



## Analysis of Causal and Structural Relationships Among Factors Influencing the Development of Reverse Supply Chain in the Context of the Fourth Industrial Revolution Using an Integrated DEMATEL–ISM Approach

Hossein Sayyadi Tooranloo\* 

Associate Professor of Management Faculty, Meybod University, Meybod, Iran.

[h.sayyadi@meybod.ac.ir](mailto:h.sayyadi@meybod.ac.ir)

Zahra Abbasi Meybodi 

Master science of Management, Meybod University, Meybod, Iran

[stu.zahraabasi@meybod.ac.ir](mailto:stu.zahraabasi@meybod.ac.ir)

### ARTICLE INFO

**Article type:**

*Research Full Paper*

**Article history:**

*Received: 2025-10-06*

*Revised: 2025-10-23*

*Accepted: 2025-10-26*

**Keywords:**

*Reverse supply chain;*

*Industry 4.0;*

*DEMATEL;*

*ISM;*

*Ceramic and Tile*

*Industries.*

### EXTENDED ABSTRACT

**Background and Objectives:** In today's dynamic and competitive environment, global consumption has accelerated dramatically due to economic growth and the expansion of the middle class. This massive consumption, coupled with shorter product life cycles and advanced manufacturing technologies, has increased resource depletion and environmental degradation. These challenges have encouraged organizations to adopt sustainable supply chain strategies, among which reverse logistics plays a pivotal role in recovering value from returned products, minimizing waste, and supporting environmental goals. However, traditional reverse logistics systems are no longer sufficient to meet the demands of modern, technology-driven supply chains. The advent of Industry 4.0, incorporating technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), cyber-physical systems, and big data analytics, has created new opportunities for redesigning and optimizing reverse logistics processes. This study aimed to identify and analyze the factors influencing the development of reverse supply chains within the context of Industry 4.0, focusing on the ceramic tile industry in Iran—an environmentally sensitive and resource-intensive sector with high potential for digital transformation.

**Materials and Methods:** The research was applied in purpose and descriptive-survey in nature. Data were collected through both library research and field studies. Expert opinions were gathered from 13 professionals and senior managers with at least five years of experience in reverse logistics and digital supply chain projects. Data analysis was conducted in two stages:

- The DEMATEL method was applied to examine the cause-and-effect relationships and determine the degree of influence and dependence among factors.

\* Corresponding author.

E-mail address: [h.sayyadi@meybod.ac.ir](mailto:h.sayyadi@meybod.ac.ir)

<https://orcid.org/0000-0001-9418-8187>

---

-Interpretive Structural Modeling (ISM) was then used to structure and rank these factors hierarchically, clarifying their interconnections and roles in reverse supply chain development.

**Results:** The analysis identified 38 key factors influencing reverse logistics implementation, categorized into nine dimensions: managerial, legal, economic, technological, environmental, organizational, infrastructural, human resource, and market-related factors. DEMATEL results indicated that managerial, legal, and economic factors exert the strongest influence, while environmental and organizational factors showed high dependence. The ISM hierarchy revealed the multi-level structure of interactions among these variables, highlighting management as the foundation for successful reverse supply chain implementation. The findings emphasize that integrating Industry 4.0 technologies such as IoT, AI, and data analytics significantly enhances operational efficiency, resource utilization, and environmental performance.

**Conclusion:** This study provides a structured framework for developing efficient and sustainable reverse supply chains in the Industry 4.0 era. Strengthening managerial leadership, improving regulatory frameworks, and investing in digital technologies can accelerate the transformation of traditional logistics systems into intelligent, sustainable networks. Effective implementation of reverse supply chains enables organizations to reduce waste, optimize resources, and achieve competitive and environmental advantages. Ultimately, the integration of advanced technologies supports not only economic performance but also the broader goals of sustainable development and long-term industrial resilience.

---

**Cite this article as:**

Sayyadi Tooranloo, H. & Abbasi Meybodi, Z. (2025). Analysis of Causal and Structural Relationships among Factors Influencing the Development of Reverse Supply Chain in the Context of the Fourth Industrial Revolution Using an Integrated DEMATEL–ISM Approach. *Journal of Strategic Value Chain Management*. 2(7), 25-53.



DOI: <https://doi.org/10.22075/svcm.2025.39280.1059>

---

© 2024 authors retain the copyright and full publishing rights. Journal of Strategic Value Chain Management Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY-4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

---



## تحلیل روابط علی و ساختاری عوامل مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین معکوس در بستر انقلاب صنعتی چهارم با رویکرد ترکیبی DEMATEL-ISM

حسین صیادی تورانلو\*

دانشیار مدیریت، گروه مدیریت، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران.

[h.sayyadi@Meybod.ac.ir](mailto:h.sayyadi@Meybod.ac.ir)

زهرا عباسی میبدی

کارشناسی ارشد مدیریت عملکرد، گروه مدیریت، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران.

[stu.zahraabasi@meybod.ac.ir](mailto:stu.zahraabasi@meybod.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴-۰۷-۱۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴-۰۸-۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴-۰۸-۰۴</p> <p>واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین معکوس؛ صنعت ۴.۰؛ دیمتل؛ مدل‌سازی ساختاری- تفسیری؛ صنایع کاشی و سرامیک.</p>	<p>سابقه و هدف: افزایش رقابت در بازارهای جهانی و فشارهای فزاینده ناشی از الزامات زیست‌محیطی، سازمان‌ها را به سمت بازنگری در ساختار و کارکرد زنجیره‌های تأمین خود سوق داده است. در این میان، لجستیک معکوس به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی مدیریت پایدار، نقشی اساسی در کاهش ضایعات، بازیافت منابع و ارتقای بهره‌وری ایفا می‌کند. ظهور صنعت ۴.۰ با فناوری‌هایی همچون اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، کلان‌داده و تولید هوشمند، زمینه‌ای تازه برای بازآفرینی فرآیندهای زنجیره تأمین فراهم آورده و ظرفیت‌های قابل توجهی را برای بهبود عملکرد لجستیک معکوس در صنایع مختلف ایجاد کرده است. صنعت کاشی و سرامیک به‌دلیل ماهیت تولیدی، میزان بالای مصرف انرژی و تولید پسماند، یکی از صنایع کلیدی در تحقق اهداف توسعه پایدار به شمار می‌رود. از این رو، شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر زنجیره تأمین معکوس در این صنعت می‌تواند به طراحی سیاست‌های مدیریتی و فناورانه مؤثر منجر شود. هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی و تحلیل روابط متقابل میان عوامل مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین معکوس در صنایع کاشی و سرامیک در عصر صنعت ۴.۰ است.</p> <p>روش: پژوهش حاضر از نوع کاربردی و با رویکرد توصیفی-پیمایشی انجام شده است. داده‌های پژوهش از طریق ترکیب مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی گردآوری شد و برای اعتبارسنجی داده‌ها از نظرات خبرگان صنعت استفاده گردید. جامعه آماری شامل مدیران و کارشناسان ارشد صنایع کاشی و سرامیک شهرستان میبد بود. از میان آنان، ۲۰ نفر به‌صورت هدفمند انتخاب شدند و ۱۳ پرسشنامه معتبر بازگردانده شد. برای تحلیل روابط میان عوامل، ابتدا از روش دیمتل (DEMATEL) جهت تعیین روابط علی و شدت تأثیرگذاری متقابل میان متغیرها استفاده شد. سپس، با بهره‌گیری از مدل‌سازی</p>

ساختاری-تفسیری (ISM)، عوامل شناسایی شده در سطوح مختلف سلسله‌مراتبی طبقه‌بندی گردیدند تا ساختار مفهومی زنجیره تأمین معکوس ترسیم شود.

**یافته‌ها:** نتایج پژوهش منجر به شناسایی ۳۸ عامل مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین معکوس شد که در ۹ بعد اصلی شامل مدیریت، زیرساخت، قوانین و مقررات، بازار، فناوری، محیط‌زیست، اقتصاد، سازمان و منابع انسانی دسته‌بندی شدند. تحلیل دیمتل نشان داد که بعد مدیریتی بیشترین تأثیرگذاری را بر سایر عوامل دارد و نقش محوری در هدایت فرآیند پیاده‌سازی زنجیره تأمین معکوس ایفا می‌کند. در مقابل، ابعاد محیط‌زیست و منابع انسانی به‌عنوان متغیرهای وابسته‌تر شناسایی شدند که تحت تأثیر تصمیمات مدیریتی و زیرساختی قرار می‌گیرند. نتایج مدل ISM نیز سطوح مختلف تأثیرگذاری را به‌صورت سلسله‌مراتبی مشخص کرد و ساختار شبکه‌ای پایداری از روابط میان عوامل ارائه داد.

**نتیجه‌گیری:** یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که تمرکز بر بهبود کیفیت مدیریت، توسعه زیرساخت‌های فناورانه و تقویت قوانین حمایتی می‌تواند زمینه‌ساز استقرار مؤثر زنجیره تأمین معکوس در صنعت کاشی و سرامیک باشد. همچنین، بهره‌گیری از فناوری‌های صنعت ۴.۰ از طریق هوشمندسازی فرآیندها و تحلیل داده‌های تولید، نقش بسزایی در کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی مصرف منابع دارد. بر این اساس، پیاده‌سازی جامع زنجیره تأمین معکوس نه تنها به ارتقای عملکرد اقتصادی صنایع کمک می‌کند، بلکه گامی مؤثر در مسیر تحقق اهداف توسعه پایدار و حرکت به‌سوی صنعت سبز محسوب می‌شود.

**استناد:** صیادی تورانلو، حسین و عباسی مبدی، زهرا. (۱۴۰۴). تحلیل روابط علی و ساختاری عوامل مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین معکوس در بستر انقلاب صنعتی چهارم با رویکرد ترکیبی DEMATEL-ISM. *مجله مدیریت زنجیره ارزش راهبردی*، ۲ (۷)، ۲۵-۵۳.



DOI: <https://doi.org/10.22075/svcm.2025.39280.1059>

ناشر: دانشگاه سمنان

## ۱. مقدمه

در محیط پرتلاطم و غیرقابل پیش‌بینی امروز، توسعه اقتصادی و رشد طبقه متوسط جامعه موجب افزایش بی‌سابقه مصرف‌گرایی در سراسر جهان شده است (ما<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). مصرف انبوه و چرخه‌های کوتاه تولید محصولات، همراه با گسترش فناوری‌های نوین تولید، سبب رشد فزاینده تولیدات در سطح جهانی گردیده و این امر استفاده بیش از حد از منابع خام و فضاهای دفن ضایعات را در پی داشته است (لی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۴). افزایش حجم محصولات مصرفی و انباشت پسماندهای صنعتی آثار زیان‌باری بر محیط‌زیست بر جای گذاشته است (عمادی<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۴۰۳). در چنین شرایطی، مدیران سازمان‌ها برای ارتقای بهره‌وری، کاهش ضایعات و بهبود عملکرد، به دنبال راهکارهایی برای توسعه همکاری‌های بین‌سازمانی هستند. در این میان، زنجیره تأمین به عنوان یکی از ارکان اساسی این تعاملات، نقشی مهم در تحقق اهداف پایداری و رقابت‌پذیری ایفا می‌کند (رضایی مقدم و دوستی، ۱۴۰۱). یکی از چالش‌های اصلی در طراحی و مدیریت زنجیره تأمین، توجه به ضایعات و محصولات برگشتی است. این موضوع زمینه‌ساز شکل‌گیری نگرش‌ها و پارادایم‌های نوینی مانند لجستیک معکوس شده است (کالاشی<sup>۴</sup>، ۱۴۰۴). لجستیک معکوس با هدف بازیابی ارزش از محصولات برگشتی و استفاده‌شده، جایگاه ویژه‌ای در ساختار زنجیره تأمین یافته و به عنوان عنصری کلیدی در بهبود عملکرد سازمانی شناخته می‌شود (ملک‌پور و باقری‌نژاد، ۱۴۰۲). الزامات قانونی، نگرانی‌های زیست‌محیطی، مسئولیت‌های اجتماعی و آگاهی مصرف‌کنندگان، سازمان‌ها را به سمت طراحی فرآیندهای سازگار با محیط‌زیست و جمع‌آوری محصولات مصرف‌شده سوق داده‌اند (موتا و پوخارل<sup>۵</sup>، ۲۰۰۹). با این وجود، لجستیک معکوس سنتی دیگر پاسخگوی پیچیدگی‌ها و نیازهای زنجیره تأمین‌های مدرن نیست (کریستیک<sup>۶</sup>، ۲۰۲۰) و ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین بیش از پیش احساس می‌شود. در این میان، انقلاب صنعتی چهارم<sup>۷</sup> فرصت‌های تازه‌ای را برای بازطراحی زنجیره‌های تأمین فراهم کرده است. فناوری‌های دیجیتال نظیر اینترنت اشیا، سیستم‌های سایبری-فیزیکی و محاسبات ابری، توان بازسازی و هوشمندسازی فعالیت‌های لجستیک معکوس را دارند (پورمهدی، ۲۰۲۲). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ادغام فناوری‌های صنعت ۴.۰ موجب افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و ارتقای پایداری زنجیره تأمین می‌شود (رهبری‌پور<sup>۸</sup>، ۱۴۰۴). این فناوری‌ها با ایجاد زیرساخت‌هایی برای تبادل داده، نظارت لحظه‌ای و تحلیل هوشمند، می‌توانند ردپای کربن را کاهش داده و آلاینده‌های زیست‌محیطی را کنترل کنند (امجد<sup>۹</sup>، ۲۰۲۱؛ بدیع‌زاده، ۲۰۱۸). با وجود مطالعات گسترده در زمینه دیجیتالی‌سازی زنجیره‌های تأمین، بخش زیادی از تحقیقات پیشین بر پیامدهای کلی فناوری‌های نوین تمرکز داشته‌اند و کمتر به بررسی عوامل عملیاتی و مدیریتی مؤثر بر توسعه لجستیک معکوس در بستر صنعت ۴.۰ پرداخته‌اند. این در حالی است که صنایع تولیدی مانند صنعت کاشی و سرامیک، به دلیل مصرف بالای منابع طبیعی و تولید حجم زیاد ضایعات، بیش از سایر بخش‌ها به بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند برای افزایش بهره‌وری و پایداری نیاز دارند. به کارگیری فناوری‌های صنعت ۴.۰ می‌تواند این صنعت را در مسیر توسعه پایدار، بهبود ساختار تولید و حرکت به سمت سیستم‌های هوشمند مبتنی بر تعاملات سایبری-فیزیکی یاری کند (هدایاتو، ۲۰۱۹؛ بهرامی، ۱۴۰۴). در چنین شرایطی، پژوهش حاضر با تمرکز بر صنایع کاشی و سرامیک کشور، به دنبال شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر توسعه لجستیک معکوس در بستر

