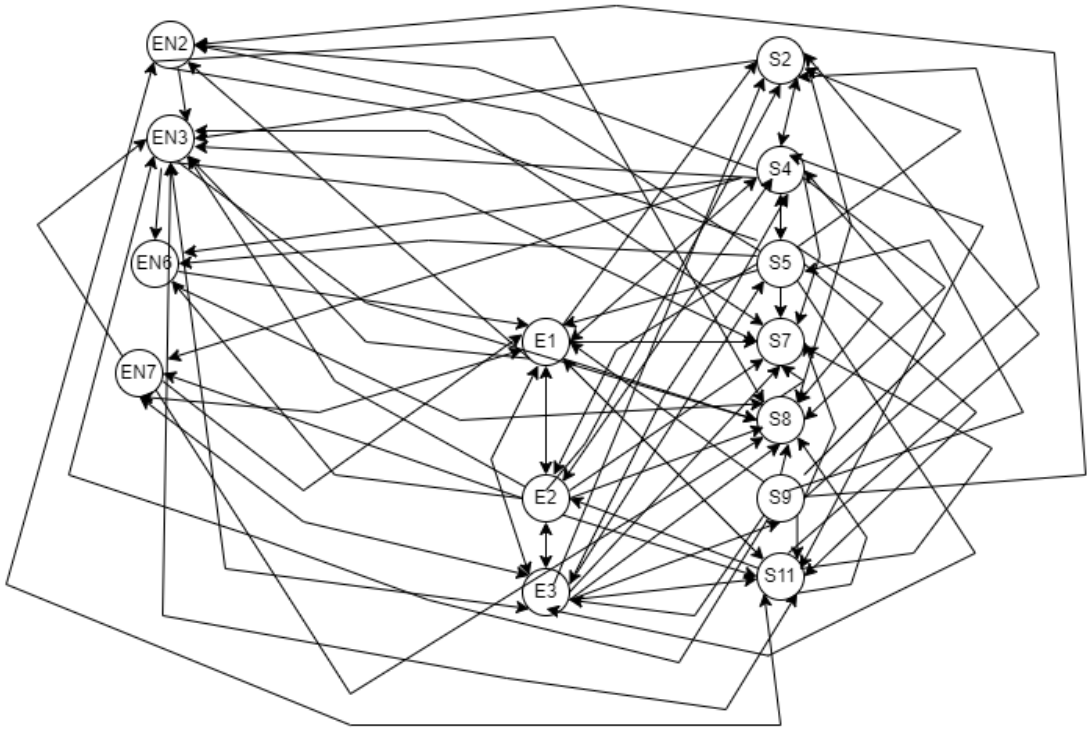
نام مانع و چالش	میانگین امتیاز	انحراف معیار	وضعیت متغیر (پذیرش/رد)
E1	۸	۰.۸۲	پذیرش
E2	۸.۳۴	۰.۴۷	پذیرش
E3	۷	۱.۴۱	پذیرش
E4	۴.۳۴	۰.۴۷	رد
S1	۴.۶۷	۰.۹۴	رد
S2	۶	۰.۸۲	پذیرش
S3	۴.۳۴	۰.۹۴	رد
S4	۵.۶۷	۱.۸۹	پذیرش
S5	۵.۳۴	۰.۴۷	پذیرش
S6	۴.۶۷	۱.۷	رد
S7	۶.۳۴	۰.۴۷	پذیرش
S8	۶.۶۷	۱.۲۵	پذیرش
S9	۶	۱.۴۱	پذیرش
S10	۴.۳۴	۱.۷	رد
S11	۶	۲.۱۶	پذیرش
S12	۴	۱.۴۱	رد
EN1	۴	۱.۶۳	رد
EN2	۶	۰.۸۲	پذیرش
EN3	۵	۱.۴۱	پذیرش
EN4	۴	۰.۸۲	رد
EN5	۴.۶۷	۰.۴۷	رد
EN6	۵.۶۷	۱.۸۲	پذیرش
EN7	۵.۳۴	۱.۸۹	پذیرش

برای پیاده‌سازی رویکرد DEMATEL ابتدا ماتریس رابطه مستقیم A با استفاده از میانگین حسابی ساده نظرات همان ۴ خبره بر اساس مقیاس ۰-۴ محاسبه می‌شود که در جدول ۷ نشان داده شده است. پس از آن ماتریس نرمال‌شدهN را با کمک معادلات ۲ و۳ و با مقادیر در محدوده ۰-۱ تشکیل و سپس ماتریس رابطه کلM از ماتریس نرمال شده با استفاده از معادله (۴) محاسبه و در نهایت مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس روابط کل با استفاده از معادله‌ی (۵) به دست می‌آیند. با محاسبه Di + Rj و Di –Rj روابط علّی و معلولی در جدول ۸ نشان داده شده است. این مقادیر به تجزیه و تحلیل چالش‌ها و ترسیم نمودار علت و معلول کمک می‌کنند.

جدول ۷: ماتریس رابطه مستقیم

نام معیار	E1	E2	E3	S2	S4	S5	S7	S8	S9	S11	EN2	EN3	EN6	EN7
E1	۰	۱.۵	۱.۵	۲	۱.۵	۲	۱	۲.۵	۱	۲.۵	۲	۱.۵	۱.۵	۱.۵
E2	۳	۰	۱.۵	۲.۵	۲.۵	۱.۵	۱.۵	۲	۲	۲	۱	۱.۵	۲	۲
E3	۳.۵	۲.۵	۰	۲	۲	۱.۵	۱.۵	۲.۵	۲	۱.۵	۱	۲	۲	۲
S2	۱	۱.۵	۰.۵	۰	۳	۲	۱.۵	۱.۵	۱	۰.۵	۱	۲	۱.۵	۱
S4	۱.۵	۲	۳.۵	۳	۰	۲	۲	۲	۱.۵	۱	۲	۲.۵	۲.۵	۲.۵
S5	۲.۵	۲	۱	۲	۲.۵	۰	۳	۱.۵	۱.۵	۳.۵	۳	۳	۱.۵	۱
S7	۱.۵	۱.۵	۱.۵	۱.۵	۱.۵	۲	۰	۱.۵	۰.۵	۱.۵	۱.۵	۱	۱	۰.۵
S8	۱	۱.۵	۲	۱.۵	۱.۵	۰.۵	۲	۰	۱.۵	۲.۵	۲	۱.۵	۰.۵	۱
S9	۲	۱	۲.۵	۱.۵	۲.۵	۲	۲	۲	۰	۲	۱.۵	۱.۵	۱.۵	۱.۵
S11	۲	۲	۲.۵	۱.۵	۱.۵	۱	۳	۴	۱	۰	۱.۵	۲	۰.۵	۱
EN2	۱	۱.۵	۱.۵	۱	۱	۱	۲	۲.۵	۱	۲	۰	۲.۵	۱	۱
EN3	۱.۵	۱.۵	۲.۵	۱	۱	۱.۵	۲	۳	۰.۵	۰.۵	۱	۰	۲.۵	۱.۵
EN6	۲.۵	۱	۱.۵	۰.۵	۱	۱	۱	۲.۵	۱	۱	۱	۱	۰	۱.۵
EN7	۲	۲	۲	۱	۰.۵	۰.۵	۱	۱.۵	۰.۵	۱.۵	۲	۲.۵	۲	۰

سپس برای به دست آوردن ماتریس روابط داخلی باید ارزش آستانه محاسبه شود. مقدار آستانه روابط یعنی میانگین مقادیر ماتریس T برابر ۰/۲۱۱ است. تمامی مقادیر ماتریس T را که کوچکتر از ۰/۲۱۱ باشند صفر در نظرگرفته یعنی آن رابطه علی در نظر گرفته نمی‌شود و مابقی اعداد به همان صورت نوشته می‌شوند. به کمک ماتریس روابط داخلی و با توجه به حدآستانه متغیرها، نقشه روابط و تاثیر بین متغیرها در شکل ۲ نشان داده شده است.



