



## Towards Sustainability in Industry 5.0: Analysis of Drivers and Barriers to Implementing Circular Economy in the Petrochemical Industry Supply Chain

Hossein Shirazi<sup>1</sup>, Kaveh Alba<sup>2</sup>, Hossein Bakhtiari<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Correspondence: Assistant Prof., Department of Technology Management, Islamic Azad University, Qom Branch, Qom, Iran. Email Address: Hossein.Shirazi63@gmail.com

<sup>2</sup> PhD Student, Faculty of Management, Department of Technology Management, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran. Email Address: Kaveh.Alba@yahoo.com

<sup>3</sup> Master's Degree, Department of Management, Faculty of Economic and Administrative Sciences, University of Qom, Qom, Iran. Email Address: H.Bakhtiari.ac@gmail.com

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 16 March 2025

Received in revised form: 23 April 2025

Accepted: 6 September 2025

Available online: 21 November 2025

#### Keywords:

Circular Economy

Industry 5.0

Petrochemical Supply Chain

MICMAC Analysis

Interpretive Structural Modeling

### ABSTRACT

With the accelerating pace of globalization, companies operating within the petrochemical industry's supply chain strive to develop more complex, customer-centric, and sustainable supply chains. Amid this transformation, although Industry 4.0 has played a catalytic role in the transition from a linear economy to a circular economy, its prioritization of machines over humans has led to the neglect of some sustainability objectives. Industry 5.0, however, focuses on integrating technology with human values to achieve sustainable development goals. Combining the circular economy and Industry 5.0 leads to sustainable synergies across various industries. Nevertheless, implementing a circular economy is accompanied by both drivers and barriers. Accordingly, the present study aims to identify and analyze the drivers and barriers of implementing a circular economy in the petrochemical industry's supply chain, based on sustainability within the framework of Industry 5.0. In the first phase, the drivers and barriers were identified through a literature review. In this stage, three main drivers and four key barriers were validated by experts using the Delphi technique. In the next phase, the relationships among these drivers and barriers were identified using MICMAC software, and their hierarchical levels were determined through the Interpretive Structural Modeling (ISM) technique. Ultimately, a schematic model of the drivers and barriers to implementing a circular economy based on Industry 5.0 sustainability in the petrochemical supply chain was developed. Based on their influence and dependence, the identified barriers were classified into four clusters. The results indicated that design and engineering barriers, as well as social drivers, have a limited impact on implementing a circular economy. Technical barriers, which fall under the independent cluster, have a high level of influence. Notably, economic barriers and technological and economic drivers were categorized in the linkage cluster, indicating high levels of both influence and dependence, and therefore a substantial impact on circular economy implementation. In addition, logistics and supply chain barriers, which were placed at the top level, were identified as dependent variables with high dependence power. The findings of this study will be beneficial for stakeholders in the petrochemical supply chain in implementing a circular economy based on Industry 5.0. They will support managers in making more decisive choices regarding the selection, implementation, and evaluation of projects that employ sustainability and circular economy approaches in the supply chain. Ultimately, the results of this study can serve as a foundation for future empirical research aimed at supporting the effective implementation of a circular economy and facilitating the transition from a linear to a circular supply chain.

**Cite this article:** H. Shirazi, K. Alba, and H. Bakhtiari, "Towards Sustainability in Industry 5.0: Analysis of Drivers and Barriers to Implementing Circular Economy in the Petrochemical Industry Supply Chain," *Journal of Supply Chain Management*, vol. 27, no. 3, pp. 35-59, 2025. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089198.1404.27.88.1.7>



## Introduction

Resource scarcity, environmental risk increasing, human well-being, and social equity challenges have led to the growing importance of sustainability. In the past, industries operated based on a linear economy, which followed a one-way flow: the production process began with the selection of raw materials, continued through manufacturing, and ended with the final product, generating waste that had a negative impact on the environment. In contrast, the circular economy (CE) follows a closed-loop system that maximizes resource utilization through recycling, reuse, and recovery. The circular economy helps managers reduce waste, increase efficiency, and protect the environment by minimizing pollution.

The CE concept emphasizes three main domains: sustainability, resilience, and human-centricity. When environmental concerns are incorporated into supply chain operations, the system is referred to as a circular supply chain. A circular supply chain can be defined as the integration of environmental thinking into supply chain management, including product design, material selection and sourcing, manufacturing processes, delivery of the final product to consumers, and end-of-life management.