<sup>1</sup> Ma

<sup>2</sup> Lee

<sup>3</sup> Emadi

<sup>4</sup> Kalashi

<sup>5</sup> Mutha & Pokharel

<sup>6</sup> Krstić

<sup>7</sup> Industry 4.0

<sup>8</sup> Rahbaripour

<sup>9</sup> Amjad

صنعت ۴۰ است. این مطالعه می‌کوشد تا با بهره‌گیری از دیدگاه‌های نوین در حوزه فناوری‌های هوشمند و پایداری، چارچوبی تحلیلی ارائه دهد که بتواند مسیر بهبود عملکرد، افزایش بهره‌وری و ارتقای شاخص‌های زیست‌محیطی را در زنجیره تأمین این صنعت روشن سازد.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

### ۱.۲. لجستیک معکوس

لجستیک معکوس یکی از مفاهیم نوین در مدیریت زنجیره تأمین است که به فرآیند حرکت کالا، مواد و اطلاعات از مصرف‌کننده به سمت تولیدکننده اشاره دارد. این مفهوم بر خلاف لجستیک مستقیم، جریان فیزیکی و اطلاعاتی را از نقطه مصرف به نقطه مبدأ هدایت می‌کند و هدف آن بازیابی ارزش، استفاده مجدد از منابع و دفع بهینه محصولات غیرقابل استفاده است (برنون<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱؛ شفیع‌پور، ۱۴۰۴). راجرز و تین<sup>۲</sup> (۱۹۹۸) لجستیک معکوس را به‌عنوان فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل کارآمد و مقرون‌به‌صرفه جریان مواد خام، کالاهای در جریان ساخت، محصولات نهایی و اطلاعات مرتبط از محل مصرف به محل مبدأ تعریف کرده‌اند، به‌گونه‌ای که موجب بازیابی ارزش یا دفع مناسب محصولات گردد. بر این اساس، لجستیک معکوس نه تنها بر مدیریت کالاهای برگشتی تمرکز دارد، بلکه بخشی از یک سیستم جامع برای بهینه‌سازی چرخه عمر محصولات و ارتقای پایداری محیطی و اقتصادی محسوب می‌شود (رضایی مقدم و دوستی، ۱۴۰۱). در تعریف کاربردی‌تر، لجستیک معکوس شامل مجموعه‌ای از فعالیت‌هاست که هدف آن مدیریت مؤثر کالاهای برگشتی از بازار مصرف یا توزیع است؛ این فعالیت‌ها شامل جمع‌آوری، بازرسی، طبقه‌بندی، تعمیر، بازسازی، بازیافت و در نهایت دفع یا فروش مجدد می‌باشد (کاوایی، ۲۰۲۰). انتخاب روش‌های مناسب برای انجام این فعالیت‌ها بستگی به نوع کالا، میزان بازگشت، هزینه‌های عملیاتی، ارزش اقتصادی و الزامات قانونی و زیست‌محیطی دارد.

در ساختار زنجیره تأمین معکوس، می‌توان مراحل اصلی را به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

### جدول ۱. مراحل مختلف زنجیره تأمین معکوس

مراحل زنجیره تأمین معکوس
ساخت مجدد، بازیافت مجدد، مصرف مجدد به طور مستقیم، برگشت به برون‌سپاری لجستیک، فشرده‌سازی یا تراکم‌سازی، پردازش/پیاده‌سازی، نگهداری، جداسازی و واریسی، جمع‌آوری
حذف نهایی، سوزاندن، دفع، پردازش مجدد: تعمیر، نوسازی مجدد، زنجیره تأمین، فروش مجدد، استفاده مجدد، جمع‌آوری، بازرسی، انتخاب، طبقه‌بندی
دفع، بازیافت، انبار، استفاده مجدد
بازیافت، قطعه برداری، تولید مجدد، نوسازی، تعمیر

لجستیک معکوس علاوه بر ابعاد عملیاتی، جنبه‌ای راهبردی و رقابتی نیز دارد؛ به این معنا که اجرای موفق آن می‌تواند موجب کاهش هزینه‌ها، افزایش سودآوری، بهبود تصویر برند، رعایت مقررات زیست‌محیطی و ارتقای رضایت مشتریان گردد (کریستیک، ۲۰۲۰). از سوی دیگر، این رویکرد نقش مهمی در تحقق اهداف توسعه پایدار و مسئولیت اجتماعی سازمان‌ها ایفا می‌کند. به طور کلی، لجستیک معکوس پلی میان کارایی اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی است و از یک فعالیت صرفاً عملیاتی به یک راهبرد کلیدی در مدیریت مدرن زنجیره تأمین تبدیل شده است؛ راهبردی که با بازنگری در جریان معکوس کالاها، سازمان‌ها را قادر می‌سازد تا ضمن کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی، ارزش نهفته در محصولات برگشتی را بازیابی کنند و به مزیت رقابتی پایدار دست یابند.

<sup>1</sup> Bernon

<sup>2</sup> Rogers & Tibben

## ۲.۲. انقلاب صنعتی چهارم (صنعت ۴.۰)

انقلاب صنعتی چهارم، معروف به صنعت ۴.۰، با ظهور فناوری‌های پیشرفته و نوآوری‌های بنیادین در محیط‌های تولید و کسب‌وکار مشخص می‌شود و یکپارچگی کامل بین عوامل تولید، اطلاعات و فناوری را ایجاد می‌کند (کمبل<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). این انقلاب، نسل چهارم تغییرات صنعتی پس از انقلاب‌های صنعتی اول تا سوم است (رکن‌الدینی و همکاران، ۱۴۰۲؛ کیانی و همکاران، ۱۴۰۲؛ قباخلو<sup>۲</sup>، ۲۰۲۰)؛

✓ انقلاب صنعتی اول: معرفی ماشین‌آلات به تولید در اواخر قرن ۱۸.

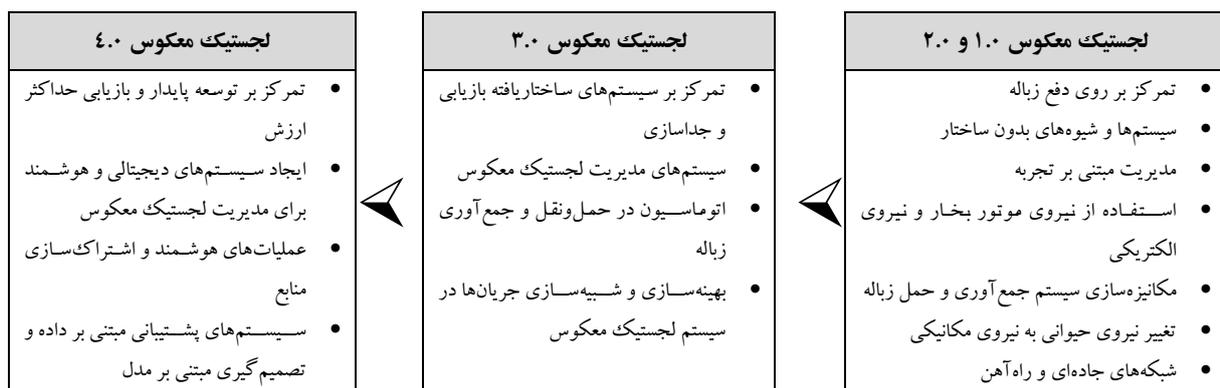
✓ انقلاب صنعتی دوم: تولید انبوه با بهره‌گیری از برق و خطوط تولید در قرن ۱۹.

✓ انقلاب صنعتی سوم (دیجیتال): استفاده از فناوری‌های دیجیتال و اتوماسیون تولید از دهه ۱۹۷۰

صنعت ۴.۰ با محیط‌های کسب‌وکار پیچیده و تغییرات سریع فناوری شکل گرفته است و توانایی سازمان‌ها در همگام شدن با این تغییرات را عامل موفقیت استراتژیک می‌داند. این انقلاب شامل مجموعه‌ای از فناوری‌هاست که اثرات آن فراتر از ماشین‌آلات هوشمند است و حیطه‌ای گسترده از نانو فناوری‌ها، منابع تجدیدپذیر تا محاسبات کوانتومی را در بر می‌گیرد. ویژگی‌های اصلی صنعت ۴.۰ شامل دیجیتالی‌سازی، بهینه‌سازی و سفارش‌سازی تولید، اتوماسیون و سازگاری، تعامل انسان و ماشین، تبادل خودکار داده‌ها و ارتباطات بهنگام است (بوت<sup>۳</sup>، ۲۰۲۱). فناوری‌های کلیدی صنعت ۴.۰ شامل سامانه‌های فیزیکی- سایبری، اینترنت اشیاء، ربات‌ها، محاسبات ابری، بلاکچین و کارخانه‌های هوشمند هستند. این فناوری‌ها بر فرآیندهای مختلف تولید و لجستیک اثرگذار بوده و موجب ارتقای بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی سازمان‌ها می‌شوند (رکن‌الدینی و همکاران، ۱۴۰۲؛ لوسیا<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۳). ادغام این فناوری‌ها و تعاملات آن‌ها در حوزه‌های فیزیکی، دیجیتال و زیستی، صنعت ۴.۰ را از انقلاب‌های پیشین متمایز می‌کند (حیدری هراتمه، ۱۴۰۳).

## ۳.۲. ارتباط لجستیک با صنعت ۴.۰

لجستیک امروز به یکی از عوامل اساسی موفقیت سازمان‌ها تبدیل شده و مدیریت بهینه آن، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد و بهره‌وری سازمان دارد (برکر<sup>۵</sup>، ۲۰۰۹). سیستم لجستیک در طول تاریخ، بر اساس چهار دوره مختلف توسعه یافته است و هر سطح، دارای ویژگی‌ها و فرآیندهای اختصاصی است که باید متناسب با همان دوره رشد کند (یان<sup>۶</sup>، ۲۰۲۲). این سطوح و مشخصه‌های هر نسل، در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱: تکامل سیستم لجستیک معکوس در چهار انقلاب صنعتی

<sup>1</sup> Kamble

<sup>2</sup> Ghobakhloo

<sup>3</sup> Butt

<sup>4</sup> Lucia

<sup>5</sup> Becker

<sup>6</sup> Yan

فناوری‌های نوین صنعت ۴.۰، مانند سیستم‌های فیزیکی- سایبری و اینترنت اشیا، امکان نظارت هم‌زمان و دقیق بر جریان مواد و اطلاعات را فراهم می‌کنند و تصمیم‌گیری و مدیریت فرآیندها را به شکل هوشمند بهینه می‌سازند. این فناوری‌ها باعث افزایش انعطاف‌پذیری، کاهش ضایعات و ارتقای عملکرد سازمانی می‌شوند (رحیمی و همکاران، ۲۰۲۳). ادغام لجستیک با فناوری‌های صنعت ۴.۰ منجر به شکل‌گیری لجستیک هوشمند و یکپارچه می‌شود. این یکپارچگی به سازمان‌ها امکان می‌دهد جریان کالاهای برگشتی و ضایعات تولیدی را بهینه مدیریت کنند و فرآیندهای عملیاتی خود را با نیازهای بازار و محیط زیست هماهنگ کنند. در نتیجه، بهره‌وری کل زنجیره تأمین افزایش یافته و انعطاف‌پذیری سازمان در مواجهه با تغییرات محیطی تقویت می‌شود. تجهیز لجستیک به فناوری‌های کلیدی صنعت ۴.۰، مانند سیستم‌های فیزیکی-سایبری و اینترنت اشیا، شرایطی فراهم می‌کند تا تصمیم‌گیری‌ها سریع‌تر و هماهنگی میان اجزای زنجیره تأمین دقیق‌تر انجام شود. این رویکرد، عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی سازمان را بهبود می‌بخشد و امکان دستیابی به مزیت رقابتی پایدار را فراهم می‌آورد (الوی و شانگ<sup>۱</sup>، ۲۰۲۳). به این ترتیب، اتصال مؤثر لجستیک و فناوری‌های صنعت ۴.۰، پایه‌ای برای ایجاد سیستم‌های لجستیکی هوشمند، انعطاف‌پذیر و پایدار فراهم می‌کند و سازمان‌ها را در مسیر افزایش بهره‌وری و توسعه پایدار هدایت می‌کند، به گونه‌ای که این ارتباط به عنوان یک عنصر استراتژیک در بهبود عملکرد زنجیره تأمین و مدیریت منابع عمل می‌نماید.

### ۳.۳. پیشینه پژوهش

مرور پژوهش‌های پیشین، امکان شناسایی دستاوردها، محدودیت‌ها و شکاف‌های موجود در ادبیات موضوع را فراهم می‌کند و زمینه علمی لازم برای انجام مطالعه حاضر را ایجاد می‌نماید. در این بخش، تحقیقات مرتبط با موضوع بررسی شده و مهم‌ترین یافته‌ها و روش‌های مورد استفاده آن‌ها ارائه می‌گردد تا چارچوبی برای تحلیل و مقایسه نتایج پژوهش حاضر فراهم شود.

ریحان و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی به بررسی عوامل محرک و موانع ادغام فناوری‌های انقلاب صنعتی چهارم در صنعت نساجی و پوشاک کشورهای تولیدکننده پرداختند. این مطالعه با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری‌های مدرن تولید انجام شد. در این پژوهش از ترکیب سه روش ISM، MICMAC و DEMATEL استفاده شد. نتایج ISM نشان داد که طرح‌های دولتی مهم‌ترین عامل محرک برای پذیرش فناوری‌های صنعت ۴.۰ است، در حالی که محدودیت‌های سازمانی، ناتوانی فنی کارآفرینان و نبود استانداردها و گواهی‌های فناوری مهم‌ترین موانع به شمار می‌آیند. تحلیل MICMAC عوامل محرک و موانع را در چهار خوشه مجزا دسته‌بندی کرد و تحلیل DEMATEL روابط علت و معلولی را مشخص نمود؛ بر این اساس توانمندی مدیریتی کارآفرینانه بیشترین تأثیر را به عنوان محرک داشته و محدودیت‌های سازمانی به عنوان مهم‌ترین مانع شناسایی شد.

نیرمال و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی به بررسی نقش فناوری‌های صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی شیوه‌های زنجیره تأمین پایدار پرداختند. این مطالعه با استفاده از مرور نظام‌مند ادبیات و تحلیل کتاب‌سنجی، عوامل موفقیت بحرانی در صنایع تولیدی هند را شناسایی کرد. روابط بین این عوامل با استفاده از مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM) و تحلیل MICMAC بررسی شد. نتایج نشان داد حمایت و سیاست‌های دولتی، اهداف و چشم‌انداز آینده‌نگر، حمایت و تعهد مدیریت ارشد و رقابت از مهم‌ترین عوامل موفقیت در پذیرش شیوه‌های زنجیره تأمین پایدار در عصر صنعت ۴.۰ هستند. همچنین، نیروی کار ماهر، مدیریت دانش و توانمندی‌های فناورانه موجب شکل‌گیری شایستگی‌های نوآورانه مانند اجرای بهتر شیوه‌های زنجیره تأمین پایدار، یکپارچگی زنجیره تأمین و کاهش ضایعات می‌شوند. این شایستگی‌ها به سازمان‌ها کمک می‌کنند تا سودآوری بالاتر، عملکرد پایدارتر و مزیت رقابتی مستمر در محیط‌های کسب و کار پویا به دست آورند.