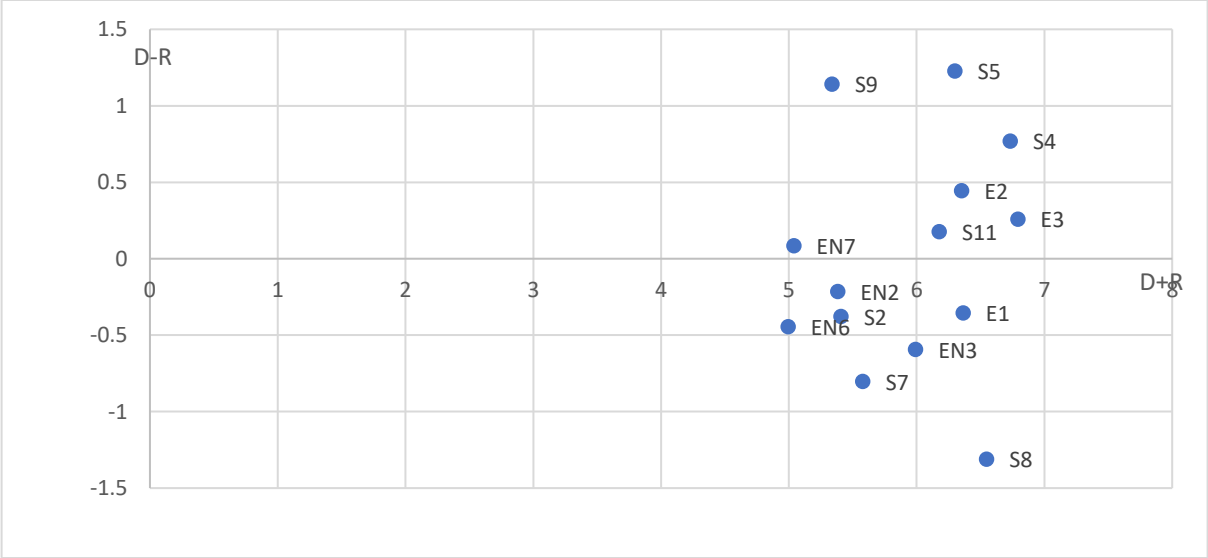
شکل ۲: نقشه روابط بین متغیرها

جمع عناصر هر سطر(D) که از مجموع ردیف‌ها در ماتریس کل به دست می‌آید نشان‌گر میزان تاثیرگذاری آن عامل بر سایر عامل‌های مدل و مجموع عناصر ستون(R) که از مجموع ستون‌های هر عامل در ماتریس ارتباط کل به دست می‌آید نشانگر میزان تاثیرپذیری آن عامل از سایر عامل‌های سیستم است. بردار افقی (D+R)، میزان تاثیر عوامل مورد نظر در سیستم، هر چه مقدار بیشتری داشته باشد یعنی آن عامل تعامل بیشتری با سایر عوامل سیستم دارد. بردار عموری (D-R) نشان‌دهنده قدرت تاثیرگذاری هر عامل است که اگر مثبت باشد، متغیر یک متغیر علی و اگر منفی باشد، متغیر جز متغیرهای معلول محسوب می‌شود. با توجه به نتایج جدول ۸ می‌توان گفت متغیر S5(فقدان نیروی متخصص و آموزش ناکارآمد کارکنان برای یادگیری مفاهیم پایداری) با مقدارD ۳/۷۶۳ تاثیرگذارترین عامل و با مقدار ۱/۲۲۷ در ستون D-R جز متغیرهای علی که تأثیر مستقیم قابل توجهی بر سایر موانع که جز عوامل معلول هستند دارد. متغیر S8 (فقدان طراحی دایره‌ای محصولات و عدم آگاهی مصرف کنندگان و تولیدکنندگان از برخی محصولات دایره‌ای) با مقدار ۲/۶۱۸ در ستون D و مقدار ۱/۳۱۱- در ستون D-R تاثیرپذیرترین عامل است. همچنین با توجه به اعداد مثبت ستون D-R می‌توان گفت معیار S9 (فقدان قوانین و مقررات و سیاست و مشوق مالیاتی و استانداردهای ارزیابی عملکرد و حمایت دولتی و اداری) با عدد ۱/۱۴۱ در جایگاه دوم، S4 (مشکلات امنیتی و نگرانی‌های مربوط به امنیت سایبری و داده) با مقدار ۰/۷۶۹ در

مرتبه سوم، E2 (هزینه بالای یکپارچه سازی سیستم) با مقدار ۰/۴۴۵ در رتبه چهارم، E3 (هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالاو خطرات سرمایه‌گذاری) با عدد ۰/۲۵۸ در رتبه پنجم، S11 (درک پایین نسبت به فناوری تصفیه زیستی مرتبط با مفاهیم صنعت ۴.۰) با مقدار ۰/۱۷۷ در جایگاه ششم وEN7 (عدم همکاری با نهادهای زیست محیطی) با مقدار ۰/۰۸۴ در جایگاه هفتم قرار می‌گیرند. مابقی متغیرها با مقادیر منفی جز متغیرهای معلول در نظر گرفته می‌شوند. سپس تمام موانع روی یک نمودار علّی (علت و معلول) که محور افقی آن D+R و محور عمودی آن D-R است رسم شده تا روابط کلیدی بین موانع را به‌طور بصری به تصویر کشده و تجزیه‌وتحلیل کند. تمام موانع در بالای نمودار ۵ جز عوامل علی و سایر چالش‌ها و عوامل در پایین نمودار جز متغیرهای معلول هستند. نقشه شبکه بین متغیرها در شکل ۴ نیز تاییدی بر این مطلب است. تعداد فلش‌های زیادی که به متغیر S8 ختم می‌شوند نشان از تاثیرپذیری بالای این متغیر از سایر متغیرها و تعداد فلش‌های زیادی که از متغیر S5 خارج و فلش‌های کمتری که به آن وارد می‌شوند نشان از تاثیرگذاری بالا و تاثیرپذیری کم این متغیر دارند.