Adopting circular supply chain management requires a paradigm shift. It is estimated that the benefits of the circular economy will reach approximately €1.8 trillion annually by 2030. Although Industry 4.0 has acted as a catalyst in transitioning from a linear to a circular economy, its machine-centered approach has often overlooked specific sustainability objectives. Industry 5.0, however, focuses on combining advanced technologies with human values to achieve sustainable development goals. The integration of the circular economy with Industry 5.0 can create synergistic sustainability across various industries. Nevertheless, implementing the CE involves both drivers and barriers, a gap this study aims to address.

Accordingly, the objectives of this research are:

- (a) To identify the main drivers and barriers to implementing the circular economy in the petrochemical supply chain;
- (b) To analyze and visualize the interrelationships among these drivers and barriers; and
- (c) To propose practical strategies to overcome barriers and leverage drivers for CE implementation in the petrochemical sector

## Methodology

This study is applied in nature and follows a descriptive and mixed-methods (qualitative–quantitative) approach.

In the qualitative phase, experts' opinions and experiences were gathered through interviews and discussion sessions to identify key factors and their relationships. In the quantitative phase, the interrelationship and reachability matrices were constructed based on the collected data, and factor-leveling was performed using mathematical computations.

A four-step approach was employed to identify and analyze the drivers and barriers to circular economy implementation in the petrochemical supply chain under the Industry 5.0 framework:

1. Identification Phase: Drivers and barriers were identified through a comprehensive literature review and prior studies. This step ensured the relevance and completeness of variables aligned with the study's objectives. Expert interviews and focus groups were used to refine the list of critical factors.
2. Validation Phase: Data were collected through expert interviews to validate the identified factors. A pilot test of the first-round Delphi questionnaire was conducted with three experts, and their feedback was incorporated to refine the questionnaire. The target population included

academic researchers and senior managers in the petrochemical industry with relevant experience. The snowball sampling technique was applied, and data collection continued until theoretical saturation was achieved.

3. Structural Modeling Phase: A Structural Self-Interaction Matrix (SSIM) was developed to define the type and direction of relationships. The matrix was then transformed into an initial reachability matrix, levels were determined, and the final ISM model was drawn.

4. MICMAC Analysis Phase: Finally, a MICMAC cluster diagram was developed to display the driving power and dependence of each factor. MICMAC analysis explores interactions among variables and categorizes them into clusters represented in a graphical map.

### Findings

A review of the literature and expert evaluations using the Delphi method led to the identification and validation of the main drivers and barriers influencing circular economy implementation in the petrochemical supply chain.

Drivers were grouped into three categories: technological, economic, and social.

Barriers were classified into four categories: design and engineering, technical, logistical and supply chain, and economic.

After determining the interrelations and hierarchical levels, a schematic ISM model was developed to visualize the structure of drivers and barriers. The Consistency Ratio (CR) of the final reachability matrix was below 0.1 for all relationships, confirming the logical coherence of the model.

## Discussion and Conclusion

This study provides a comprehensive analysis of the drivers and barriers influencing the implementation of the circular economy in the petrochemical industry and presents a framework for better understanding the opportunities and challenges of this transition. Using Delphi, ISM, and MICMAC methods, three main drivers and four key barriers were identified and categorized into three hierarchical levels:

1. Technological and Economic Level: Key drivers such as chemical recycling, mechanical recycling, and nanotechnology enhance efficiency and reduce costs. However, high technological costs, infrastructure requirements, and financial constraints remain significant challenges.

2. Social and Design/Engineering Level: Social support, consumer demand for recycled products, and governmental policies act as enablers. Conversely, product redesign and process optimization for recycling alignment demand advanced engineering expertise and substantial resources.

3. Logistical and Supply Chain Level: Challenges in transportation, storage, material collection, and supply chain transparency complicate CE implementation.

The MICMAC analysis grouped the identified factors into four clusters:

Autonomous: Low influence and dependence (e.g., social drivers, design and engineering barriers).

Dependent: Highly dependent but weak drivers (e.g., logistical and supply chain barriers).

Linkage: Strongly influencing and dependent (e.g., economic and technical drivers/barriers).

Independent: High driving power with low dependence (e.g., technical barriers).

Overall, the findings suggest that focusing on low-level drivers and barriers (technical and economic) can have the most significant impact on facilitating circular economy implementation within the petrochemical industry.