<sup>1</sup> Lv & Shang

کیانی و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به شناسایی و تحلیل موانع پیاده‌سازی اقتصاد چرخه‌ای و صنعت ۴.۰ در زنجیره تأمین مجتمع شیشه یزد پرداختند. برای دسته‌بندی موانع از رویکرد متاسیتیزیس و برای تحلیل روابط و اولویت‌بندی آن‌ها از روش ترکیبی Fuzzy DEMATEL-ANP استفاده شد. یافته‌های پژوهش نشان داد ۲۴ مانع در پنج بعد شناسایی شد که موانع اقتصادی، زیرساختی و فنی-حقوقی به عنوان ابعاد علی، بر موانع منابع انسانی و مدیریت سازمانی تأثیرگذار بودند. همچنین مهم‌ترین موانع شامل کمبود تخصص و دانش کارکنان، ترس از بیکاری، مقاومت در برابر تغییرات سازمانی و محدودیت منابع مالی برای آموزش و پژوهش بود. این پژوهش تأکید دارد که برای موفقیت اجرای اقتصاد چرخه‌ای و صنعت ۴.۰ در صنایع آلاینده، توجه همزمان به ابعاد اقتصادی، زیرساختی و فنی-حقوقی و توانمندسازی کارکنان ضروری است.

کیانی و همکاران (۲۰۲۳) به شناسایی و تحلیل چالش‌های پیاده‌سازی فناوری‌های صنعت ۴.۰ در صنعت شیشه ایران پرداختند. در این پژوهش، ۲۳ چالش در شش بعد شناسایی شد و با استفاده از Fuzzy DEMATEL-ANP و نظر ۱۰ متخصص، روابط علی و اولویت‌بندی آن‌ها مشخص گردید. یافته‌ها نشان داد چالش‌های مالی مهم‌ترین عوامل علی و چالش‌های سازمانی-مدیریتی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار هستند و چالش‌های انسانی و فرهنگی بیشترین تعامل را با سایر چالش‌ها دارند. همچنین، مسائل امنیت سایبری، نبود چارچوب قانونی و استانداردهای دیجیتال و محدودیت منابع مالی برای آموزش و پژوهش از مهم‌ترین موانع اجرای فناوری‌های صنعت ۴.۰ در صنایع آلاینده مانند صنعت شیشه شناخته شدند.

کریستیک و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود به بررسی نقش فناوری‌های نوین صنعت ۴.۰ در بهبود کارایی لجستیک معکوس پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال، به‌ویژه اینترنت اشیا و محاسبات ابری، می‌تواند به‌طور چشمگیری موجب ارتقای شفافیت، ردیابی لحظه‌ای و هماهنگی بین اجزای مختلف زنجیره تأمین معکوس شود. این فناوری‌ها با ایجاد ارتباط هوشمند میان تجهیزات، سیستم‌های تولید و شبکه‌های حمل‌ونقل، فرآیندهای جمع‌آوری، جداسازی، بازیافت و بازتولید را تسهیل می‌کنند و در نتیجه، زمان پاسخ‌گویی و هزینه‌های لجستیکی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند.

محمودآبادی و عابدی (۱۴۰۰) در پژوهشی که در شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر انجام دادند به شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زنجیره تأمین معکوس پسماندهای فاضلاب صنعتی پرداختند که نتایج حاصل نشان داد که عوامل مؤثر بر زنجیره تأمین لجستیک معکوس پسماند فاضلاب صنعتی شامل ۷ مضمون کلی می‌باشد؛ تعهد مدیریت، محیط زیست، هزینه، انعطاف‌پذیری، قوانین و مقررات، اجتماعی و مدیریت کیفیت جامع می‌باشد. با استفاده از تکنیک دیمتل مشخص گردید تعهد مدیریت تأثیرگذارترین عامل بر دیگر عوامل می‌باشد و محیط زیست تأثیرپذیرترین عامل بر دیگر عوامل می‌باشد که خود نشان‌دهنده تأثیر عوامل دیگر بر این عامل می‌باشد.

با توجه به مرور پژوهش‌های پیشین، می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه تاکنون مطالعات متعددی به بررسی نقش فناوری‌های صنعت ۴.۰ در بهبود زنجیره تأمین و لجستیک معکوس پرداخته‌اند، اما بیشتر این تحقیقات یا بر صنایع خاص و پیشرفته متمرکز بوده‌اند، یا تنها به شناسایی عوامل محدود بدون تحلیل روابط میان آن‌ها بسنده کرده‌اند. همچنین، در ادبیات موجود، الگوی جامعی که تعامل و اثرگذاری متقابل عوامل مدیریتی، فناورانه، اقتصادی، قانونی، سازمانی و زیست‌محیطی را در چارچوب صنعت ۴.۰ و در بستر صنایع سنتی‌تر مانند کاشی و سرامیک تبیین کند، مشاهده نمی‌شود. از این رو، پژوهش حاضر با هدف پرکردن این شکاف دانشی و ارائه مدلی ساختاری برای تبیین روابط علی و سطح‌بندی عوامل کلیدی مؤثر بر زنجیره تأمین معکوس در صنعت کاشی و سرامیک در عصر صنعت ۴.۰ انجام شده است. این تحقیق می‌کوشد با بهره‌گیری از رویکردهای تحلیلی و مدل‌سازی چندسطحی، تصویری نظام‌مند از سازوکار تأثیر فناوری‌های نوین بر پایداری

و کارایی زنجیره تأمین معکوس ارائه دهد و بدین ترتیب، زمینه تصمیم‌گیری آگاهانه مدیران صنعتی و سیاست‌گذاران را فراهم سازد.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر در بستر انقلاب صنعتی چهارم با هدف شناسایی و تحلیل روابط علی و ساختاری عوامل مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین معکوس در استان یزد، شهرستان میبد انجام شد. شهرستان میبد به دلیل تمرکز بالای صنایع کاشی و سرامیک و وجود تعداد قابل توجهی کارخانه فعال در این حوزه به عنوان نمونه پژوهش انتخاب شد. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش گردآوری داده‌ها، توصیفی-پیمایشی است. داده‌ها از دو منبع کتابخانه‌ای و میدانی گردآوری شدند؛ ابتدا با مرور ادبیات نظری و مطالعات پیشین، مجموعه‌ای از شاخص‌های مؤثر شناسایی شد و سپس از طریق نظرسنجی و مصاحبه با خبرگان، شاخص‌های نهایی تأیید و تحلیل شدند.

#### ۱.۳. جامعه آماری و روش نمونه‌گیری پژوهش

جامعه آماری شامل خبرگان و متخصصان فعال در صنعت کاشی و سرامیک شهرستان میبد، استان یزد بود که دارای دانش و تجربه تخصصی در زمینه‌های مدیریت زنجیره تأمین، لجستیک معکوس، فناوری‌های دیجیتال مرتبط با صنعت ۴.۰ و پایداری محیط‌زیست بودند. روش نمونه‌گیری در این پژوهش به صورت هدفمند و با استفاده از روش گلوله‌برفی انجام شد. در ابتدا فهرستی از متخصصان واجد شرایط با استفاده از اطلاعات انجمن صنفی تولیدکنندگان کاشی و سرامیک تهیه شد. سپس از طریق معرفی متقابل میان خبرگان، شبکه‌ای از افراد واجد شرایط شکل گرفت. مصاحبه‌ها تا زمان اشباع نظری داده‌ها ادامه یافت و در نهایت ۱۳ نفر به عنوان نمونه نهایی انتخاب شدند.

به منظور تضمین صلاحیت علمی و تجربی خبرگان، معیارهای انتخاب آنان به شرح زیر تعیین شد:

- ✓ حداقل پنج سال سابقه فعالیت حرفه‌ای در صنعت کاشی و سرامیک یا صنایع تولیدی مشابه.
  - ✓ مشارکت در حداقل یک پروژه اجرایی یا پژوهشی مرتبط با لجستیک معکوس یا هوشمندسازی زنجیره تأمین مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال.
  - ✓ دارا بودن مدرک تحصیلی کارشناسی ارشد یا بالاتر در رشته‌های مدیریت صنعتی، مهندسی صنایع، مدیریت فناوری، یا فناوری اطلاعات.
  - ✓ آشنایی کافی با مفاهیم انقلاب صنعتی چهارم و فناوری‌های نوین نظیر اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، و سیستم‌های سایبر-فیزیکی.
  - ✓ تمایل به مشارکت فعال در مصاحبه‌ها و ارزیابی روابط علی و ساختاری مدل ISM-DEMATEL.
- ویژگی‌های جمعیت‌شناختی خبرگان شامل جنسیت، محدوده سنی، سابقه خدمت، سطح تحصیلات و تجربه مرتبط با صنعت ۴.۰ یا لجستیک معکوس ثبت و جمع‌بندی شد. نتایج در جدول (۱) ارائه شده است.

## جدول ۱. مشخصات جمعیت‌شناختی خبرگان

ردیف	جنسیت	سن	سابقه خدمت	مدرک تحصیلی	حوزه تخصصی
۱	مرد	۴۵	۱۶	کارشناسی ارشد مدیریت صنایع	مدیریت تولید و عملیات
۲	مرد	۴۲	۱۴	دکتری مدیریت صنعتی	زنجیره تأمین
۳	مرد	۴۸	۱۸	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع	مدیریت تولید و عملیات
۴	زن	۵۴	۲۱	کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی	زنجیره تأمین
۵	مرد	۴۱	۱۱	دکتری فناوری اطلاعات	تولید هوشمند
۶	مرد	۴۴	۱۲	دکتری مدیریت صنعتی	کنترل کیفیت
۷	زن	۳۹	۸	دکتری مهندسی صنایع	مدیریت تولید و عملیات
۸	زن	۳۷	۹	کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی	زنجیره تأمین
۹	مرد	۴۹	۱۳	کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی	زنجیره تأمین
۱۰	مرد	۵۵	۲۳	دکتری مهندسی صنایع	کنترل کیفیت
۱۱	مرد	۴۷	۱۷	دکتری فناوری اطلاعات	تولید هوشمند
۱۲	مرد	۴۷	۱۳	کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی	زنجیره تأمین
۱۳	مرد	۵۰	۱۹	دکتری مدیریت بازرگانی	زنجیره تأمین

در گام نخست تحلیل داده‌ها، از تکنیک دیمتل برای بررسی روابط علت و معلولی میان عوامل استفاده شد. این روش شدت اثرگذاری هر عامل بر دیگر عوامل را مشخص کرده و درک دقیقی از میزان نفوذ و تعامل آن‌ها ارائه می‌دهد. در ادامه، با طراحی و توزیع پرسشنامه میان خبرگان، میزان تأثیر و وابستگی عوامل ارزیابی شد. پس از تحلیل روابط متقابل با دیمتل و تعیین شدت نفوذ و وابستگی عوامل، در گام دوم از مدل‌سازی ساختاری-تفسیری برای سطح‌بندی عوامل و ایجاد یک ساختار سلسله‌مراتبی استفاده شد. این روش امکان مشاهده ارتباطات میان عوامل به صورت سلسله‌مراتبی و منسجم و تعیین نقش هر عامل در توسعه زنجیره تأمین معکوس را فراهم می‌کند. در نهایت، نتایج پژوهش در قالب نمودارهایی ارائه شده است که اهمیت هر عامل، میزان وابستگی متقابل و قدرت نفوذ آن‌ها بر توسعه زنجیره تأمین معکوس در صنعت کاشی و سرامیک را نمایش می‌دهد. روش پژوهش در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: روش انجام پژوهش

در این پژوهش، به منظور شناسایی عوامل مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین معکوس در دوران انقلاب صنعتی چهارم، ابتدا مرور جامعی بر ادبیات مرتبط با لجستیک معکوس و فناوری‌های صنعت ۴.۰ انجام شد. بر اساس این بررسی‌ها، ۳۹ عامل کلیدی به عنوان عوامل مؤثر شناسایی گردید که فهرست آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

**جدول ۲: عوامل کلیدی مؤثر بر زنجیره تأمین معکوس صنایع کاشی و سرامیک در صنعت ۴.۰**

منابع	مراحل زنجیره تأمین معکوس	تعریف عملیاتی	زیرشاخه‌ها	اختصار	مؤلفه‌های اصلی
vahidian & Davoodi, ) Rajabi et al., 2018 ؛Gozmeh, 2022؛ 2023 ؛Moktadir et al., 2020 Dehnad & M. Bagheri, Patil & Kant., 2014 (2014	برون‌سپاری لجستیک، فشرده‌سازی، پیاده‌سازی	میزان توجه و حمایت مدیران ارشد سازمان در تخصیص منابع، تصمیم‌گیری و پشتیبانی از اجرای لجستیک معکوس دیجیتال در فرآیندهای برون‌سپاری، فشرده‌سازی و پیاده‌سازی فرآیندهای زنجیره معکوس.	تعهد و حمایت مدیران ارشد در عصر صنعت ۴.۰	C1	عوامل مدیریتی
؛Moktadir et al., 2020) Dehnad & M. Bagheri, Patil & Kant., 2014 (2014	برون‌سپاری لجستیک، فشرده‌سازی، پردازش/ پیاده‌سازی	توانایی سازمان در تدوین و اجرای برنامه‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت برای هماهنگی فرآیندهای برون‌سپاری، فشرده‌سازی و پردازش/پیاده‌سازی لجستیک معکوس با الزامات صنعت ۴.۰.	برنامه‌ریزی استراتژیک لجستیک معکوس چابک در عصر صنعت ۴.۰		
vahidian & Davoodi, ) (2018	باز یافت، باز تولید، مصرف مجدد، کاهش حجم ضایعات	توانایی سازمان در شناسایی ارزش اقتصادی و محیط‌زیستی محصولات برگشتی یا منقضی شده و درک اهمیت باز یافت آن‌ها در فرآیند لجستیک معکوس.	درک باز یافت محصولات به عنوان کالاهای منقضی شده در عصر صنعت ۴.۰	C2	عوامل سازمانی
؛Patil & Kant., 2014) Ahmad, & Daghfous, (2010	جداسازی، باز یافت، مصرف مجدد	انعطاف و هماهنگی ساختار سازمانی در پاسخ به تغییرات و نیازهای لجستیک معکوس، به ویژه در جمع‌آوری، پردازش و باز یافت محصولات.	ساختارهای سازمانی چابک برای لجستیک معکوس در عصر صنعت ۴.۰		
Shokohyar & Akbari, ) ؛Yang et al., 2008؛ 2016 Mazroui Nasrabadi et al., 2024	باز تولید، باز یافت، تعمیر	ظرفیت سازمان برای باز تولید و پردازش مجدد محصولات برگشتی با بهره‌گیری از فناوری‌های اتوماسیون و رباتیک.	سیستم‌های تولید مجدد انعطاف‌پذیر با استفاده از رباتیک و اتوماسیون		
Prajapati, H., Kant, ) Rajabi et al., 2023 (2023	جمع‌آوری، بازرسی، انتخاب، طبقه‌بندی	شفافیت و سهولت فرآیند بازگرداندن محصولات برای مشتریان و سازمان، مطابق با الزامات صنعت ۴.۰.	سیاست‌های بازگشتی آسان و شفاف با صنعت ۴.۰		
(Yang et al., 2008)	باز یافت، استفاده مجدد، باز تولید	ظرفیت سازمان برای توسعه راهکارهای نوآورانه در لجستیک معکوس با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین.	توانایی نوآوری سازمان در لجستیک معکوس با استفاده از فناوری‌های صنعت ۴.۰		
vahidian & Davoodi, ) (2018	باز یافت، مصرف مجدد، کاهش حجم ضایعات	توانایی سازمان در بهبود کیفیت و ارزش اقتصادی مواد برگشتی از طریق فناوری‌های نوین.	ارتقا و اصلاح ارزش مواد باز یافتی با صنعت ۴.۰		