جدول ۸: مجموع سطرها ستونها

مانع	Rj	Di	Di + Rj	Di –Rj	نوع متغیر
E1	۳.۳۵۸	۳.۰۰۵	۶.۳۶۴	-۰.۳۵۴	معلول
E2	۲.۹۵۴	۳.۳۹۹	۶.۳۵۳	۰.۴۴۵	علی
E3	۳.۲۶۷	۳.۵۲۵	۶.۷۹۲	۰.۲۵۸	علی
S2	۲.۸۹۳	۲.۵۱۵	۵.۴۰۹	-۰.۳۷۸	معلول
S4	۲.۹۸۱	۳.۷۵۱	۶.۷۳۲	۰.۷۶۹	علی
S5	۲.۵۳۶	۳.۷۶۳	۶.۲۹۹	۱.۲۲۷	علی
S7	۳.۱۹۱	۲.۳۸۸	۵.۵۷۹	-۰.۸۰۳	معلول
S8	۳.۹۲۹	۲.۶۱۸	۶.۵۴۸	-۱.۳۱۱	معلول
S9	۲.۰۹۹	۳.۲۳۹	۵.۳۳۸	۱.۱۴۱	علی
S11	۳	۳.۱۷۷	۶.۱۷۷	۰.۱۷۷	علی
EN2	۲.۷۹۹	۲.۵۸۳	۵.۳۸۲	-۰.۲۱۵	معلول
EN3	۳.۲۹۳	۲.۶۹۹	۵.۹۹۲	-۰.۵۹۴	معلول
EN6	۲.۷۲	۲.۲۷۴	۴.۹۹۴	-۰.۴۴۶	معلول
EN7	۲.۴۷۸	۲.۵۶۲	۵.۰۴	۰.۰۸۴	علی



شکل ۳: نمودار علّی (روابط علت و معلولی بین متغیرها)

در ادامه روابط زوجی ISM با نظر خبرگان، بر اساس VAXO ذکر شده در مرحله ۶ و برمبنای مد در فراوانی نظرات، ثبت و یک ماتریس خود تعاملی‌ساختاریافته (SSIM) در جدول ۹ و با توجه به مرحله ۷ و با تبدیل VAXO به صفر و یک، ماتریس قابلیت دسترسی از SSIM که یک ماتریس باینری است استخراج می‌گردد. ماتریس به دست آمده را با ماتریس همانی جمع کرده تا درایه‌های قطرهای اصلی مساوی با یک و ماتریس دسترسی اولیه مطابق با جدول ۱۰ به دست آید.

جدول ۹: ماتریس خودتعاملی‌ساختاریافته

EN7	EN6	EN3	EN2	S11	S9	S8	S7	S5	S4	S2	E3	E2	E1	نام معیار
V	O	X	0	O	A	A	O	X	X	X	X	V		E1
O	O	O	O	O	O	X	O	A	V	X	X			E2
X	O	A	O	O	A	A	A	A	O	O				E3
O	V	A	A	A	O	A	V	A	O					S2
A	O	V	X	A	A	X	A	A						S4
X	A	O	O	V	O	V	A							S5
V	A	V	V	O	O	V								S7
A	V	A	A	A	O									S8
O	A	V	X	X										S9
A	O	X	O											S11
X	O	V												EN2
V	O													EN3
A														EN6
														EN7

جدول ۱۰: ماتریس دسترسی اولیه

نام معیار	E1	E2	E3	S2	S4	S5	S7	S8	S9	S11	EN2	EN3	EN6	EN7
E1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱
E2	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
E3	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
S2	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
S4	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰
S5	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱
S7	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱
S8	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰
S9	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰
S11	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰
EN2	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱
EN3	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱
EN6	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰
EN7	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱

در مرحله بعد نیاز است تا رابطه ثانویه بین متغیرها بررسی گردد. این اعداد با علامت۱ * در ماتریس نهایی در جدول ۱۱ مشخص شده‌اند.

جدول ۱۱: ماتریس دسترسی نهایی

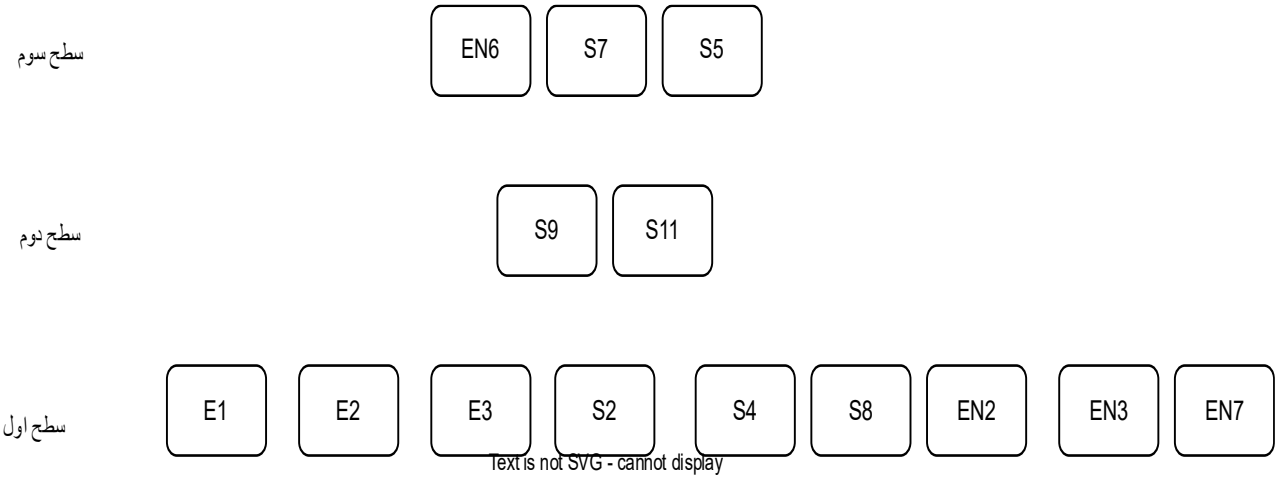
نام معیار	E1	E2	E3	S2	S4	S5	S7	S8	S9	S11	EN2	EN3	EN6	EN7	قدرت نفوذ
E1	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱*	۱*	۰	۱*	۱*	۱	۱*	۱	۱۳
E2	۱*	۱	۱	۱	۱	۰	۱*	۱	۰	۰	۱*	۱*	۱*	۱*	۱۱
E3	۱	۱	۱	۱*	۱*	۱*	۰	۱*	۰	۱*	۱*	۱*	۱*	۱	۱۲
S2	۱	۱	۱*	۱	۱*	۱*	۱	۱*	۱*	۰	۱*	۱*	۱	۱*	۱۳
S4	۱	۱*	۱*	۱*	۱	۱*	۰	۱	۱*	۱*	۱	۱	۱*	۱*	۱۳
S5	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱*	۱	۱*	۱*	۱*	۱	۱۴
S7	۱*	۱*	۱	۱*	۱	۱*	۱	۱	۱*	۱*	۱	۱	۱*	۱	۱۴
S8	۱	۱	۱	۱	۱	۱*	۱*	۱	۱*	۰	۱*	۱*	۱	۱*	۱۳
S9	۱	۱*	۱	۱*	۱	۱*	۰	۱*	۱	۱	۱	۱	۰	۱*	۱۲
S11	۱*	۱*	۱*	۱	۱	۰	۱*	۱	۱	۱	۱	۱	۱*	۱*	۱۳
EN2	۱*	۱*	۱	۱	۱	۱*	۱*	۱	۱	۱	۱	۱	۱*	۱	۱۴
EN3	۱	۱*	۱	۱	۱*	۱*	۱*	۱	۱*	۱	۱*	۱	۱*	۱	۱۴
EN6	۱*	۱*	۱*	۱*	۱*	۱	۱	۱*	۱	۱*	۱*	۱	۱	۱*	۱۴
EN7	۱*	۱*	۱	۱*	۱	۱	۱*	۱	۱	۱	۱	۱*	۱	۱	۱۴
میزان وابستگی	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۲	۱۱	۱۴	۱۱	۱۱	۱۴	۱۴	۱۳	۱۴	