## به سوی پایداری در صنعت ۵/۰: تحلیل پیشران‌ها و موانع پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره

### تامین صنعت پتروشیمی

حسین شیرازی<sup>۱\*</sup>، کاوه آلبا<sup>۲</sup>، حسین بختیاری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مدیریت تکنولوژی، دانشکده مدیریت، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: Hossein.Shirazi63@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مدیریت، گروه مدیریت تکنولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران. رایانامه: Kaveh.Alba@yahoo.com

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد گروه مدیریت، دانشکده علوم اقتصادی و اداری، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: H.Bakhtiari.ac@gmail.com

#### مشخصات مقاله

##### تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

##### کلیدواژه‌ها:

اقتصاد مدور

صنعت ۵/۰

زنجیره تامین پتروشیمی

تحلیل MICMAC

مدلسازی ساختاری تفسیری

#### چکیده

با سرعت فزاینده جهانی شدن، شرکت‌های فعال در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی به دنبال دستیابی به زنجیره تامین پیچیده‌تر، مشتری‌محور و پایدارتر هستند. در این میان، اگرچه صنعت ۴/۰ نقش کانالیوری در گذار از اقتصاد خطی به اقتصاد مدور ایفا کرده است، اما با اولویت دادن به ماشین‌ها بر انسان، برخی از اهداف پایداری نادیده گرفته می‌شوند. صنعت ۵/۰ بر ترکیب فناوری با ارزش‌های انسانی به منظور دستیابی به اهداف توسعه پایدار تمرکز دارد و ادغام اقتصاد مدور و صنعت ۵/۰ منجر به هم‌افزایی پایدار در صنایع مختلف می‌شود. با این حال، اجرای اقتصاد مدور همواره پیشران‌ها و موانعی را به همراه دارد. بنابراین، هدف پژوهش حاضر شناسایی و تحلیل پیشران‌ها و موانع اجرای اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی مبتنی بر پایداری در صنعت ۵/۰ می‌باشد. بدین منظور، در مرحله اول پیشران‌ها و موانع با استفاده از مرور ادبیات شناسایی شدند. در این بخش سه پیشران اصلی و چهار مانع کلیدی توسط کارشناسان و متخصصان با استفاده از روش دلفی تأیید شد. در مرحله بعد، روابط میان این پیشران‌ها و موانع در قالب نرم‌افزار MICMAC شناسایی و سطوح آن‌ها با استفاده از روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری تعیین شد. در نهایت، یک مدل شماتیک از پیشران‌ها و موانع اجرای اقتصاد مدور مبتنی بر پایداری صنعت ۵/۰ در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی ترسیم شد. بر اساس وابستگی و نیروی پیشران، موانع شناسایی شده به چهار خوشه تقسیم شدند. نتایج نشان داد که موانع طراحی و مهندسی و پیشران‌های اجتماعی تأثیر کمی بر اجرای اقتصاد مدور دارند. موانع فنی نیز در خوشه مستقل قرار دارند و نفوذ بالایی دارند. شایان ذکر است موانع اقتصادی و پیشران‌های فناوری و اقتصادی نیز در خوشه پیوندی قرار دارند. این موانع قدرت نفوذ و وابستگی بالایی دارند و می‌توانند بر اجرای اقتصاد مدور تأثیر بگذارند. علاوه بر این، موانع لجستیک و زنجیره تامین که در سطح بالایی قرار گرفتند به عنوان متغیرهای وابسته شناخته می‌شوند که قدرت وابستگی بالایی دارند. یافته‌های مطالعه حاضر برای ذینفعان زنجیره تامین پتروشیمی در استقرار اقتصاد مدور مبتنی بر صنعت ۵/۰ مفید خواهد بود و به مدیران در تصمیم‌گیری قاطع‌تر در انتخاب، اجرا و ارزیابی پروژه‌هایی که از رویکردهای پایداری و اقتصاد مدور در زنجیره تامین استفاده می‌کنند، کمک می‌کند. در نهایت، نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای تحقیقات تجربی آینده در راستای حمایت از پیاده‌سازی کارآمد اقتصاد مدور و امکان‌گذار از زنجیره تامین خطی به یک زنجیره تامین مدور باشد.