Prakash et al., 2015) Rahman & Subramanian, 2012 Abdulrahman et al., (2012	بازیافت، پردازش مجدد، انتخاب، جمع‌آوری	استفاده از سیستم‌های هوشمند برای مدیریت، ردیابی و بهینه‌سازی فرآیندهای بازگشت محصولات	سیستمی هوشمند بر بازگشت‌ها، بهینه‌سازی فرآیندها با صنعت ۴.۰		
vahidian & Davoodi, ) (2018	بازیافت، پردازش مجدد، جمع‌آوری	توانایی سازمان در ایجاد فرآیندهای استاندارد و هماهنگ برای لجستیک معکوس با بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال.	استانداردسازی هوشمند فرآیندهای لجستیک معکوس در صنعت ۴.۰		
Patil & Kant., 2014) Ahmad, & Daghfous, (2010	جمع‌آوری، بازرسی، انتخاب	توانایی سازمان در استفاده از سیستم‌های هوشمند برای ارزیابی مستمر عملکرد فرآیندهای لجستیک معکوس و بهینه‌سازی آن‌ها از طریق تحلیل داده‌ها و فناوری‌های دیجیتال صنعت ۴.۰.	سیستم ارزیابی هوشمند و بهینه‌سازی عملکرد با صنعت ۴.۰		
(Homaei et al., 2020)	برون‌سپاری لجستیک، بازیافت، مصرف مجدد	توانایی سازمان در گسترش و افزایش ظرفیت عملیات لجستیک معکوس به صورت هوشمند و مطابق با فناوری‌های صنعت ۴.۰، بدون کاهش کیفیت خدمات و با بهره‌وری بهینه منابع.	مقیاس‌بندی هوشمند و افزایش حجم فعالیت با صنعت ۴.۰		
vahidian & Davoodi, ) Yang et al., 2008; 2018 Abdulrahman et al., Papanagnou, 2012 Riaz et al., 2021; 2022 Liao, Kim et al., 2020 Chileshe et al., 2018 Alfonso-Lizarazo, 2015 (et al., 2013	بازیافت، پردازش مجدد، تعمیر	میزان منابع مالی اختصاص داده شده به فرآیندهای لجستیک معکوس و توانایی سازمان در مدیریت هوشمند این هزینه‌ها با بهره‌گیری از فناوری‌های صنعت ۴.۰.	هزینه‌های لجستیک معکوس (منابع مالی) و هوشمندسازی مدیریت آن	C3	عوامل اقتصادی
vahidian & Davoodi, ) Yang et al., 2008; 2018 Abdulrahman et al., Papanagnou, 2012 (2022	برون‌سپاری لجستیک، پردازش مجدد	توانایی سازمان در تخصیص منابع مالی به موقع و با دقت بالا برای فرآیندهای لجستیک معکوس، با استفاده از فناوری‌های هوشمند و سیستم‌های مدیریت مالی دیجیتال.	تخصیص بودجه سریع‌تر و دقیق‌تر با صنعت ۴.۰		
vahidian & Davoodi, ) Homaei et al., 2018 Rahman & 2020 (Subramanian, 2012	انبار، استفاده مجدد، بازتولید	توانایی سازمان در توسعه و بهبود زیرساخت‌های فیزیکی و دیجیتال برای پشتیبانی از لجستیک معکوس با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین صنعت ۴.۰.	زیرساخت‌های هوشمند و ارتقای آن با صنعت ۴.۰		
(Homaei et al., 2020)	انبار، استفاده مجدد، بازتولید	توانایی سازمان در مدیریت هوشمند موجودی محصولات برگشتی و مواد بازیافتی به گونه‌ای که هزینه و زمان نگهداری کاهش یابد و موجودی بهینه شود.	ذخیره‌سازی و بهینه‌سازی موجودی انبار با صنعت ۴.۰	C4	عوامل زیرساختی
(Homaei et al., 2020)	برون‌سپاری لجستیک، بازیافت، مصرف مجدد	توانایی سازمان در افزایش ظرفیت عملیات لجستیک معکوس به صورت هوشمند با فناوری‌های صنعت ۴.۰، بدون کاهش کیفیت و با بهره‌وری بهینه منابع.	مقیاس‌بندی هوشمند و افزایش حجم فعالیت با صنعت ۴.۰		

Rajabi et al., 2023) Rahman & Subramanian, 2012 (Liao, 2018	دفع، بازیافت، پردازش مجدد، جمع‌آوری	توانایی سازمان در مدیریت مواد زائد و پسماندها به گونه‌ای که با قوانین ملی و بین‌المللی سازگار باشد و از فناوری‌های صنعت ۴.۰ برای پایش و کنترل فرآیندها بهره‌گیرد.	مدیریت هوشمند مواد زائد: انطباق با قوانین و مقررات با صنعت ۴.۰	C5	عوامل قانونی
Rajabi et al., 2023) Rahman & Subramanian, 2012 Abdulrahman et al., (2012	بازیافت، بازتولید، مصرف مجدد	میزان تأثیر و استفاده سازمان از سیاست‌ها و مشوق‌های حمایتی دولت برای اجرای فرآیندهای لجستیک معکوس.	سیاست‌های حمایتی دولت در ارتباط با لجستیک معکوس		
vahidian & Davoodi, ) Abdulrahman et 2018 Papanagnou, al., 2012 (2022	بازیافت، مصرف مجدد، پردازش مجدد	نقش سیاست‌های دولت در تشویق سازمان‌ها به استفاده از فناوری‌های نوین برای دستیابی به لجستیک معکوس هوشمند و اهداف پایداری و اقتصاد دایره‌ای از طریق صنعت ۴.۰	سیاست‌های حمایتی دولت برای لجستیک معکوس هوشمند: ترویج پایداری و اقتصاد دایره‌ای از طریق صنعت ۴.۰		
vahidian & Davoodi, ) (2018	بازیافت، مصرف مجدد، پردازش مجدد	توانایی سازمان در تطبیق سیاست‌ها و فرآیندهای داخلی با فناوری‌های دیجیتال و نوین صنعت ۴.۰ در اجرای لجستیک معکوس.	هم‌راستایی سیاست‌ها و فرآیندها با فناوری‌های صنعت ۴.۰		
Patil & Kant., 2014) Ahmad, & Daghfous, (2010	بازیافت، انتخاب، طبقه‌بندی	توانایی سازمان در ارائه آموزش‌ها و برنامه‌های آگاهی‌رسانی برای کارکنان به منظور درک و اجرای صحیح لجستیک معکوس با بهره‌گیری از فناوری‌های صنعت ۴.۰.	آگاهی‌رسانی فراگیر و آموزش اثربخش مورد لجستیک معکوس در عصر صنعت ۴.۰	C6	عوامل مرتبط با منابع انسانی
Patil & Kant., 2014) Ahmad, & Daghfous, (2010	تعمیر، سرویس و نوسازی	ظرفیت سازمان برای ایجاد نیروی کار دیجیتال و انعطاف‌پذیر که قادر به کار با فناوری‌های نوین لجستیک معکوس باشد.	منابع انسانی ۴.۰ و تحول نیروی کار در عصر دیجیتال		
Yang et al., 2008) Rahman & (Subramanian, 2012	انتخاب، جمع‌آوری، بازتولید	توانایی واحدها و کارکنان در همکاری و هماهنگی برای اجرای فرآیندهای لجستیک معکوس در محیط دیجیتال و هوشمند.	هماهنگی و همکاری‌های موثر در عصر صنعت ۴.۰		
vahidian & Davoodi, ) (2018	بازیافت، مصرف مجدد	توانایی سازمان در افزایش سطح دانش کارکنان درباره فرآیندهای لجستیک معکوس و فناوری‌های نوین مرتبط با صنعت ۴.۰.	توسعه دانش مرتبط با لجستیک معکوس و صنعت ۴.۰		
vahidian & Davoodi, ) Alfonso-Lizarazo 2018 (et al., 2013	بازیافت، پردازش مجدد	سطح توانمندی و مهارت متخصصان در مدیریت فرآیندهای بازگشتی، بازیافت و بازتولید با بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال.	مهارت و توانمندسازی متخصصان لجستیک معکوس در عصر صنعت ۴.۰		
Dehnad & Bagheri, ) (2014	پردازش مجدد، انتخاب	حضور کارکنان و کارشناسان با دانش کافی در زمینه فناوری‌های هوشمند برای بهبود و مدیریت لجستیک معکوس.	وجود متخصصان در زمینه فرآیندهای لجستیک معکوس هوشمند		
Alfonso-Lizarazo et ) (al., 2013	بازیافت، استفاده مجدد، بازتولید	توانایی طراحی محصولات به گونه‌ای که امکان بازیافت و بازگرداندن آن‌ها به	پیوستگی مواد توسط طراحان		

		بازار ساده و اقتصادی باشد، با در نظر گرفتن نیازهای مشتری و الزامات بازار.			
Alfonso-Lizarazo et al., 2013	برگشت به زنجیره تأمین	میزان آگاهی و نگرش مثبت مشتریان نسبت به فرآیندهای بازگشت، بازیافت و خدمات لجستیک معکوس دیجیتال سازمان.	ادراک مشتریان نسبت به لجستیک معکوس در عصر صنعت ۴.۰	C7	عوامل مرتبط به بازار
Dehnd & Bagheri, Patil & Kant., 2014	انتخاب، بازیافت، جمع‌آوری	توانایی سازمان و مشتریان یا شرکا در شناسایی و هماهنگی روی بهترین روش‌ها و استانداردهای لجستیک معکوس.	درک مشترک از بهترین روش‌ها		
Dehnd & Bagheri, 2014	بازگشت به زنجیره تأمین	سطح نیاز و انتظار مشتریان برای خدمات لجستیک معکوس و بازگرداندن محصولات مطابق با الزامات صنعت ۴.۰.	تقاضای مشتریان		
vahidian & Davoodi, 2018	بازیافت، مصرف مجدد، فروش مجدد	توانایی سازمان در بازگرداندن، بازتولید یا بازیافت محصولات برگشتی به گونه‌ای که مجدداً قابل فروش یا استفاده باشند.	قابلیت قراردادن محصولات برگشتی در بازار		
vahidian & Davoodi, 2018; Rajabi et al., 2023 (Yang et al., 2008)	بازیافت، پردازش مجدد، انتخاب	میزان توانایی سازمان در دسترسی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و سیستم‌های اطلاعاتی برای مدیریت فرآیندهای لجستیک معکوس در عصر صنعت ۴.۰.	دسترس‌پذیری به فناوری‌ها و سیستم‌های اطلاعاتی مدرن	C8	عوامل فناورانه
Alfonso-Lizarazo et al., 2013	بازیافت، پردازش مجدد	توانایی سازمان در بهبود و توسعه فناوری‌ها و روش‌های بازیافت مواد برگشتی به منظور افزایش بهره‌وری و کاهش ضایعات.	توسعه فناوری‌های بازیافت مواد		
(Rajabi et al., 2023)	بازیافت، پردازش مجدد	توانایی سازمان در خودکارسازی فرآیندهای جمع‌آوری، بازگرداندن و پردازش محصولات با استفاده از فناوری‌های هوشمند و اتوماسیون.	مکانیزه‌سازی سیستم‌های رفت و برگشت در لجستیک معکوس با فناوری‌های هوشمند		
Patil & Kant., 2014; Ahmad, & Daghfous, 2010	بازیافت، دفع، کاهش حجم ضایعات	میزان شناخت و درک سازمان و کارکنان از تأثیر فعالیت‌های لجستیک معکوس و تولید بر محیط‌زیست.	آگاهی از اثرات زیست‌محیطی	C9	عوامل زیست‌محیطی
Rahman & Subramanian, 2012; Abdulrahman et al., 2012	بازیافت، دفع	میزان اهمیت‌دهی سازمان و ذی‌نفعان به مسائل زیست‌محیطی و توجه به پایش و گزارش‌دهی عملکرد محیط‌زیستی در لجستیک معکوس.	تمرکز عمومی بر روی مسائل زیست‌محیطی		
vahidian & Davoodi, 2018	بازیافت، پردازش مجدد	توانایی سازمان در ایجاد، پیاده‌سازی و نگهداری سیستم‌های مدیریت زیست‌محیطی برای بهینه‌سازی فرآیندهای لجستیک معکوس و کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست.	پیاده‌سازی سیستم مدیریت زیست‌محیطی		

## ۴. یافته‌های پژوهش

### ۴.۱. نتایج حاصل از روش دیمتل

روش دیمتل به عنوان یکی از رویکردهای جامع و مؤثر برای تحلیل سیستم‌های پیچیده و شناسایی روابط علی و معلولی میان عوامل مختلف شناخته می‌شود (لین و لین، ۲۰۰۸). این روش بر مبنای تئوری گراف، ساختاری شبکه‌ای و سلسله‌مراتبی ایجاد می‌کند که امکان تحلیل دقیق و شفاف تعاملات میان اجزا را فراهم می‌سازد و ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده ارائه می‌دهد. دیمتل با بهره‌گیری از نظرات خبرگان، به شناسایی و تحلیل روابط علت و معلولی میان معیارها کمک کرده و آن‌ها را در قالب متغیرهای علی و معلولی دسته‌بندی می‌کند (آکیوز و چیلاک، ۲۰۱۵). خروجی نهایی این فرآیند، نموداری بصری از روابط متقابل میان عوامل است که امکان اولویت‌بندی و تصمیم‌گیری علمی را برای محقق فراهم می‌سازد. در این پژوهش نیز، به منظور تحلیل و ارزیابی عوامل مؤثر بر پیاده‌سازی و توسعه صنعت ۴۰ در زنجیره تأمین معکوس، از ۹ معیار اصلی (C1 تا C9) استفاده شد که اسامی آن‌ها در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

جدول ۳. اسامی معیارها

شماره	عنوان	علامت اختصاری
۱	مدیریت	C1
۲	سازمان	C2
۳	اقتصاد	C3
۴	زیرساخت	C4
۵	قوانین	C5
۶	منابع انسانی	C6
۷	بازار	C7
۸	فناوری	C8
۹	زیست‌محیطی	C9

#### • گام اول: محاسبه ماتریس روابط مستقیم

برای شناسایی ارتباطات بین N معیار، از ماتریس روابط مستقیم (X) بهره‌برداری می‌شود. این ماتریس یک ماتریس مربعی به ابعاد  $N \times N$  است که در آن هر عنصر  $(i, j)$  نشان‌دهنده‌ی میزان تأثیر معیار i بر معیار j است. مقادیر این ماتریس توسط خبرگان با استفاده از عددی در بازه‌ی صفر تا ۴ تعیین می‌گردد. عدد صفر به معنای عدم تأثیر و عدد ۴ نشان‌دهنده بیشترین تأثیر است (جدول ۴). در صورتی که نظرات از چندین کارشناس جمع‌آوری شود، از میانگین ساده آن‌ها برای تعیین مقادیر ماتریس X استفاده خواهد شد. این ماتریس در جدول (۵) نمایش داده شده‌است.