سپس با توجه به مرحله ۸ روش‌شناسی، مجموعه دسترس‌پذیری و مجموعه مقدم هر عامل شناسایی و تقسیم‌بندی سطح انجام می‌شود. جدول ۱۲ سه دور مختلف از تعیین سطح متغیرها را نشان می‌دهد. موانع سطح پایین که هدایت‌کننده سایر عوامل هستند شامل متغیرهای E1 (محدودیت‌های فنی و کمبود منابع (مالی، فنی، انسانی و غیره)، E2 (هزینه بالای یکپارچه‌سازی سیستم)، E3 (هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا و خطرات سرمایه‌گذاری)، S2 (عدم یکپارچگی داده‌ها و استفاده نادرست از داده‌ها در سازمان)، S4 (مشکلات امنیتی و نگرانی‌های مربوط به امنیت سایبری و داده)، S8 (فقدان طراحی دایره‌ای محصولات و عدم آگاهی مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان از برخی محصولات دایره‌ای)، EN2 (نبود دانش و آگاهی زیست‌محیطی)، EN3 (فقدان نوآوری زیست محیطی) و EN7 (عدم همکاری با نهادهای زیست محیطی) در سطح اول نمودار قرار می‌گیرند. بنابراین ارگان‌های دولتی یا سازمان‌ها باید بر موانع سطح پایین تمرکز کنند تا پیچیدگی‌های پیاده‌سازی صنعت ۴ و اقتصاد دایره‌ای را کاهش دهند. متغیرهای S11 (درک پایین نسبت به فناوری تصفیه زیستی مرتبط با مفاهیم صنعت ۴.۰) و S9 (فقدانقوانین و مقررات و سیاست و مشوق مالیاتی و استانداردهای ارزیابی عملکرد و حمایت دولتی و اداری) در سطح دوم و متغیرهای S5 (فقدان نیروی متخصص و آموزش ناکارآمد کارکنان برای یادگیری مفاهیم پایداری) و S7 (مقاومت در برابر تغییر فرهنگ و نبودمدیریت تغییر) و EN6 (هزینه‌های بالای دفع و بازیافت) در سطح سوم قرار می‌گیرند. موانع در سطح بالا یا همان سطح سوم مدل ISM دارای ارزش تأثیرگذاری بسیار پایینی

هستند زیرا به موانع دیگر بستگی دارند. شکل ۴ نشان دهنده سطوح مختلف مدل ساختاری تفسیری (ISM) است.

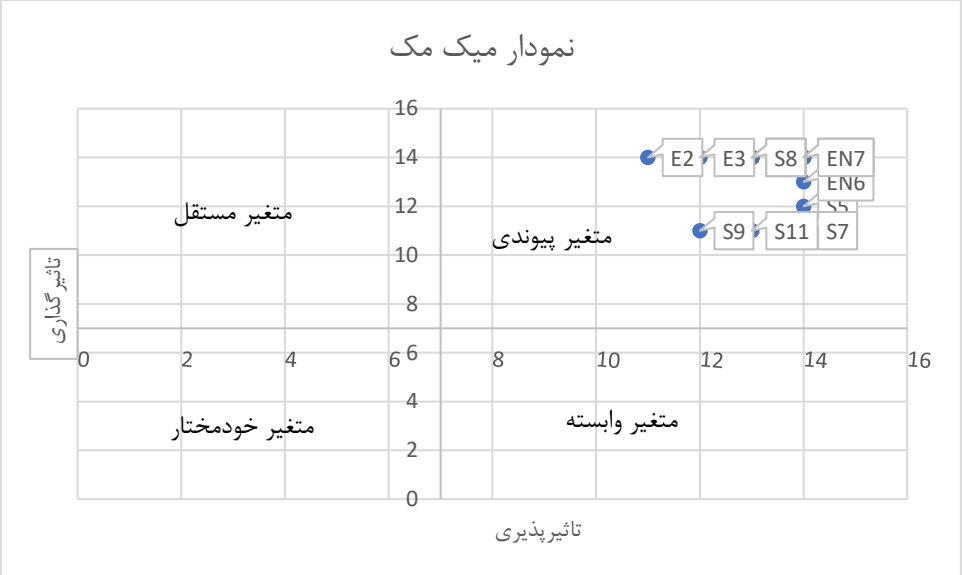
جدول ۱۲: سطح‌بندی مواتع و چالش‌ها

دور اول				
مانع	مجموعه دسترسی‌پذیری (RS)	مجموعه مقدم (AS)	مجموعه اشتراک (IS)	سطح
E1	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S11, EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S 11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S11,EN2, EN3,EN6,EN7	۱
E2	E1,E2,E3,S2,S4,S7,S8,EN2,E N3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S 11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S7,S8,EN2,EN3,EN 6,EN7	۱
E3	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S8,S11,EN2,E N3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S 11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S8,S11,EN2,EN 3,EN6,EN7	۱
S2	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9, EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S 11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,EN2,E N3,EN6,EN7	۱
S4	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S8,S9,S11, EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S 11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S8,S9,S11,EN2, EN3,EN6,EN7	۱
S5	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9, S11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,EN2 ,EN3,EN6,EN7	E1,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,EN2,EN3, EN6,EN7	
S7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9, S11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,S2,S5,S7,S8,S11,EN2,E N3,EN6,EN7	E1,E2,S2,S5,S7,S8,S11,EN2,EN3,E N6,EN7	
S8	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9, EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S 11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,EN2,E N3,EN6,EN7	۱
S9	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S8,S9,S11, EN2,EN3, EN7	S2,S4,S5,S7,S8,S9,S11,EN2,E N3,EN6,EN7	S2,S4,S5, S8,S9,S11,EN2,EN3,EN6,EN7	
S11	E1,E2,E3,S2,S4,S7,S8,S9,S11, EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E3,S4,S5,S7,S9,S11,EN2,E N3,EN6,EN7	E1,E3,S4,S7,S9,S11,EN2,EN3,EN6, EN7	
EN2	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9, S11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S 11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S11,E N2,EN3,EN6,EN7	۱
EN3	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9, S11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S 11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S11,E N2,EN3,EN6,EN7	۱
EN6	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9, S11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S11, EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S11,EN2, EN3,EN6,EN7	
EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9, S11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S 11,EN2,EN3,EN6,EN7	E1,E2,E3,S2,S4,S5,S7,S8,S9,S11,E N2,EN3,EN6,EN7	۱
دور دوم				
S5	S5,S7 ,S9,S11,EN6	S5,S7, S9,EN6	S5,S7, S9,EN6	
S7	S5,S7 ,S9,S11,EN6	S5,S7, S11,EN6	S5,S7, S11,EN6	
S9	S5, S9,S11	S5,S7 ,S9,S11,EN6	S5, S9,S11	۲
S11	S7 ,S9,S11,EN6	S5,S7 ,S9,S11,EN6	S7 ,S9,S11,EN6	۲
EN6	S5,S7 ,S9,S11,EN6	S5,S7,S11,EN6	S5,S7 , S11,EN6	
دور سوم				
S5	S5,S7,EN6	S5,S7,EN6	S5,S7,EN6	۳
S7	S5,S7,EN6	S5,S7,EN6	S5,S7,EN6	۳
EN6	S5,S7,EN6	S5,S7,EN6	S5,S7,EN6	۳