**استناد:** شیرازی، حسین، آلبا، کاوه، بختیاری، حسین، "به سوی پایداری در صنعت ۵/۰: تحلیل پیشران‌ها و موانع پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره

تامین صنعت پتروشیمی"، نشریه مدیریت زنجیره تامین، دوره ۱۶، شماره ۸۸، صفحات ۵۹-۳۵، ۱۴۰۴.

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089198.1404.27.88.2.8>

## ۱- مقدمه

ریختن)، از مواد تازه برای تولید استفاده می‌شود و سپس محصولات نهایی به مشتریان تحویل داده می‌شود و در نهایت به عنوان مواد زائد دفع می‌شوند [۹]. مفهوم اقتصاد مدور پس از گنجاندن آن در اهداف توسعه پایدار توسط سازمان ملل متحد محبوبیت بیشتری به دست آورد. اقتصاد مدور مفهومی است که حداکثر استفاده از منابع را از طریق روش‌های «بازیافت، استفاده مجدد و بازیابی» ترویج می‌کند [۱۰]. در سناریوی تجاری فعلی، اقتصاد مدور توسط بسیاری از بخش‌های تولیدی اجرا می‌شود، زیرا اقتصاد مدور سیستمی است که به مدیریت کمک می‌کند تا ضایعات را کاهش دهد و بهره‌وری را افزایش دهد، که هم برای جامعه مفید است و هم از محیط زیست با کاهش آلودگی محافظت می‌کند [۱۱]. بازیافت و دفع، بخش‌های اساسی اقتصاد مدور برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار برای شرکت‌ها و جوامع هستند [۱۲]. بیشتر توجه فعلی در مورد اقتصاد مدور ناشی از تأثیر آن بر توسعه پایدار مانند کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، ایجاد منافع اقتصادی و حتی ایجاد شغل و عملکرد پایدار است [۱۲]. بنابراین در اقتصاد مدور به شناسایی سه حوزه اصلی پرداخته می‌شود که ممکن است در چشم‌انداز تحقیق و توسعه تولید در طی ۱۰ تا ۱۵ سال آینده نقش مهمی داشته باشند: (۱) پایداری: کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، کاهش ضایعات و استفاده مجدد و بازیافت بیشتر مواد در اقتصاد مدور؛ (۲) انعطاف‌پذیری: فرآیندها و کارخانه‌های قوی‌تر برای توسعه و بکارگیری در زنجیره‌های تامین انعطاف‌پذیرتر. (۳) رویکرد انسان‌محور: منافع انسانی کانون اصلی تولید است، فناوری به کارگران در صنعت کمک می‌کند و مهارت‌ها و دانش خود را ارتقا می‌دهند [۱۳]. تخمین زده می‌شود که مزایای اقتصاد مدور تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۱/۸ تریلیون یورو در سال خواهد رسید [۱۴].

علاوه بر این، از هم‌پاشیدگی عمودی شرکت‌ها پیچیدگی مدیریت را از نظر زمان، کیفیت و افزایش عدم اطمینان در بازارها افزایش داده است و امروزه رقابت‌پذیری موثر شرکت‌ها در صورت جدا شدن از تامین‌کنندگان و سایر ذینفعان، غیرممکن شده است [۱۴]. پارادایم اقتصاد مدور شامل یک راه حل ممکن برای دستیابی به اهداف زیست‌محیطی و پایداری اقتصادی از طریق ایجاد تغییرات سیستمی است که فراتر از یک شرکت است و سایر بازیگران در زنجیره تامین را درگیر می‌کند و به ایجاد ارزش افزوده در محصول و یا خدمات کمک می‌کند [۱۵]. در نتیجه، اقتصاد مدور را می‌توان در راستای به حداقل رساندن استفاده از منابع و کاهش تولید زباله در یک محیط تولیدی با تکنولوژی بالا برای مدیریت منابع پایدار