جدول ۴: مقادیر عبارت کلامی

عدم تأثیر	تأثیر خیلی کم	تأثیر کم	تأثیر زیاد	تأثیر خیلی زیاد
۰	۱	۲	۳	۴

<sup>1</sup> Lin & Lin

<sup>2</sup> Akyuz & Çilak

جدول ۵: ماتریس روابط مستقیم

C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
۱/۱۵	۳/۴۶	۲/۹۲	۲/۰۸	۱/۱۵	۳/۶۹	۲/۰۸	۲/۹۲	۰	C1
۲/۱۵	۳/۳۱	۲/۳۸	۳/۶۲	۲/۲۳	۳/۲۳	۲/۷۷	۰	۲/۳۱	C2
۳/۲۳	۳/۶۲	۳/۷۷	۳/۲۳	۲/۹۲	۳/۲۳	۰	۲/۳۸	۳/۰۸	C3
۳/۰۸	۳/۷۷	۳/۷۷	۲/۹	۲/۳۸	۰	۲/۷۷	۲/۹۲	۳/۴۶	C4
۳/۵۴	۳/۱۵	۳/۰۸	۲/۳۱	۰	۲/۳۱	۲/۷۷	۲/۱۵	۱/۰۸	C5
۲/۴۶	۳/۸۵	۳/۰۸	۰	۲/۳۸	۳/۰۸	۲/۳۱	۲/۸۵	۲/۰۸	C6
۲/۳۱	۳/۸۵	۰	۳/۰۸	۲/۸۵	۳/۶۲	۳/۰۸	۲/۴۶	۲/۷۷	C7
۲/۶۹	۰	۳/۸۵	۳/۲۳	۲/۷۷	۳/۴۶	۳/۲۳	۲/۷۷	۳/۳۸	C8
۰	۳/۰۸	۲/۳۸	۲/۴۶	۳/۵۴	۳/۰۸	۲/۶۲	۲/۲۳	۱/۰۸	C9

• گام دوم: نرمال سازی ماتریس روابط مستقیم

برای نرمال سازی ماتریس میانگین تصمیم (N)، ابتدا بزرگترین مقدار از مجموع هر ستون و سطر ماتریس روابط مستقیم (جدول ۵) شناسایی می شود. سپس هر یک از عناصر ماتریس روابط مستقیم بر این مقدار تقسیم می گردد. ماتریس جدید حاصل از این عملیات به نام N شناخته می شود و تمامی مقادیر آن در بازه ای بین صفر و یک قرار خواهند گرفت. ماتریس نرمالایز شده در جدول (۶) نمایش داده شده است.

جدول ۶: ماتریس روابط مستقیم نرمال شده

C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
۰/۰۴۱	۰/۱۲۳	۰/۱۰۴	۰/۰۷۴	۰/۰۴۱	۰/۱۳۱	۰/۰۷۴	۰/۱۰۴	۰	C1
۰/۰۷۷	۰/۱۱۸	۰/۰۸۵	۰/۱۲۹	۰/۰۷۹	۰/۱۱۵	۰/۰۹۹	۰	۰/۰۸۲	C2
۰/۱۱۵	۰/۱۲۹	۰/۱۳۴	۰/۱۱۵	۰/۱۰۴	۰/۱۱۵	۰	۰/۰۸۵	۰/۱۱	C3
۰/۱۱	۰/۱۳۴	۰/۱۳۴	۰/۱۰۴	۰/۰۸۵	۰	۰/۰۹۹	۰/۱۰۴	۰/۱۲۳	C4
۰/۱۲۶	۰/۱۱۲	۰/۱۱	۰/۰۸۲	۰	۰/۰۸۲	۰/۰۹۹	۰/۰۷۷	۰/۰۳۸	C5
۰/۰۸۸	۰/۱۳۷	۰/۱۱	۰	۰/۰۸۵	۰/۱۱	۰/۰۸۲	۰/۱۰۱	۰/۰۷۴	C6
۰/۰۸۲	۰/۱۳۷	۰	۰/۱۱	۰/۱۰۱	۰/۱۲۹	۰/۱۱	۰/۰۸۸	۰/۰۹۹	C7
۰/۰۹۶	۰	۰/۱۳۷	۰/۱۱۵	۰/۰۹۹	۰/۱۲۳	۰/۱۱۵	۰/۰۹۹	۰/۱۲	C8
۰	۱/۱۱	۰/۰۸۵	۰/۰۸۸	۰/۱۲۶	۰/۱۱	۰/۰۹۳	۰/۰۷۹	۰/۰۳۸	C9

• گام سوم: ماتریس روابط کلی (I)

در روش دیمتل برای محاسبه ماتریس ارتباط کامل، ابتدا یک ماتریس یکه یا همانی با ابعاد مشابه ماتریس ارتباط مستقیم ایجاد می شود. سپس مراحل زیر انجام می شود:

- ✓ ماتریس همانی از ماتریس نرمال شده ارتباط مستقیم کم می شود (I - N).
- ✓ معکوس ماتریس حاصل از مرحله قبل محاسبه می شود.
- ✓ ماتریس معکوس در ماتریس نرمال شده ارتباط مستقیم ضرب ماتریسی می شود.

$$T = N \times (I - N)^{-1} \quad (1)$$

ماتریس روابط کلی پژوهش در جدول (۷) نشان داده شده است.

جدول ۷: ماتریس روابط کلی

C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
۰/۶۶۴	۰/۵۳۹	۰/۵۸۷	۰/۵۲۹	۰/۶۵۸	۰/۵۱۴	۰/۶۰۹	۰/۵۲	۰/۵۱۵	C1
۰/۵۳۱	۰/۵۸۱	۰/۷۱۳	۰/۳۱۲	۰/۴۲۷	۰/۴۴۲	۰/۴۶۶	۰/۳۶۱	۰/۴۲۱	C2
۰/۵۱۲	۰/۶۵۴	۰/۶۱۳	۰/۵۵۴	۰/۵۹۶	۰/۶۰۲	۰/۴۲۸	۰/۵۸۸	۰/۴۹	C3
۰/۵۱۰	۰/۶۵۱	۰/۶۰۵	۰/۵۳۹	۰/۶۷۴	۰/۵۹۲	۰/۵۱۲	۰/۵۹۸	۰/۴۹۶	C4
۰/۶۵	۰/۵۴۳	۰/۵۰۴	۰/۵۴۷	۰/۶۳۳	۰/۵۸۴	۰/۶۴۲	۰/۵۰۶	۰/۳۵۸	C5
۰/۶۴۲	۰/۵۹۸	۰/۵۳۶	۰/۵۳	۰/۴۳۴	۰/۶۳۹	۰/۶۵۵	۰/۵۵۴	۰/۴۱۶	C6
۰/۵۶۶	۰/۶۳۶	۰/۶۷۲	۰/۵۲۹	۰/۴۷۵	۰/۳۹	۰/۵۰۷	۰/۵۷۱	۰/۴۶۴	C7
۰/۶۹۴	۰/۵۳۹	۰/۶۱۴	۰/۶۵۳	۰/۴۹	۰/۳۰۷	۰/۴۳	۰/۵۹۸	۰/۴۹۸	C8
۰/۳۴	۰/۳۴۳	۰/۴۸۵	۰/۴۵۲	۰/۴۴۶	۰/۴۰۷	۰/۴۳۹	۰/۴۱	۰/۳۶	C9

#### • گام چهارم: شناسایی روابط علی و معلولی

شناسایی روابط علی و معلولی: در این مرحله، برای ماتریس T، جمع سطری R، جمع ستونی C، مجموع R+C و تفاضل R-C که به ترتیب نمایانگر اثرگذاری، اثرپذیری، اهمیت و اثرگذاری و اثرپذیری خالص هستند، مطابق جدول (۸) محاسبه می‌شوند.

جدول ۸: تعیین علی و معلولی شاخص‌ها

C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
۳/۹۸۱	۴/۸۲۳	۴/۶۱	۴/۲۷۴	۳/۹۶۷	۴/۷۶۷	۴/۸۳۷	۴/۲۵۳	۳/۸۳۴	R
۳/۹۹۸	۵/۲۸۳	۴/۸۲۹	۴/۴۱۴	۳/۹۳۲	۴/۸۷۸	۴/۱۸۹	۴/۰۰۵	۳/۸۱۸	C
۷/۹۸	۱۰/۱۱	۹/۴۳۹	۸/۶۸۸	۷/۸۹۹	۹/۶۴۵	۹/۰۲۷	۸/۲۵۸	۷/۶۵۲	C+R
-۰/۰۲	-۰/۴۶	-۰/۲۲	-۰/۱۴	۰/۰۳۶	-۰/۱۱	۰/۶۴۸	۰/۲۴۸	۰/۰۱۶	R-C

هر چه مقدار R+C بیشتر باشد، معیار پرتعامل تری به حساب می‌آید و اهمیت آن شاخص از دیدگاه خبرگان بیشتر است. طبق نتایج به دست آمده، عوامل فناوری و زیرساختی بیشترین تعامل را از نظر خبرگان دارند. مقدار R-C نمایانگر وضعیت‌های مختلف است؛ اگر این مقدار مثبت باشد، عنصر مورد نظر بیشترین تأثیرگذاری را دارد و اگر منفی باشد، بیشترین تأثیرپذیری را دارد. همچنین، در صورتی که مقدار R-C مثبت باشد، متغیر به عنوان عامل علت و در صورت منفی بودن، به عنوان عامل معلول شناخته می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده، عوامل اقتصادی، قانونی و مدیریتی بیشترین تأثیرگذاری را داشته و عوامل زیست‌محیطی، فناوری، زیرساختی و منابع انسانی به عنوان عوامل تأثیرپذیر شناسایی شده‌اند.

#### • گام پنجم: تعیین مقدار آستانه

در روش دیمتل، تعیین مقدار آستانه به منظور حذف روابط ضعیف و تمرکز بر ارتباطات معنادار میان عوامل انجام می‌شود. در این پژوهش، پس از تشکیل ماتریس روابط کل، میانگین کلی مقادیر موجود در این ماتریس محاسبه گردید که برابر با ۰.۵۰۱۲ به دست آمد. بر این اساس، مقدار ۰.۵ به عنوان حد آستانه نهایی در نظر گرفته شد تا روابط اثرگذار میان معیارها از روابط کم‌اهمیت تفکیک گردد. به منظور بررسی پایداری مدل، تحلیل حساسیت نیز انجام شد و مقادیر آستانه در بازه‌ی ۰.۴۵ تا ۰.۵۵ مورد آزمون قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که تغییرات جزئی در مقدار آستانه، ساختار کلی روابط میان عوامل را تغییر نمی‌دهد و مدل از ثبات و اعتبار مناسبی برخوردار است. در ادامه، بر مبنای روابط باقی مانده، ماتریس دستیابی نهایی تشکیل شد؛ به گونه‌ای که اگر مقدار T<sub>ij</sub> بیش از ۰.۵ باشد، درایه‌ی مربوطه برابر با ۱ و در غیر این

صورت برابر با ۰ در نظر گرفته شد. این ماتریس به عنوان ورودی روش ISM مورد استفاده قرار گرفت و مبنای تحلیل سلسله مراتبی و ساختاردهی نهایی عوامل قرار گرفت.

جدول ۹: روابط کلی تمامی عوامل

C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	C1
۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	C2
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	C3
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	C4
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	C5
۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	C6
۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	C7
۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	C8
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	C9

## ۴.۲. نتایج مدل سازی ساختاری تفسیری<sup>۱</sup>

روش مدلسازی ساختاری تفسیری به عنوان ابزاری تعاملی و آموزشی، با ارائه تصویری روشن از روابط میان عوامل مختلف، فرایند تصمیم گیری را برای مدیران و سیاستگذاران تسهیل می کند. این روش با سازماندهی تعاملات میان عناصر کلیدی مرتبط با یک پدیده، زمینه درک عمیق تر ساختار آن را فراهم می سازد و به تحلیل نحوه تأثیر متقابل عناصر در یک سیستم پیچیده کمک می کند مندل و دسموک<sup>۲</sup>، (۱۹۹۴). اصل اساسی ISM بر استفاده از دانش و تجربیات خبرگان استوار است؛ به طوری که سیستم های پیچیده به مؤلفه های کوچک تر تفکیک شده و ساختاری چندسطحی از تعاملات میان آنها شکل می گیرد (انصاری، ۲۰۱۳). در این زمینه، روش های DEMATEL و ISM هر دو برای شناسایی و تحلیل روابط میان مجموعه ای از عوامل توسعه یافته اند. با وجود شباهت های این دو رویکرد، تفاوت هایی در نحوه جمع آوری داده ها و تحلیل نتایج وجود دارد که ممکن است به تبیین متفاوتی از روابط میان عوامل منجر شود. برای کاهش این محدودیت، استفاده از رویکرد ترکیبی DEMATEL و ISM توصیه می شود. این ترکیب با بهره گیری همزمان از قابلیت های هر دو روش، تحلیلی جامع تر و دقیق تر از روابط میان عوامل ارائه می دهد (چن<sup>۳</sup>، ۲۰۲۱). با توجه به اینکه گام های DEMATEL پیشتر تشریح شد، در ادامه مراحل ISM و نحوه ترکیب آن با نتایج حاصل از DEMATEL ارائه شده است.