شکل ۴: سطح‌بندی چالش‌های پژوهش با روش ISM

تجزیه و تحلیل MICMAC در شکل ۵ ثابت می‌کند که همه موانع جز موانع تاثیرگذار کلیدی، ناپایدار، در گروه پیوندی که وابستگی شدیدی به بقیه عوامل دارند که هر گونه اقدامی روی آن‌ها بر دیگران و خود آن‌ها تأثیر می‌گذارد. با توجه به جدول ۸ درمی‌یابیم که شدت تاثیرپذیری عوامل درروش دیمتل در بازه‌ی ۴/۹۹۴ و ۶/۷۹۲ قرار دارند که نشان از تاثیرپذیری بالای همه عوامل مورد نظر در پژوهش دارد. البته این امر با توجه به قرار گرفتن کلیه متغیرها در گروه پیوندی نیز مورد تایید قرار می‌گیرد. در مرحله آخر، مجدداً با چهار متخصص تماس گرفته و نتایج روش DEMATEL وISMبرای اعتبارسنجی به آنها نشان داده شده است.



شکل ۵: نمودار میک‌مک

بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه با بررسی ارتباط بین صنعت۴ و اقتصاد دایره‌ای و پایداری در ایران در پاسخ به پرسش اول پژوهش، ۱۴چالش موثر را به کمک روش دلفی شناسایی ودر پاسخ به سوال دوم و سوم پژوهش، از طریق سطح‌بندی عوامل با روش ISM و کمی‌کردن شدت اثرگذاری و اثرپذیری عوامل بر روی یکدیگر و بررسی ارتباط بین عوامل از طریق روش دیمتل، یک چارچوب سیستمی جهت مدل‌سازی و تجزیه‌وتحلیل شاخص‌های موثر ایجاد کرده است که در آن EN6 هزینه‌های بالای دفع و بازیافت، S5 فقدان نیروی متخصص و آموزش ناکارآمد کارکنان برای یادگیری مفاهیم پایداری و S7 مقاومت در برابر تغییر فرهنگ و نبود مدیریت تغییر در سطح سوم قرار می‌گیرند که نشان از تاثیر این عوامل از عوامل سطح پایین‌تر خود دارند. همچنینطبق اولویت‌بندی و طبقه‌بندی چالش‌ها در روش دیمتل باید گفت که عامل S5 فقدان نیروی متخصص و آموزش ناکارآمد کارکنان برای یادگیری مفاهیم پایداری، S9 فقدان قوانین و مقررات و سیاست و مشوق مالیاتی و استانداردهای ارزیابی عملکرد و حمایت دولتی و اداری(سطح دوم روشISM)، S4 مشکلات امنیتی و نگرانی‌های مربوط به امنیت‌سایبری و داده، E2 هزینه بالای یکپارچه‌سازی سیستم، E3 هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا و خطرات سرمایه گذاری، S11 درک پایین نسبت به فناوری تصفیه‌زیستی مرتبط با مفاهیم صنعت ۴.۰، EN7 عدم همکاری با نهادهای زیست‌محیطی در رتبه‌های اول تا هفتم و در گروه علت قرار می‌گیرند. در بررسی موانع پذیرش صنعت ۴.۰ و اقتصاد دایره‌ای در زنجیره تامین

کشاورزی در هند نیزعدم حمایت و مشوق‌های دولتی و فقدان سیاست‌ها و پروتکل‌ها، موانع مهمی برای اجرای این مفاهیم هستند(کومار و همکاران، ۲۰۲۱). معیار S5 مرتبط با ناآگاهی پرسنل و فقدان نیروی متخصص در روش دیمتل جز مهم‌ترین عامل علّی و همچنین معیارهای محدودیت مالی و هزینه‌ها و توجه به عوامل محیط‌زیست در پژوهش‌های دیگر نیز تایید شدند(آگیمانگ۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ تادی۲ و همکاران، ۲۰۲۴، محمدی و همکاران، ۱۴۰۲). بنابراین به مدیران و سیاست‌گذارن پیشنهاد می‌شود به صورت فوری به حل کمبود نیروی متخصص و ماهر از طریق آموزش مناسب کارکنان در محیط فنی به سرعت در حال تغییر امروزی به صورت حضوری یا مجازی با اپلیکیشن‌های مختلف، شرکت در سخنرانی‌ها و سمینارهای مرتبط و استخدام نیروهای متخصص و خبره بپردازند. برای ایجاد فرهنگ سازمانی مناسب جهت پذیرش هوشمندسازی و تحول دیجیتال و استفاده از محصولات بازیافتی سبز دوست‌دار محیط زیست، سیاست‌های مختلف دولت در جهت حمایت از ایده‌های مرتبط و جدید، نظارت و مدیریت بر ضایعات، استفاده مجدد از محصولات اسقاط‌شده، تنظیم قوانین ملی و تصویب وام با سود کم و بلندمدت در سطح کلان، ایجاد معافیت‌های مالیاتی برای شرکت‌های فعال در حوزه زیست‌محیطی و کاهش موانع سیاسی و اقتصادی توصیه می‌شود. سازمان‌ها و شرکت‌های تولیدی نیز می‌توانند با ایجاد آگاهی در میان کارکنان و مشتریان در زمینه فناوری‌های دیجیتال آن‌ها را متقاعد به سودآوری این مفاهیم برای جامعه کنند. با توجه به جدید بودن موضوعاتی مانند صنعت ۴.۰ و اقتصاد دایره‌ای، مطالعه دارای محدودیت‌هایی است. اول با توجه به نو بودن موضوع پژوهش تعداد مقالات کمی در ایران به پشتیبانی ادبیات موانع و همچنین یافته‌های مطالعه می‌پردازند. از طرفی تجزیه و تحلیل انجام شده در این مطالعه مبتنی بر نظرات ذهنی متخصصان است و ممکن است در گروه‌های مختلف دیگر نظرات متفاوت دیگری به دست آید. تعداد کارشناسان نسبتاً کم است زیرا این پژوهش تنها پاسخ‌های متخصصان با تخصص و تجربه منطقی را تضمین می‌کند. علاوه بر این، ISM به دلیل ضعف‌هایی مانند تفسیر محدود پیوندهای احتمالی در بین متغیرها و نادیده گرفتن پیوندهای گذرا مورد انتقاد قرار می‌گیرد. در پاسخ به این ضعف‌های ISM، TISM پدید آمده است که به هم پیوستگی متغیرها را هم از طریق پیوندهای مستقیم و هم غیرمستقیم نشان می‌دهد (محقق و گروسلر۳، ۲۰۲۴). با توجه به محدودیت‌های پژوهش به محققان پیشنهاد می‌شود با توجه به پیامدهای متفاوت صنعت۴ در سناریوها و صنایع مختلف بهتر است در مطالعات دیگر تعداد محدودی از فناورهای صنعت ۴ مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، فناوری بلاک چین و