برنامه فناوری پیشرفته آلمان در سال ۲۰۱۱، انقلاب صنعتی چهارم<sup>۱</sup> (صنعت ۴/۰) را پیش‌بینی کرد که می‌توانست به کمک ترکیب چندین مفهوم پیشرفته با فناوری‌های دیجیتال، صنعت را متحول کند. صنعت ۴/۰ با فناوری‌های دیجیتال مخربی شناخته می‌شود که شیوه طراحی، توسعه، تولید محصولات و خدمات کسب‌وکارها را تغییر می‌دهد [۱]. فناوری‌های صنعت ۴/۰ تولیدکنندگان را قادر می‌سازد تا بهره‌وری، اثربخشی و کارایی هزینه را افزایش دهند، خود را از رقابتی خود متمایز کنند و خدمات، تحویل و کیفیت را بهبود بخشند [۲]. به علاوه، این فناوری‌ها سازمان‌ها را قادر می‌سازند تا از طریق دگرگونی فرآیندهای تجاری عملکرد خود را بهبود بخشند [۱]. با این حال، در شرایطی که صنعت ۴/۰ اهداف تولید پایدار را در نظر نمی‌گرفت، انقلاب صنعتی پنجم<sup>۲</sup> (صنعت ۵/۰) برای تسهیل مشارکت انسان‌ها و پایداری معرفی شد [۳]. صنعت ۵/۰ که توسط کمیسیون اروپا در سال ۲۰۲۱ توسعه یافت، طرحی برای صنعت انعطاف‌پذیر، پایدار و انسان‌محور است که مبتنی بر ایجاد یک تغییر اساسی در پارادایم صنعت ۴/۰ است [۱]. هدف صنعت ۵/۰ تکمیل اهداف توسعه پایدار<sup>۳</sup> سازمان ملل متحد و در راستای دستیابی به رویکردی جامع در پایداری، تاب‌آوری، رشد اقتصادی و حفاظت از محیط زیست است [۴]. انتقال از صنعت ۴/۰ به صنعت ۵/۰ شامل حرکت به یک سیستم اقتصاد مدور<sup>۴</sup> است که بر استفاده مجدد از منابع و کاهش ضایعات تمرکز دارد [۵]. صنعت ۵/۰ با استفاده از فناوری‌های دیجیتال، صنعت ۴/۰ را در مسیر رشد پایدار حمایت می‌کند تا به کمک اقتصاد مدور، نوآوری فنی و پایداری محیطی را به سطح جدیدی برساند [۴]. بنابراین، صنعت ۵/۰ قصد دارد فرآیندهای تولید را مدور کند که اصول آن عبارتند از: استفاده مجدد، بازیافت منابع طبیعی و به حداقل رساندن زباله و آلودگی [۶]. بر این اساس، پارادایم جدید از اهداف فرآیندمحور به اهداف ارزش‌محور تکامل یافت و هدف آن کاهش مواد زائد و دخالت تأثیرات اجتماعی در تولیدات است [۷].

هدف اقتصاد مدور کاهش هدر رفت منابع بکر و محصولات نهایی و در عین حال بهبود نرخ بازیابی و کارایی منابع است [۸]. در مقابل، در اقتصاد خطی (برداشتن، ساختن، استفاده کردن، دور