### • گام اول: تشکیل ماتریس دستیابی

در مرحله نخست، ماتریس دستیابی با استفاده از ماتریس روابط کل به دست آمده از روش DEMATEL تهیه شد. این ماتریس، که در جدول (۹) ارائه شده است، به عنوان ورودی اصلی برای تحلیل سلسله مراتبی در چارچوب ISM مورد استفاده قرار گرفت و بازتاب دهنده تمامی روابط معنادار و اثرگذار میان عوامل می باشد.

<sup>1</sup> Interpretive structural modeling (ISM)

<sup>2</sup> Mandal & Deshmukh

<sup>3</sup> Chen

### • گام دوم: تعیین سطح و اولویت بندی عوامل

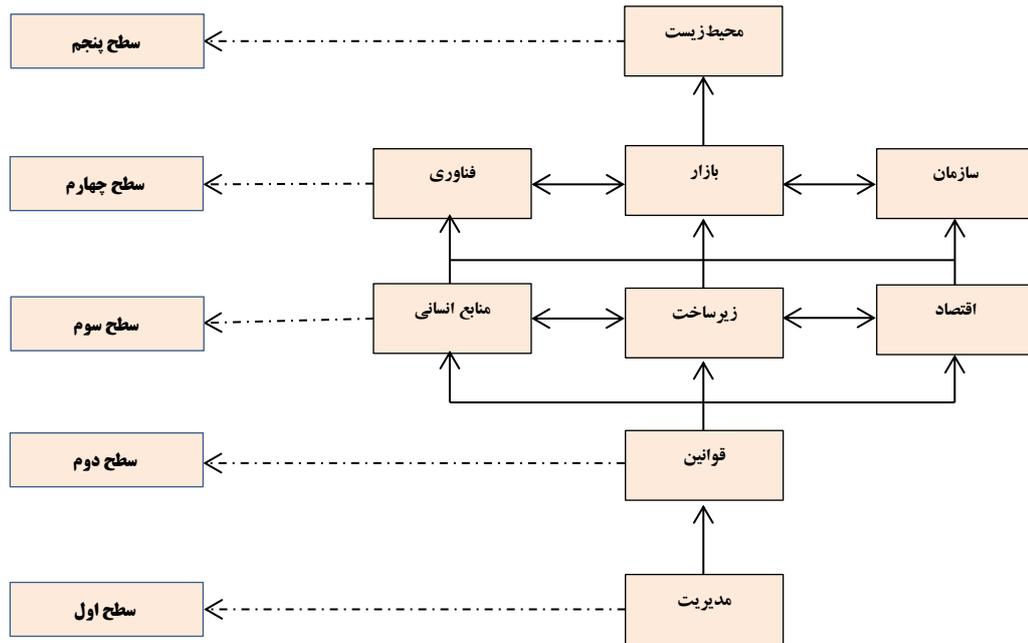
برای تعیین سطح و اولویت بندی عوامل، دو مجموعه تعریف می شوند: مجموعه قابل دستیابی (خروجی ها) و مجموعه مقدم (ورودی ها). مجموعه قابل دستیابی شامل معیار مورد نظر و معیارهایی است که تحت تأثیر آن قرار دارند، در حالی که مجموعه مقدم شامل همان معیار و معیارهایی است که بر آن تأثیر می گذارند. پس از مشخص شدن این دو مجموعه، اشتراک آن ها محاسبه می شود. اولین تغییری که اشتراک دو مجموعه برابر با مجموعه قابل دستیابی باشد، به عنوان سطح اول تعیین می شود؛ این متغیرها بیشترین میزان تأثیر پذیری را در مدل دارند. پس از تعیین سطح، متغیرهای سطح بندی شده حذف می شوند و فرآیند برای سایر متغیرها به همین ترتیب تکرار می گردد تا تمامی عوامل سطح بندی شوند. در نهایت، متغیرهایی که در بالاترین سطح قرار می گیرند، هیچ تأثیری بر متغیرهای دیگر ندارند و منشأ سایر عوامل نیستند. این رویکرد امکان شناخت ساختار سلسله مراتبی پدیده و درک بهتر روابط علت و معلولی بین عوامل را فراهم می کند. علاوه بر این، سطح بندی عوامل کمک می کند تا تمرکز تحلیل و تصمیم گیری روی عوامل کلیدی و اثرگذار قرار گیرد و پیچیدگی مدل کاهش یابد. در این پژوهش، نتایج نهایی سطح بندی ۹ عامل به همراه مجموعه های قابل دستیابی، مقدم و اشتراک آن ها در جدول (۱۰) ارائه شده است.

جدول ۱۰: تعیین سطح و اولویت بندی نهایی عوامل

عناصر	مجموعه قابل دستیابی	مجموعه مقدم	اشتراک	سطح
C1	۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹	۱	۱	۵
C2	۲،۷،۸،۹	۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸	۲،۷،۸	۲
C3	۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹	۱،۳،۴،۵،۶،۷	۳،۴،۵،۶	۳
C4	۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹	۱،۳،۴،۵،۶	۳،۴،۵،۶	۳
C5	۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹	۱،۳،۴،۵	۳،۴،۵	۴
C6	۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹	۱،۳،۴،۵،۶،۷،۸	۳،۴،۵،۶،۷،۸	۳
C7	۲،۳،۶،۷،۸،۹	۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸	۲،۳،۶،۷،۸	۲
C8	۲،۶،۷،۸،۹	۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸	۲،۶،۷،۸	۲
C9	۹	۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹	۹	۱

### • گام سوم: ترسیم مدل نهایی

در این مرحله، بر اساس سطح هر یک از عناصر و ماتریس نهایی دستیابی، مدل نهایی ساختاری-تفسیری ترسیم می شود. برای این منظور، ابتدا متغیرها بر اساس سطح آن ها از پایین به بالا مرتب می شوند. به طوری که عامل "مدیریت" در بالاترین سطح با بیشترین قدرت نفوذ و کمترین وابستگی و عامل "زیست محیطی" در پایین ترین سطح با کمترین قدرت نفوذ و بیشترین وابستگی قرار می گیرند. این مدل در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳: مدل نهایی عوامل مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین معکوس در انقلاب صنعتی چهارم

#### • گام چهارم: تجزیه و تحلیل MICMAC

در تحلیل MICMAC، عوامل مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین معکوس صنایع کاشی و سرامیک در عصر انقلاب صنعتی چهارم بر اساس قدرت نفوذ و وابستگی متقابل آن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. این دسته‌بندی با بهره‌گیری از ماتریس نهایی دستیابی و با توجه به سطوح هر یک از عناصر صورت می‌گیرد. هدف اصلی تحلیل MICMAC، سنجش میزان نفوذ و وابستگی متغیرها به یکدیگر و شناسایی نقش آن‌ها در ساختار سیستم است. این تحلیل امکان درک بهتر روابط علت و معلولی و تعیین عوامل کلیدی و اثرگذار در توسعه زنجیره تأمین را فراهم می‌کند و می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های استراتژیک کمک کند.

بر اساس نتایج این تحلیل، عوامل در چهار گروه اصلی جای می‌گیرند:

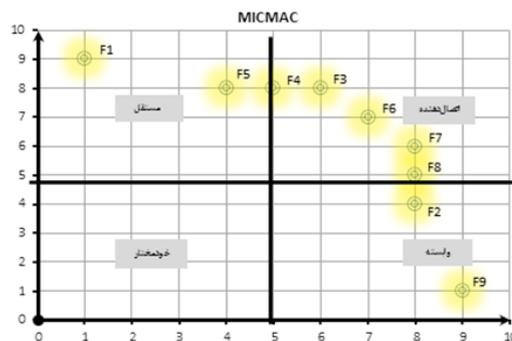
- ✓ مستقل کلیدی: شامل متغیرهایی با قدرت نفوذ و وابستگی بالا است که به عنوان عوامل کلیدی شناخته می‌شوند و تأثیر قابل توجهی بر سایر متغیرها دارند.
- ✓ وابسته: شامل متغیرهایی با وابستگی بالا اما نفوذ پایین است؛ این متغیرها تحت تأثیر سایر عوامل قرار دارند و نقش محدودی در اثرگذاری بر دیگر متغیرها دارند.
- ✓ مستقل (خودمختار): شامل متغیرهایی با نفوذ و وابستگی پایین است که کمترین تأثیر و ارتباط را با سایر متغیرها دارند.
- ✓ اتصال‌دهنده: شامل متغیرهایی با نفوذ و وابستگی بالا است که از نظر پایداری ناپایدارند و هر اقدام مرتبط با آن‌ها می‌تواند واکنش‌های متقابل در خود و سایر متغیرها ایجاد کند.

مقادیر قدرت نفوذ و وابستگی هر متغیر، که از ماتریس نهایی دستیابی استخراج شده است، در جدول (۱۱) ارائه شده است. این دسته‌بندی همچنین امکان شناسایی نقاط حساس سیستم و تمرکز بر عوامل با بیشترین اثرگذاری را فراهم می‌کند و به تحلیل ساختاری دقیق‌تر زنجیره تأمین معکوس کمک می‌کند.

جدول ۱۱: قدرت نفوذ و وابستگی

قدرت نفوذ	C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	C1
۴	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	C2
۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	C3
۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	C4
۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	C5
۷	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	C6
۶	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	C7
۵	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	C8
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	C9
	۹	۸	۸	۷	۴	۵	۶	۸	۱	قدرت وابستگی

بر اساس تجزیه و تحلیل MICMAC، سه عامل مدیریت (C1)، قوانین (C5) و زیرساخت (C4) به عنوان عوامل کلیدی در توسعه زنجیره تأمین معکوس در صنعت کاشی و سرامیک شناخته شده‌اند. این عوامل نقشی اساسی در ایجاد بستر و زمینه‌ای مناسب برای این زنجیره تأمین ایفا می‌کنند. در مقابل، سه عامل محیط زیست (C9)، سازمان (C2) و فناوری (C8) وابستگی بالایی به عوامل دیگر دارند. این عوامل به جای آن که زمینه‌ساز توسعه زنجیره تأمین معکوس باشند، بیشتر تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند. این اثرپذیری عمدتاً از ناحیه عوامل کلیدی (C1، C4، C5) نشأت می‌گیرد. متغیرهای وابسته (C2، C8، C9) به شدت تحت تأثیر اقداماتی هستند که در رابطه با متغیرهای اتصال‌دهنده (C3، C6، C7) انجام می‌شود. این متغیرها قدرت نفوذ لازم برای تأثیرگذاری بر سایر متغیرها را ندارند و به همین دلیل در سطوح پایین‌تر مدل قرار می‌گیرند. متغیرهای اتصال‌دهنده شامل اقتصاد (C3)، منابع انسانی (C6) و بازار (C7) هستند. هرگونه تغییر در این متغیرها، به طور مستقیم بر متغیرهای وابسته اثر می‌گذارد. از ویژگی‌های کلیدی این متغیرها، ارتباطات درونی قوی آن‌ها با یکدیگر است. به گونه‌ای که هرگونه اختلال در عملکرد این متغیرها، می‌تواند پتانسیل ایجاد مشکل در سایر متغیرها را نیز به همراه داشته باشد. شکل (۴) نشان‌دهنده قدرت وابستگی (محور X) و قدرت نفوذ (محور Y) هر یک از عوامل مؤثر بر توسعه زنجیره تأمین معکوس صنایع کاشی و سرامیک در انقلاب صنعتی چهارم است.



شکل ۴: نمودار قدرت و وابستگی

## ۵. بحث و نتیجه گیری

رشد شتابان پژوهش‌ها در حوزه «صنعت ۴.۰» نشان‌دهنده تحولات بنیادین در شیوه تولید، مدیریت و تصمیم‌گیری در سازمان‌ها است. این پدیده با تلفیق فناوری‌های دیجیتال، فیزیکی و زیستی همچون اینترنت اشیا، هوش مصنوعی، تحلیل داده‌های بزرگ و سیستم‌های سایبری- فیزیکی، موجب بازطراحی زنجیره‌های تأمین و شکل‌گیری الگوهای نوین تولید شده است. یکی از ابعاد مهم این تحول، تأثیر صنعت ۴.۰ بر زنجیره تأمین معکوس است؛ زنجیره‌ای که به بازگرداندن، بازیافت و استفاده مجدد از محصولات و مواد می‌پردازد و نقشی اساسی در تحقق اهداف پایداری دارد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که در صنایع کاشی و سرامیک، عامل مدیریت بیشترین تأثیر را بر توسعه زنجیره تأمین معکوس دارد و در سطح اول مدل پنج‌سطحی قرار گرفته است. این نتیجه با پژوهش‌های حسینی دهشیری و همکاران (۲۰۲۲)، رحمان و همکاران (۲۰۱۲) و محمودآبادی و همکاران (۱۴۰۰) همسو است که بر نقش راهبردی رهبری و تعهد مدیران در موفقیت اجرای لجستیک معکوس تأکید کرده‌اند. علت این همگرایی را می‌توان در منطق نظری صنعت ۴.۰ جست‌وجو کرد؛ مدیریت در این چارچوب به عنوان مغز متفکر سیستم عمل می‌کند و مسئول هم‌سوسازی فناوری‌های نوین با اهداف پایداری و کارایی سازمان است. بدون مدیریت آگاه و رهبری استراتژیک، تحول دیجیتال تنها به بازسازی ابزارها محدود می‌شود و بهره‌وری واقعی حاصل نخواهد شد. مؤلفه‌هایی مانند تعهد مدیران ارشد، رهبری دیجیتال و برنامه‌ریزی استراتژیک داده‌محور، زیربنای توسعه لجستیک معکوس در این صنعت هستند و با نظریه قابلیت‌های پویا و نظریه سیستم‌های باز همخوانی دارند.