1. Agyemang
2. Taddei
3. Mohaghegh and Größler

یادگیری ماشینی را در صنایع خاص مانند صنعت فولاد، وسایل الکترونیکی و نفت و گاز که سهم قابل توجه‌ای در ایجاد ضایعات دارند بررسی کنند. همچنین مطالعه تطبیقی در کشورهای توسعه‌یافته و دیگر کشورهای در حال توسعه پیشنهاد می‌شود. DEMATEL یک تکنیک پرکاربرد است که برای تجزیه‌وتحلیل ساختاریافته مسائل پیچیده استفاده می‌شود. Rough DEMATEL وGrey DEMATEL و FUZZY ISM کمک می‌کند تا عدم قطعیت و مبهم بودن محیط تصمیم‌گیرندگان مربوط به فناوری‌های صنعت۴ بیشتر در نظر گرفته شود. تحقیقات بیشتر باید راه‌حل‌هایی برای این موانع و استراتژی‌هایی را در زمینه‌های مختلف با استفاده از روش‌های دیگر MCDM جهت اولویت‌بندی این عوامل و راه‌حل‌ها پیشنهاد نمایند. روش‌هایی مانند AHP,ANP,BWM در جهت درک و اجرای زنجیره‌های تامین دایره‌ای پیشنهاد می‌شود.

منابع

Abdulai, S.F. et al. 2024. Modelling the relationship between circular economy barriers and drivers for sustainable construction industry. Building and Environment 111388. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111388.

Abid, N., Ceci, F. and Ikram, M. 2022. Green growth and sustainable development: dynamic linkage between technological innovation, ISO 14001, and environmental challenges. Environmental Science and Pollution Research 1-20. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17518-y.

Acerbi, F. and Taisch, M. 2020. A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector. Journal of Cleaner Production 273 123086. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123086.

Agarwal, S. et al. 2024. Prioritizing the barriers of green smart manufacturing using AHP in implementing Industry 4.0: a case from Indian automotive industry. The TQM Journal 36(1) 71-89. https://doi.org/10.1108/TQM-07-2022-0229.

Agrawal, P., Narain, R. and Ullah, I. 2019. Analysis of barriers in implementation of digital transformation of supply chain using interpretive structural modelling approach. Journal of Modelling in Management 15(1) 297-317. https://doi.org/10.1108/JM2-03-2019-0066.

Agyemang, M. et al. 2019a. Drivers and barriers to circular economy implementation: An explorative study in Pakistan's automobile industry. Management Decision. https://doi.org/10.1108/MD-11-2018-1178.

Agyemang, M. et al. 2019b. Drivers and barriers to circular economy implementation: An explorative study in Pakistan's automobile industry. Management Decision 57(4) 971-994. https://doi.org/10.1108/MD-11-2018-1178.

Alsuhaibany, Y. (2025). Digital Innovation and Circular Economy: A Nexus for Sustainable Oil and Gas Sector Transformation in Saudi Arabia. Sustainability, 17(3), 1325. https://doi.org/10.3390/su17031325.

Anufriev, I. E., Khusainov, B., Tick, A., Devezas, T., Sarygulov, A., & Kaimoldina, S. (2025). Mathematical Model for Assessing New, Non-Fossil Fuel Technological Products (Li-Ion Batteries and Electric Vehicle). Mathematics, 13(1), 143. https://doi.org/10.3390/math13010143.

Babalola, A. and Harinarain, N. 2024. Policy barriers to sustainable construction practice in the Nigerian construction industry: an exploratory factor analysis. Journal of Engineering, Design and Technology 22(1) 214-234. https://doi.org/10.1108/JEDT-07-2021-0375.

Bag, S., Yadav, G., Dhamija, P. and Kataria, K.K. 2021. Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: An empirical study. Journal of Cleaner Production 281 125233. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125233.

Bai, C., Orzes, G. and Sarkis, J. 2022. Exploring the impact of Industry 4.0 technologies on social sustainability through a circular economy approach. Industrial Marketing Management 101 176-190. https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.12.004.

Beducci, E., Acerbi, F., Pinzone, M. and Taisch, M. 2024. Unleashing the role of skills and job profiles in circular manufacturing. Journal of Cleaner Production 141456. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141456.

Blunck, E. and Werthmann, H. 2017. Industry 4.0–an opportunity to realize sustainable manufacturing and its potential for a circular economy. DIEM: Dubrovnik International Economic Meeting, Sveučilište u Dubrovniku.

Boons, F. and Lüdeke-Freund, F. 2013. Business models for sustainable innovation: state-of-the-art and steps towards a research agenda. Journal of Cleaner Production 45 9-19. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.007.

Bressanelli, G., Perona, M. and Saccani, N. 2019. Challenges in supply chain redesign for the Circular Economy: A literature review and a multiple case study. International Journal of Production Research 57(23) 7395-7422. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1542176.

Cesur, E., Cesur, M.R., Kayikci, Y. and Mangla, S.K. 2022. Optimal number of remanufacturing in a circular economy platform. International Journal of Logistics Research and Applications 25(4-5) 454-470. https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1825656.

Chauhan, C. and Singh, A. 2019. A review of Industry 4.0 in supply chain management studies. Journal of Manufacturing Technology Management 31(5) 863-886. https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2018-0105.

Chauhan, C., Singh, A. and Luthra, S. 2021. Barriers to industry 4.0 adoption and its performance implications: An empirical investigation of emerging economy. Journal of Cleaner Production 285 124809. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124809

Chu, W. and Yahya, S. 2024. Corporate Governance and Sustainable Circular Economy with Eco-Innovation as Mediator and Customers' Pressure as Moderator. International Journal of Advanced Research in Economics and Finance 6(1) 1-15.

De Jesus, A. and Mendonça, S. 2018. Lost in transition? Drivers and barriers in the eco-innovation road to the circular economy. Ecological economics 145 75-89. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.001.

de Oliveira Neto, G. and da Conceição Silva, A. 2022. How can Industry 4.0 technologies and circular economy help companies and researchers collaborate and accelerate the transition to strong sustainability? A bibliometric review and a systematic literature review. International Journal of Environmental Science and Technology 1-38. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04234-4.

de Sousa Jabbour, A.B.L., Jabbour, C.J.C., Foropon, C. and Godinho Filho, M. 2018. When titans meet–Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. Technological Forecasting and Social Change 132 18-25. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.017.

Del Giudice, M., Chierici, R., Mazzucchelli, A. and Fiano, F. 2020. Supply chain management in the era of circular economy: the moderating effect of big data. The International Journal of Logistics Management. https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2020-0119.

de Mattos Nascimento, D. L., de Oliveira-Dias, D., Moyano-Fuentes, J., Maqueira Marín, J. M., & Garza-Reyes, J. A. (2024). Interrelationships between circular economy and Industry 4.0: A research agenda for sustainable supply chains. Business Strategy and the Environment, 33(2), 575-596. https://doi.org/10.1002/bse.3502.

Didegah, Seyed Amirali and Sohrabi, Tahmourth. (2024). Presenting a model for the management of the development of emerging technologies based on the stabilization of supply chains in the agricultural industry. Technology Development Management, 11(4), 134-174.(in persian).

Garrido-Hidalgo, C., Ramirez, F.J., Olivares, T. and Roda-Sanchez, L. 2020. The adoption of internet of things in a circular supply chain framework for the recovery of WEEE: The case of lithium-ion electric vehicle battery packs. Waste Management 103 32-44. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.045.

Gatell, I.S. and Avella, L. 2024. Impact of Industry 4.0 and circular economy on lean culture and leadership: Assessing digital green lean as a new concept. European Research on Management and Business Economics 30(1) 100232. https://doi.org/10.1016/j.iedeen.2023.100232.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M. and Hultink, E.J. 2017. The Circular Economy–A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production 143 757-768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

Ghobakhloo, M. 2020. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. Journal of Cleaner Production 252 119869. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869.

Ghorbanpour, Ahmad, Jalal, Reza, Parsa, Hojjat and Hajiani, Parviz (2022). Discrete analysis of food industry clusters based on circular economy components. Economic Research (Sustainable Growth and Development) 22(1) 33-52.(In persian). https://ecor.modares.ac.ir/article_13507.html.

Gupta, H., Kumar, A. and Wasan, P. 2021. Industry 4.0, cleaner production and circular economy: An integrative framework for evaluating ethical and sustainable business performance of manufacturing organizations. Journal of Cleaner Production 295 126253. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126253.

Guzzo, D., Pigosso, D., Videira, N. and Mascarenhas, J. 2022. A system dynamics-based framework for examining Circular Economy transitions. Journal of Cleaner Production 333 129933. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129933.

Huang, Y.-F., Chen, A.P.-S., Do, M.-H. and Chung, J.-C. 2022. Assessing the barriers of green innovation implementation: Evidence from the Vietnamese manufacturing sector. Sustainability 14(8) 4662. https://doi.org/10.3390/su14084662.

Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M. and Giallanza, A. 2021. Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: a systematic review and future research directions. Applied Sciences 11(12) 5725. https://www.mdpi.com/2076-3417/11/12/5725#:~:text=(12)%2C%205725%3B-,https%3A//doi.org/10.3390/app11125725,-Submission%20received%3A%201.

Jia, F., Yin, S., Chen, L. and Chen, X. 2020. The circular economy in the textile and apparel industry: A systematic literature review. Journal of Cleaner Production 259 120728. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120728.

Jain, V. K., Singh, S., & Sharma, P. (2025). Circular Economy: Developing Framework for Circular Supply Chain Implementation for Energy Efficient Solution in Industry 4.0. Circular Economy and Sustainability, 1-32. https://doi.org/10.1007/s43615-025-00619-y.

Kamble, S.S., Gunasekaran, A. and Gawankar, S.A. 2018. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. Process safety and environmental protection 117 408-425. https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009.

Khanzode, A.G., Sarma, P. and Goswami, M. 2023. Modelling interactions of select enablers of Lean Six-Sigma considering sustainability implications: an integrated circular economy and Industry 4.0 perspective. Production Planning & Control 34(10) 1020-1036. https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1980908.

Kineber, A.F. et al. 2024. A multi-criteria evaluation and stationary analysis of value management implementation barriers for sustainable residential building projects. International Journal of Construction Management 24(2) 199-212. https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2267870.

Kouhizadeh, M., Saberi, S. and Sarkis, J. 2021. Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. International journal of production economics 231 107831. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107831.

Kumar, A., Mangla, S.K. and Kumar, P. 2022. Barriers for adoption of Industry 4.0 in sustainable food supply chain: a circular economy perspective. International Journal of Productivity and Performance Management. https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0695.

Kumar, A., Mangla, S.K. and Kumar, P. 2024. Barriers for adoption of Industry 4.0 in sustainable food supply chain: a circular economy perspective. International Journal of Productivity and Performance Management 73(2) 385-411. https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0695.

Kumar, P., Singh, R.K. and Kumar, V. 2021. Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. Resources, Conservation and Recycling 164 105215. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105215.

Kumar, R., Singh, R.K. and Dwivedi, Y.K. 2020. Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges. Journal of Cleaner Production 275 124063. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124063.

Kumar, S. et al. 2021. To identify industry 4.0 and circular economy adoption barriers in the agriculture supply chain by using ISM-ANP. Journal of Cleaner Production 293 126023. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126023.

Kusi-Sarpong, S. et al. 2021. Sustainable supplier selection based on industry 4.0 initiatives within the context of circular economy implementation in supply chain operations. Production Planning & Control 1-21. https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1980906.

Lopes de Sousa Jabbour, A.B., Frascareli, F.C.d.O., Santibanez Gonzalez, E.D. and Chiappetta Jabbour, C.J. 2021. Are food supply chains taking advantage of the circular economy? A research agenda on tackling food waste based on Industry 4.0 technologies. Production Planning & Control 1-17. https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1980903.

Lopes de Sousa Jabbour, A.B., Jabbour, C.J.C., Godinho Filho, M. and Roubaud, D. 2018. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. Annals of Operations Research 270(1) 273-286.

Lu, H., Zhao, G. and Liu, S. 2022. Integrating circular economy and Industry 4.0 for sustainable supply chain management: a dynamic capability view. Production Planning & Control 1-17. https://doi.org/10.1080/09537287.2022.2063198.

Luthra, S. et al. 2020. Industry 4.0 as an enabler of sustainability diffusion in supply chain: an analysis of influential strength of drivers in an emerging economy. International Journal of Production Research 58(5) 1505-1521. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1660828.

Mastos, T.D. et al. 2021. Introducing an application of an industry 4.0 solution for circular supply chain management. Journal of Cleaner Production 300 126886. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126886.

Mastos, T.D. et al. 2020. Industry 4.0 sustainable supply chains: An application of an IoT enabled scrap metal management solution. Journal of Cleaner Production 269 122377. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122377.

Matten, D. 1996. Enforcing sustainable development by legislation: entrepreneurial consequences of the new German Waste Management Act. Sustainable Development 4(3) 130-137. https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1719(199612)4:3<130::AID-SD49>3.0.CO;2-%23.

Mohammadi, Heidari Dehavi, and Ahmadi. (2024). Identifying and prioritizing applications of artificial intelligence in supply chain 4. 0 (case study of retail industry). Technology Development Management, 11(4), 78-106.(in persian).

Mohaghegh, M. and Größler, A. 2024. Leagile supply chains and sustainable business performance: application of total interpretive structural modelling. Production Planning & Control 1-23. https://doi.org/10.1080/09537287.2024.2344063.