در سطح دوم، عوامل قانونی و سیاستی قرار دارند. یافته‌ها نشان دادند که وجود قوانین حمایتی و سیاست‌های انگیزشی دولت در حوزه پسماند و بازیافت نقش تعیین‌کننده‌ای در نهادینه‌سازی زنجیره تأمین معکوس دارد. این نتیجه با مطالعات رجبی و همکاران (۱۴۰۲) همسو است. تفاوت پژوهش حاضر در تأکید بر هماهنگی مقررات ملی با الزامات دیجیتال صنعت ۴.۰ است؛ چراکه قوانین سنتی پاسخ‌گوی پیچیدگی‌های زنجیره‌های هوشمند و فناورمحور نیستند. سطح سوم شامل عوامل اقتصادی، زیرساختی و منابع انسانی است. یافته‌ها با پژوهش‌های لی (۲۰۲۳)، کومار و همکاران (۲۰۲۱) هم‌راستا است، اما واگرایی مهمی نیز دیده می‌شود: در حالی که در مطالعات خارجی زیرساخت فناورانه عامل اصلی تلقی می‌شود، در صنایع کاشی و سرامیک ایران موفقیت اجرای لجستیک معکوس بیشتر نیازمند حمایت مدیریتی و سیاست‌گذاری است. این نشان می‌دهد که توسعه لجستیک معکوس در کشورهای در حال توسعه نیازمند هم‌افزایی میان مدیریت، منابع انسانی و فناوری است و نه سرمایه‌گذاری صرف در فناوری. سطح چهارم شامل عوامل سازمانی، بازار و فناوری است که نقش واسطه‌ای میان لایه‌های بالادستی (مدیریت و سیاست) و لایه‌های پایین‌دستی (زیست‌محیطی) دارند. یافته‌ها نشان داد که استفاده از فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های ردیابی هوشمند و پلتفرم‌های داده‌محور می‌تواند موجب افزایش کارایی زنجیره تأمین معکوس شود؛ یافته‌ای که با نتایج ماکالنج و هاوسیباندا (۲۰۲۲) همسو است. با این حال، برخلاف آن پژوهش‌ها که فناوری را محرک مستقل می‌دانستند، این تحقیق نشان داد که فناوری بدون حمایت مدیریتی و زیرساخت سازمانی نمی‌تواند عملکرد بهینه ایجاد کند. در سطح پنجم، عوامل زیست‌محیطی قرار دارند که بیشترین وابستگی را به سایر عوامل دارند. یافته‌ها با مطالعات بین‌المللی همسو است، اما پژوهش حاضر با تبیین ارتباط مستقیم فناوری‌های دیجیتال با کاهش آلاینده‌ها، نگاه نوینی به مفهوم پایداری فناورمحور ارائه می‌دهد. پیاده‌سازی لجستیک معکوس دیجیتالی می‌تواند اثرات منفی زیست‌محیطی را کاهش دهد و به تحقق اهداف توسعه پایدار در صنعت کمک کند.

این پژوهش با ارائه یک مدل پنج‌سطحی، تصویر جامع و تحلیلی از روابط علی و ساختاری میان عوامل مدیریتی، قانونی، اقتصادی، فناورانه و زیست‌محیطی ارائه کرده است و با مطالعات پیشین همگرایی قابل توجهی دارد، در عین حال

تفاوت‌های بومی صنعت کاشی و سرامیک ایران را نیز نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، اقدامات اجرایی زیر برای مدیران صنایع کاشی و سرامیک توصیه می‌شود:

- ✓ ایجاد واحد مدیریت دیجیتال لجستیک معکوس برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها؛
- ✓ طراحی پلتفرم هوشمند ردیابی محصولات برگشتی با فناوری‌های IoT و RFID؛
- ✓ آموزش و توانمندسازی مدیران و کارکنان در حوزه فناوری‌های نوین و مدیریت لجستیک؛
- ✓ بازنگری در قوانین ملی و تدوین مشوق‌های مالی و زیست‌محیطی برای سازمان‌های پیشرو؛
- ✓ توسعه زیرساخت‌های فناوری اطلاعات صنعتی؛
- ✓ ایجاد شبکه همکاری میان صنایع، دانشگاه‌ها و نهادهای محیط‌زیستی.

اجرای این اقدامات موجب توسعه زنجیره تأمین معکوس کارآمد، کاهش ضایعات، حفظ منابع طبیعی و ارتقای رقابت‌پذیری در صنعت کاشی و سرامیک خواهد شد. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که گذار به صنعت ۴.۰ در زنجیره تأمین معکوس، مستلزم مدیریت تحول دیجیتال هوشمند، حمایت قانونی و توسعه زیرساخت‌های فناورانه است و مدل ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان نقشه راه برای مدیران و سیاست‌گذاران در اجرای موفق لجستیک معکوس مورد استفاده قرار گیرد.

## ۶. محدودیت‌های پژوهش

با توجه به ویژگی‌های خاص صنعت کاشی و سرامیک شهرستان میبد در استان یزد، این پژوهش بر این صنعت متمرکز شد و بنابراین تعمیم مستقیم نتایج به سایر صنایع تولیدی با ساختار زنجیره تأمین متفاوت محدود است. داده‌های پژوهش عمدتاً کیفی و مبتنی بر نظرات ۱۳ خبره بودند که با وجود اشباع نظری، نمونه بزرگ‌تر می‌توانست تنوع دیدگاه‌ها و تعمیم‌پذیری نتایج را افزایش دهد. همچنین، روش نمونه‌گیری هدفمند و گلوله‌برفی، اگرچه برای شناسایی خبرگان متخصص مناسب بود، ممکن است سوگیری انتخاب را به حداقل برساند اما کاملاً از بین نبرد. با این حال، یافته‌های پژوهش ارزش علمی و عملی قابل توجهی در زمینه توسعه زنجیره تأمین معکوس در صنعت کاشی و سرامیک ارائه می‌کند و زمینه‌ساز تحقیقات آینده در صنایع مشابه است.

## ۷. پیشنهادات آتی

با توجه به محدودیت‌ها و نتایج این پژوهش، چند مسیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود. نخست، توصیه می‌شود تحلیل مشابه در سایر صنایع و حوزه‌های زنجیره تأمین معکوس انجام شود تا عمومیت و قابلیت تعمیم نتایج ارزیابی شود. همچنین، بهره‌گیری از رویکردهای ترکیبی دیگر مانند DEMATEL-ANP یا شبکه عصبی فازی می‌تواند دقت و عمق تحلیل روابط میان عوامل را افزایش دهد. پژوهش‌های آتی می‌توانند به تأثیر متغیرهای محیطی و فناوری‌های نوظهور در توسعه زنجیره تأمین معکوس توجه ویژه داشته باشند و بررسی ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی این زنجیره‌ها در چارچوب انقلاب صنعتی چهارم، چشم‌انداز جامع‌تری ارائه خواهد کرد. در نهایت، استفاده از داده‌های میدانی گسترده‌تر و تحلیل‌های کمی پیشرفته می‌تواند غنای نتایج و قابلیت کاربردی پیشنهادات عملی را تقویت کند.

## تعارض منافع

در فرآیند انجام این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی یا کمک‌هزینه پژوهشی دریافت نشده است و همچنین هیچ تضاد منافع علمی، مالی یا شخصی در ارتباط با انتشار این مقاله وجود ندارد.

## سپاسگزاری

بدین وسیله از کلیه مشارکت کنندگان این پژوهش که با به اشتراک گذاری دانش و تجربیات خود، همکاری ارزشمندی در اجرای پژوهش حاضر داشتند، صمیمانه قدردانی و سپاسگزاری می‌شود.

## ORCID

Hossein Sayyadi Tooranloo  <https://orcid.org/0000-0001-9418-8187>

Zahra Abbasi Meybodi  <https://orcid.org/0009-0007-6120-1083>

## منابع

- بهرامی، محمدرضا؛ هاشم‌زاده، غلام‌رضا؛ شاه‌منصوری، اشرف و فتحی هفشجانی، کیامرث. (۱۴۰۴). تحلیل مؤلفه‌های مؤثر بر ارزیابی بلوغ صنعت ۴.۰ در بانکداری ایران. *مهندسی سیستم و بهره‌وری*، ۱۵(۱)، ۲۱-۵۰.
- <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2047848.1246>
- حیدری هراتمه، مصطفی. (۱۴۰۳). ارائه الگوی بازاریابی فناوری در فرایند جهانی شدن. *مدیریت زنجیره ارزش راهبردی*، ۱۱(۱)، ۹۶-۱۱۴.
- doi: 10.22075/svcm.2024.35049.1005
- رجبی، فرنام؛ حقیقت منفرد، جلال؛ اعتمادی، احمدرضا و کولوبندی، عبدالله. (۱۴۰۲). ارائه مدل راهبردی پیاده‌سازی لجستیک معکوس در صنعت لوازم خانگی ایران. *مدیریت سبز*، ۳(۲)، ۱-۱۸.
- <https://dori.net/dor/20.1001.1.28210050.1402.3.2.1.5>
- رکن‌الدینی، سید علیرضا؛ عندلیب اردکانی، داود؛ زارع احمدآبادی، حبیب و حسینی بامکان، سیدمجتبی. (۱۴۰۲). مدل‌سازی توانمندسازهای صنعت ۴.۰ در پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار با رویکرد دیمتل-فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۱۳(۱)، ۱۴۱-۱۷۲.
- <https://doi.org/10.48308/jimp.13.1.141>
- رضایی مقدم، سعید و دوستی، اصلاان. (۱۴۰۱). طراحی مدل ریاضی چند هدفه برنامه ریزی تولید تجمیعی در زنجیره تأمین معکوس با تابع کیفیت تولید تحت شرایط عدم قطعیت و استفاده از الگوریتم فراابتکاری (MPSOGA) مورد مطالعه صنعت High-Tech. *مدیریت مهندسی و رایانش نرم*، ۸(۲)، ۲۱۲-۲۳۵.
- <https://doi.org/10.22091/jemsc.2020.6237.1141>
- رهبری پور، کسری؛ پاکدل فرد، محمدرضا؛ ستاری ساربانقلی، حسن و ولی‌زاده، نیما. (۱۴۰۴). تحلیل موانع دستیابی به صنعت ساخت چهارم با رویکرد مدل‌سازی ساختاری-تفسیری. *مهندسی سیستم و بهره‌وری*، ۱۶(۱)، ۱-۳۸.
- <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2068090.1374>
- شفیع پور، مریم؛ فرقانی، محمدعلی و صادقی، زین‌العابدین. (۱۴۰۴). اندازه‌گیری لجستیک معکوس در شرایط تولید ناقص، تقاضای متغیر و نرخ بازگشت با درجات کیفیت مختلف: مطالعه موردی مجتمع مس باهنر کرمان. *تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات*، ۱۰(۲)، ۲۱۴-۲۳۷.
- <https://doi.org/10.22105/dmor.2025.484648.1884>
- عمادی، سیدحمید؛ صادقیان، ابوالفضل؛ ربانی، مژده و دهقان دهنوی، حسن. (۱۴۰۳). کاربرد رویکرد کنترل هینه در بهینه‌سازی سیستم‌های موجودی تولیدی در زنجیره تأمین. *مهندسی سیستم و بهره‌وری*، ۱۴(۱)، ۸۵-۹۸.
- <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2026595.1203>
- کالاشی، فریبرز؛ مهدوی، ایرج؛ تاج‌دین، علی و رضائیان، جواد. (۱۴۰۴). ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان در زنجیره تأمین حلقه بسته بادوام تحت عدم قطعیت ترکیبی. *مهندسی سیستم و بهره‌وری*، ۱۵(۴)، ۱۹۱-۲۱۵.
- <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2066007.1355>
- کیانی، مهرداد؛ عندلیب اردکانی، داود؛ میرفخرالدینی، سیدحیدر و زارع احمدآبادی، احمد. (۱۴۰۲). تحلیلی بر موانع پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ۴.۰ در زنجیره تأمین: رویکرد فراترکیب و دنپ فازی. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۱۳(۴)، ۹-۴۵.
- <https://doi.org/10.48308/jimp.13.4.9>
- محمودآبادی، مصطفی و عابدی، صادق. (۱۴۰۰). شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زنجیره تأمین لجستیک معکوس پسماند فاضلاب صنعتی در شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر. *مدیریت صنعتی*، ۱۶(۵۷)، ۴۵-۵۷.
- <https://doi.org/10.30495/imj.2021.686119>

مزروعی نصرآبادی، اسماعیل؛ صادقی آرانی، زهرا؛ فخاری، علیرضا و محمد کاظمی، مهدی. (۱۴۰۳). اثر موجی در زنجیره تأمین: تحلیل بر تشدیدکننده‌ها. *مدیریت زنجیره ارزش راهبردی*، ۱(۲)، ۷۹-۹۲. <https://doi.org/10.22075/svcm.2025.9428>

ملک پور کلبادی نژاد و باقری نژاد، جعفر. (۱۴۰۲). ارائه مدل دوهدفه مکان‌یابی - موجودی برای طراحی شبکه لجستیک مستقیم/معکوس یکپارچه. *مهندسی سیستم و بهره‌وری*، ۳(۱)، ۴۰-۱. <https://doi.org/10.22034/sep.2023.706141>

وحیدیان، ویدا و داوودی، سید محمدرضا. (۱۳۹۷). شناسایی و اولویت بندی راهکارهای بکارگیری لجستیک معکوس با استفاده از رویکرد ترکیبی AHP فازی و TOPSIS فازی (مطالعه موردی: شرکت فولاد مبارکه اصفهان). *پژوهشنامه بازرگانی*، ۲۲(۸۶)، ۱۲۵-۱۶۴. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17350794.1397.22.86.5.4>

## References

- Ahmad, N., & Daghfous, A. (2010). Knowledge sharing through inter-organizational knowledge networks: Challenges and opportunities in the United Arab Emirates. *European Business Review*, 22(2), 153-174. <https://doi.org/10.1108/09555341011023506>
- Akyuz, E., & Celik, E. (2015). A fuzzy DEMATEL method to evaluate critical operational hazards during gas freeing process in crude oil tankers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 38, 243-253. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.10.006>
- Alfonso-Lizarazo, E. H., Montoya-Torres, J. R., & Gutiérrez-Franco, E. (2013). Modeling reverse logistics process in the agro-industrial sector: The case of the palm oil supply chain. *Applied Mathematical Modelling*, 37(23), 9652-9664. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.05.015>
- Amjad, M. S., Rafique, M. Z., & Khan, M. A. (2021). Leveraging optimized and cleaner production through Industry 4.0. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 859-871. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.001>
- Ansari, M. F., Kharb, R. K., Luthra, S., Shimmi, S. L., & Chatterji, S. (2013). Analysis of barriers to implement solar power installations in India using interpretive structural modeling technique. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.002>
- Badiezadeh, T., Saen, R. F., & Samavati, T. J. (2018). Assessing sustainability of supply chains by double frontier network DEA: A big data approach. *Computers & Operations Research*, 98, 284-290. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.003>
- Bahrami, M. R., Hashemzadeh, G. R., Shahmansoury, A., & Hafshejani, K. F. (2025). Analyzing effective components in Industry 4.0 maturity for Iranian banking. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 21-50. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2047848.1246>
- Becker, J., Knackstedt, R., & Pöppelbuß, J. (2009). Developing maturity models for IT management: A procedure model and its application. *Business & information systems engineering*, 1(3), 213-222. <https://doi.org/10.1007/s12599-009-0044-5>
- Bernon, M., Rossi, S., Cullen, J. J., & Management, L. (2011). Retail reverse logistics: A call and grounding framework for research. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 41 (5), 484-510. <https://doi.org/10.1108/09600031111138835>
- Butt, A. S. (2021). Strategies to mitigate the impact of COVID-19 on supply chain disruptions: a multiple case analysis of buyers and distributors. *The International Journal of Logistics Management*. <https://doi.org/10.1108/IJLM-11-2020-0455>
- Chen, J. K. (2021). Improved DEMATEL-ISM integration approach for complex systems. *Plos one*, 16(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254694>
- Chileshe, N., Rameezdeen, R., Hosseini, M. R., & Lehmann, S. (2015). Barriers to implementing reverse logistics in South Australian construction organisations. *Supply chain management: an international journal*, 20(2), 179-204. <https://doi.org/10.1108/SCM-10-2014-0325>
- Dev, N. K., Shankar, R., & Swami, S. (2020). Diffusion of green products in industry 4.0: Reverse logistics issues during design of inventory and production planning system. *International Journal of Production Economics*, 223, 107519. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107519>
- Dehnad, A. H., & Bagheri, M. (2014). A review of the factors affecting the implementation of reverse logistics in the Iranian automotive industry. *International Conference on Modern Researches in Management and Industrial Engineering, Tehran*. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/435358>
- Emadi, S. H., Sadeghian, A., Rabani, M., & Dehghani Dehnavi, H. (2024). Application of optimal control approach in optimizing production inventory systems in the supply chain. *Journal of Systems Engineering and Productivity*, 4(1), 85-98. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2026595.1203>

- Flores, E., Xu, X., & Lu, Y. (2020). Human Capital 4.0: a workforce competence typology for Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(4), 687-703. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2019-0309>
- 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>.
- Heidari Haratemeh, M. (2024). Presenting a Model for Technology Market-making in the Globalization Process. *Strategic Value Chain Management*, 1(1), 96-114. [In Persian]. doi: 10.22075/svcm.2024.35049.1005
- Hidayatno, A., Destyanto, A. R., & Hulu, C. A. (2019). Industry 4.0 technology implementation impact on industrial sustainable energy in Indonesia: A model conceptualization. *Energy Procedia*, 156, 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.133>
- Homaei, R., Khosravi, M., & Hourali, M. (2020). Designing a conceptual model of reverse logistics management network with a supply chain innovation approach. *Journal of Innovation and Value Creation*, 16(8), 1–15.
- Hosseini Dehshiri, S. J., Amiri, M., Olfat, L., & Pishvae, M. S. (2022). A Novel Robust Fuzzy Programming Approach for Closed-loop Supply Chain Network Design. *Industrial Management Journal*, 14(3), 421-457. <https://doi.org/10.22059/imj.2022.330096.1007865>
- Jabbour, C. J. C., Fiorini, P. D. C., Ndubisi, N. O., Queiroz, M. M., & Piato, É. L. J. S. (2020). Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. *Science of The Total Environment*, 725, 138177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138177>
- Kalashi, F., Mahdavi, I., Tajdin, A., & Rezayan, J. (2025). Evaluation and selection of suppliers in a sustainable closed-loop supply chain under hybrid uncertainty. *Journal of Systems Engineering and Productivity*, 5(4), 191–215. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2066007.1355>
- Kalubanga, M., & Mbekeka, W. (2024). Compliance with government and firm's own policy, reverse logistics practices and firm environmental performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 73(5), 1427-1478. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-09-2022-0463>
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Sharma, R. (2018). Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt industry 4.0 in Indian manufacturing industry. *Computers in Industry*, 101, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.06.004>
- Kaviani, M. A., Tavana, M., Kumar, A., Michnik, J., Niknam, R., & de Campos, E. A. R. (2020). An integrated framework for evaluating the barriers to successful implementation of reverse logistics in the automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122714. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122714>
- Kiani, M., Andalib Ardakani, D., Mirfakhredini, S. H. and Zare Ahmadabadi, H. (2023). An Analysis of the Barriers to the Implementation of the Circular Economy and Industry 4.0 in the Supply Chain: The Meta-Synthesis Approach and Fuzzy DANP. *Journal of Industrial Management Perspective*, 13(4), 9-45. [In Persian]. doi: 10.48308/jimp.13.4.9
- Kiani, M., Andalib Ardakani, D. (2023). Finding causal relationship and ranking of industry 4.0 implementation challenges: a fuzzy DEMATEL-ANP approach. *Soft Comput* 27, 15479–15496. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09053-4>
- Kim, S. T., Lee, H. H., & Hwang, T. (2020). Logistics integration in the supply chain: a resource dependence theory perspective. *International Journal of Quality Innovation*, 6(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40887-020-00039-w>
- Krstić, M., Agnusdei, G. P., Miglietta, P. P., Tadić, S., & Roso, V. J. (2022). Applicability of Industry 4.0 technologies in reverse logistics: A circular economy approach based on comprehensive distance-based ranking (COBRA) method. *Sustainability*, 14 (9), 5632. <https://doi.org/10.3390/su14095632>
- Kumar, P., Singh, R. K., & 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>
- Le, S. T. (2023). Investigating the drivers of the reverse logistics implementation in reducing waste in Vietnam. *Environmental Health Insights*, 17, 11786302231211058. <https://doi.org/10.1177/11786302231211058>
- Lee, S. H., Park, S. H., & Park, H. (2024). Assessing the feasibility of biorefineries for a sustainable citrus waste management in Korea. *Molecules*, 29(7), 1589. <https://doi.org/10.3390/molecules29071589>
- Liao, T. Y. (2018). Reverse logistics network design for product recovery and remanufacturing. *Applied Mathematical Modelling*, 60, 145-163. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.03.003>

- Lin, K. M., & Lin, C. W. (2008, October). Cognition map of experiential marketing strategy for hot spring hotels in Taiwan using the DEMATEL method. In 2008 Fourth International Conference on Natural Computation (Vol. 1, pp. 438-442). *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2008.472>
- Lucia, C., Zhiwei, G., & Michele, N. (2023). Biometrics for Industry 4.0: a survey of recent applications. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(8), 11239-11261. <https://doi.org/10.1007/s12652-023-04632-7>
- Lv, Y., & Shang, Y. (2023). Investigation of industry 4.0 technologies mediating effect on the supply chain performance and supply chain management practices. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(48), 106129-106144. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29550-1>
- Ma, J., Zhu, L., & Guo, Y. (2021). Strategies and stability study for a triopoly game considering product recovery based on closed-loop supply chain. *Operational Research*, 21(4), 2261-2282. <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00509-w>
- Mahmoudabadi, M., & Abedi, S. (2021). Identification and prioritization of effective factors in the reverse logistics supply chain of industrial wastewater in Gol Gohar Mining & Industrial Company. *Quarterly Journal of Strategic Management in Industrial Systems*, 16(57), 45-57. [In Persian]. <https://doi.org/10.30495/imj.2021.686119>
- Malekpour Kalbadi Nejad, S., & Bagheri Nejad, J. (2023). A bi-objective location-inventory model for designing an integrated forward/reverse logistics network. *Journal of Systems Engineering and Productivity*, 3(1), 1-40. [In Persian]. 10.22034/SEP.2023.706141
- Makaleng, M. S. M., & Hove-Sibanda, P. (2022). Reverse logistics strategies and their effect on the competitiveness of fast-moving consumer goods firms in South Africa. *Logistics*, 6(3), 56. <https://doi.org/10.3390/logistics6030056>
- Mandal, A., & Deshmukh, S. G. (1994). Vendor selection using interpretive structural modelling (ISM). *International journal of operations & production management*, 14(6), 52-59. <https://doi.org/10.1108/01443579410062086>
- Mazroui Nasrabadi, E., Sadeqi Arani, Z., Fakhari, A. and Mohammad Kazemi, M. (2024). Ripple Effect in Supply Chain: Analysis of Intensifiers. *Strategic Value Chain Management*, 1(2), 79-92. [In Persian]. doi: 10.22075/svcm.2025.9428
- Moktadir, M. A., Rahman, T., Ali, S. M., Nahar, N., & Paul, S. K. (2020). Examining barriers to reverse logistics practices in the leather footwear industry. *Annals of Operations Research*, 293(2), 715-746. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03449-y>
- Mutha, A., & Pokharel, S. (2009). Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. *Computers & Industrial Engineering*, 56 (1), 334-346. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.06.006>
- Nirmal, D. D., Nageswara Reddy, K., Sohal, A. S., & Kumari, M. (2025). Development of a framework for adopting Industry 4.0 integrated sustainable supply chain practices: ISM-MICMAC approach. *Annals of operations research*, 348(3), 1387-1455. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05427-x>
- Patil, S. K., & Kant, R. (2014). A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers. *Expert systems with applications*, 41(2), 679-693. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.093>
- Pourmehdi, M., Paydar, M. M., Ghadimi, P., & Azadnia, A. H. C. (2022). Analysis and evaluation of challenges in the integration of Industry 4.0 and sustainable steel reverse logistics network. *Computers & Industrial Engineering*, 163, 107808. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107808>
- Papanagnou, C. I. (2022). Measuring and eliminating the bullwhip in closed loop supply chains using control theory and Internet of Things. *Annals of Operations Research*, 310(1), 153-170. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04136-7>
- Prajapati, H., Kant, R., & Shankar, R. (2023). Selection of strategy for reverse logistics implementation. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 16(1), 1-23. <https://doi.org/10.1108/JGOSS-04-2021-0034>
- Prakash, C., Barua, M. K., & Pandya, K. V. (2015). Barriers analysis for reverse logistics implementation in Indian electronics industry using fuzzy analytic hierarchy process. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 189, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.03.203>
- Rayhan, M. G. S., Nabi, M. N., Masum, M., Tushar, S. R., Fahim, M. R., & Rahman, M. M. (2025). Drivers and barriers to implementing industrial revolution 4.0 technologies: application of multi-method of ISM-MICMAC-DEMATEL. *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management*. <https://doi.org/10.1108/IJIEOM-01-2025-0016>
- Rahbaripour, K., Pakdelfard, M., Sattari Sarbangholi, H., & Valizadeh, N. (2026). Analysis of barriers to achieving Construction 4.0 using the interpretive structural modeling approach. *System Engineering and Productivity*, 6 (1), 1-38. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2068090.1374>

- Rahimi, H. J. Z., Azizi, A., & Najafi, S. E. (2023). Determining the level and analysis of the logistics system components based on Industry 4.0: Study of the logistics centers of Iran. *Strategic Management in Industrial Systems*, 18(63), 41–59. <https://doi.org/10.30495/imj.2023.1973629.1812>
- Rahman, S., & Subramanian, N. (2012). Factors for implementing end-of-life computer recycling operations in reverse supply chains. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 239-248. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.019>
- Rajabi, F., Haghghat Monfared, J., Etemadi, A., & Kouloubandi, A. (2023). Designing a strategic model for reverse logistics implementation in the home appliance industry. *Journal of Green Management*, 3(2), 1–18. [In Persian]. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.28210050.1402.3.2.1.5>
- Ramshe, M., Maleki, M. H., & Soltanian, M. (2023). A Framework for Identifying Key Drivers Affecting the Future of Auditing with a Focus on Industry 4.0 Technologies. *Professional Auditing Research*, 3(12), 8-3. <https://doi.org/10.22034/jpar.2023.2003770.1176>
- Rezaie Moghadam, S., & Doosti, A. (2023). Desining a Multi-Objective Mathematical Model of Cumulative Production Planning in Reverse Supply Chain With Production Quality Function Under Uncertainty and Using MPSOGA Tran-Innovation Algorithm (High-Tech Industry Case Study). *Engineering Management and Soft Computing*, 8(2), 212-235. [In Persian]. <https://doi.org/10.22091/jemsc.2020.6237.1141>
- Riaz, M., Farid, H. M. A., Aslam, M., Pamucar, D., & Bozanić, D. (2021). Novel approach for third-party reverse logistic provider selection process under linear Diophantine fuzzy prioritized aggregation operators. *Symmetry*, 13(7), 1152. <https://doi.org/10.3390/sym13071152>
- Rokneddini, S. A., Andalib Ardakani, D., Zare Ahmadabadi, H. and Hosseini Bamkan, S. M. (2023). Modeling the Enablers of Industry 4.0 in the Implementation of a Sustainable Supply Chain with Fuzzy DEMATEL-ANP. *Journal of Industrial Management Perspective*, 13(1), 141-172. [In Persian]. doi: 10.48308/jimp.13.1.141
- Sar, K., & Ghadimi, P. (2022). Designing reverse logistics network for a case study of home-care health medical device waste management: Implications for Industry 4.0 supply chains. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 3148-3153. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.213>
- Shafipour, M., Forghani, M. A. and Sadeghi, Z. (2025). Measurement of reverse logistics in incomplete production process mode, variable demand and return rate, with different degrees of quality in order to increase value: A case study of Kerman Bahonar Copper Complex. *Journal of Decisions and Operations Research*, 10(2), 214-237. [In Persian]. doi: 10.22105/dmor.2025.484648.1884
- Sun, X., Yu, H., & Solvang, W. D. (2022, January). System integration for smart reverse logistics management. In 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) (pp. 821-826). *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/SII52469.2022.9708743>
- Szczupak, L. (2022). The impact of 'industrial revolution 4.0' on logistics companies' operations. <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/104390>
- Tambare, P., Meshram, C., Lee, C. C., Ramteke, R. J., & Imoize, A. L. (2021). Performance measurement system and quality management in data-driven Industry 4.0: A review. *Sensors*, 22(1), 224. <https://doi.org/10.3390/s22010224>
- Taqi, H. M. M., Nayeem, I., Bari, A. M., Anam, M. Z., & Ali, S. M. (2025). Addressing challenges to cloud manufacturing in industry 4.0 environment using an integrated approach: Implications for sustainability. *Green Technologies and Sustainability*, 100166. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100166>
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does industry 4.0 mean to supply chain?. *Procedia manufacturing*, 13, 1175-1182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.191>
- Tseng, M. L., Bui, T. D., Lan, S., & Lim, M. K. (2024). Data-driven on reverse logistic toward industrial 4.0: an approach in sustainable electronic businesses. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 27(10), 1705-1741. <https://doi.org/10.1080/13675567.2023.2175804>
- vahidian, V. & davoodi, S. M. R. (2018). Identification and Prioritizing the Solutions of Reverse Logistics Applying Using a Hybrid Approach of Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS (Case Study: Isfahan's Mobarakeh Steel Company). *Iranian Journal of Trade Studies*, 22(86), 125-164. [In Persian]. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17350794.1397.22.86.5.4>
- Yan, B., Dong, Q., Li, Q., Yang, L., & Amin, F. U. (2022). A study on the interaction between logistics industry and manufacturing industry from the perspective of integration field. *PloS one*, 17(3), e0264585. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264585>
- Yang, D., Duan, W., & Chang, Q. (2008, December). The Evaluation on the Agility of Reverse Logistics System based on BP Neural Network. In 2008 International Seminar on Business and Information Management (Vol. 2, pp. 229-232). *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ISBIM.2008.90>