Mohsenikabir, Z., Mousavi Kashi, Z., & Seyedi Hosseininia, S. S. (2024). Explaining the resilience model of small and medium businesses in Iran with the combined approach of ISM-FDEMATEL. Iranian journal of management sciences, 19(73), 57-98. https://journal.iams.ir/article_419_c573bb3d831112b63a9cfb08fcdd5333.pdf.

Moreno, M.M.M., Esquinas, E.M.B., Yñiguez, R. and Puig-Cabrera, M. 2024. Circular economy and agriculture: Mapping circular practices, drivers, and barriers for traditional table-olive groves. Sustainable Production and Consumption. https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.036.

Müller, J.M., Kiel, D. and Voigt, K.-I. 2018. What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. Sustainability 10(1) 247. https://doi.org/10.3390/su10010247.

Mura, M., Longo, M. and Zanni, S. 2020. Circular economy in Italian SMEs: A multi-method study. Journal of Cleaner Production 245 118821. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118821.

Nair, K., Bhardwaj, S., Chopra, R., Balasubramanian, S., & Mishra, M. (2025). Integrating policy, technology, and knowledge: a roadmap to circular manufacturing adoption. International Journal of Sustainable Engineering, 18(1), 1-11. https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2446754.

Nelles, M., Gruenes, J. and Morscheck, G. 2016. Waste management in Germany–development to a sustainable circular economy? Procedia Environmental Sciences 35 6-14. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.001.

Nikolaou, I.E., Jones, N. and Stefanakis, A. 2021. Circular economy and sustainability: the past, the present and the future directions. Circular Economy and Sustainability 1(1) 1-20. https://doi.org/10.1007/s43615-021-00054-9.

Nikolaou, I.E. and Stefanakis, A.I. 2022. A review of circular economy literature through a threefold level framework and engineering-management approach. Circular Economy and Sustainability 1-19. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819817-9.00001-6.

Okoli, C. and Pawlowski, S.D. 2004. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. Information & management 42(1) 15-29. https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002.

Rajput, S. and Singh, S.P. 2019. Connecting circular economy and industry 4.0. International Journal of Information Management 49 98-113. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.002.

Rajput, S. and Singh, S.P. 2022. Industry 4.0 model for integrated circular economy-reverse logistics network. International Journal of Logistics Research and Applications 25(4-5) 837-877. https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1926950.

Rejeb, A., Rejeb, K. and Zrelli, I. 2024. Analyzing Barriers to Internet of Things (IoT) Adoption in Humanitarian Logistics: An ISM–DEMATEL Approach. Logistics 8(2) 38. https://doi.org/10.3390/logistics8020038.

Rosa, P. et al. 2020. Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: A systematic literature review. International Journal of Production Research 58(6) 1662-1687. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896.

Rossi, E. et al. 2020. Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases. Journal of Cleaner Production 247 119137. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119137.

RÜBMANN, M. 2015. Future of Productivity and Growth in Manufacturing. Boston Consulting, n.

Sandin, G. and Peters, G.M. 2018. Environmental impact of textile reuse and recycling–A review. Journal of Cleaner Production 184 353-365. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266.

Satyro, W.C. et al. 2022. Industry 4.0 implementation: The relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country. Journal of Cleaner Production 337 130456. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130456.

Sauvé, S., Bernard, S. and Sloan, P. 2016. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. Environmental development 17 48-56. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002.

Sharma, M., Joshi, S. and Govindan, K. 2023a. Overcoming barriers to implement digital technologies to achieve sustainable production and consumption in the food sector: A circular economy perspective. Sustainable Production and Consumption. https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.04.002.

Sharma, M., Joshi, S. and Govindan, K. 2023b. Overcoming barriers to implement digital technologies to achieve sustainable production and consumption in the food sector: A circular economy perspective. Sustainable Production and Consumption 39 203-215. https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.04.002. https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.04.002.

Silva, T.H. and Sehnem, S. 2022. Industry 4.0 and the Circular Economy: Integration Opportunities Generated by Startups. Logistics 6(1) 14. https://doi.org/10.3390/logistics6010014.

Skulmoski, G.J., Hartman, F.T. and Krahn, J. 2007. The Delphi method for graduate research. Journal of Information Technology Education: Research 6(1) 1-21.

Suárez-Eiroa, B., Fernández, E., Méndez-Martínez, G. and Soto-Oñate, D. 2019. Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice. Journal of Cleaner Production 214 952-961. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.271.

Suleiman, Z. et al. 2022. Industry 4.0: Clustering of concepts and characteristics. Cogent Engineering 9(1) 2034264. Suleiman, Z. et al. 2022. Industry 4.0: Clustering of concepts and characteristics. Cogent Engineering 9(1) 2034264.

Sun, X. et al. 2021. The application of Industry 4.0 technologies in sustainable logistics: A systematic literature review (2012–2020) to explore future research opportunities. Environmental Science and Pollution Research 1-32. DOI https://doi.org/10.1007/s11356-021-17693-y

Taddei, E., Sassanelli, C., Rosa, P. and Terzi, S. 2024a. Circular supply chains theoretical gaps and practical barriers: A model to support approaching firms in the era of industry 4.0. Computers & Industrial Engineering 110049. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110049.

Taddei, E., Sassanelli, C., Rosa, P. and Terzi, S. 2024b. Circular supply chains theoretical gaps and practical barriers: A model to support approaching firms in the era of industry 4.0. Computers & Industrial Engineering 190 110049. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110049.

Trivedi, A., Jakhar, S.K. and Sinha, D. 2021. Analyzing barriers to inland waterways as a sustainable transportation mode in India: a dematel-ISM based approach. Journal of Cleaner Production 295 126301. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126301.

Tsolakis, N., Harrington, T.S. and Srai, J.S. 2021. Digital supply network design: a Circular Economy 4.0 decision-making system for real-world challenges. Production Planning & Control 1-26. https://doi.org/10.1080/09537287.2021.1980907.

Ullah, S. et al. 2021. Mapping interactions among green innovations barriers in manufacturing industry using hybrid methodology: insights from a developing country. International Journal of Environmental Research and Public Health 18(15) 7885. https://doi.org/10.3390/ijerph18157885.

Urbinati, A., Chiaroni, D. and Chiesa, V. 2017. Towards a new taxonomy of circular economy business models. Journal of Cleaner Production 168 487-498. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.047.

Verma, P. et al. 2022. Identifying and prioritizing impediments of industry 4.0 to sustainable digital manufacturing: A mixed method approach. Journal of Cleaner Production 356 131639. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131639.

Viles, E. et al. 2022. Theorizing the Principles of Sustainable Production in the context of Circular Economy and Industry 4.0. Sustainable Production and Consumption 33 1043-1058. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.024.

Warfield, J.N. 1974. Developing subsystem matrices in structural modeling. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics(1) 74-80. 10.1109/TSMC.1974.5408523.

Werning, J.P. and Spinler, S. 2020. Transition to circular economy on firm level: Barrier identification and prioritization along the value chain. Journal of Cleaner Production 245 118609. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118609.

Yadav, G. et al. 2020. A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: An automotive case. Journal of Cleaner Production 254 120112. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120112.