<sup>1</sup> Industry 4.0

<sup>2</sup> Industry 5.0

<sup>3</sup> Sustainable Development Goals

<sup>4</sup> Circular Economy

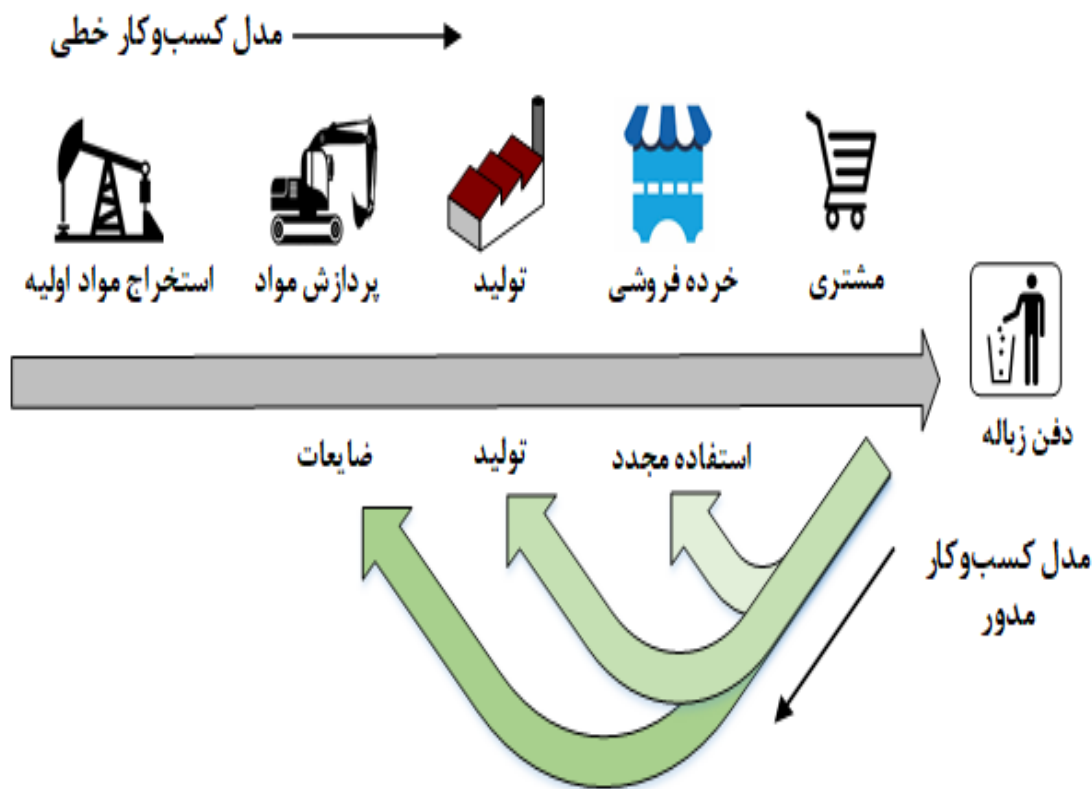
تحلیل پیشران‌ها و موانع و تجسم این روابط پیچیده. (ج) ارائه راهکارهای عملیاتی و استراتژی غلبه بر موانع و استفاده از پیشران‌ها برای پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی. نتیجه این تحقیق به مدیران کمک می‌کند تا اقدامات یا راهبردهای مناسبی برای استفاده بهینه از منابع برای اجرای طرح‌های اقتصاد مدور اتخاذ کنند.

## ۲- ادبیات نظری و پیشینه تجربی

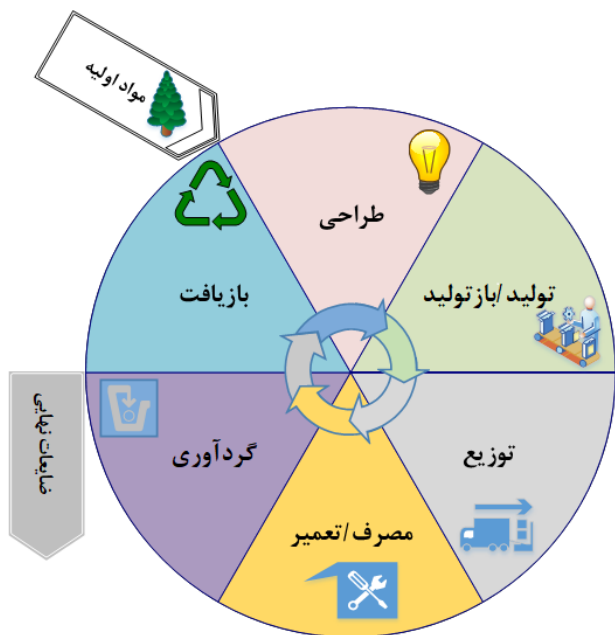
### ۲-۱- گذر از اقتصاد خطی به اقتصاد مدور

کمبرود منابع، افزایش خطرات زیست محیطی، رفاه انسان و چالش‌های برابری اجتماعی، مسئله روندهای پایداری در جوامع را مطرح کرده است [۲۴]. در این شرایط، عدم قطعیت اقتصادی و تأثیر منفی اقتصاد خطی سنتی مبتنی بر برداشت و دفع منابع، نیاز به گذار به سوی اقدامات پایدار نوآورانه را برانگیخته است [۲۵]. در گذشته، صنایع از اقتصاد خطی استفاده می‌کردند که مسیر را در یک خط مستقیم دنبال می‌کرد، در یک سیستم اقتصاد خطی، ایجاد محصولات از انتخاب ماده خام شروع می‌شود، سپس فرآیند تولید را طی می‌کند و حاصل محصول نهایی است که به دست آورده می‌شود، اما در طی این فرآیند مواد زائد تولید می‌شود که باید در زباله‌دانی ریخته شوند. این مساله منجر به تاثیرگذاری منفی بر محیط زیست می‌شود [۲۶]. در اقتصاد خطی، ماده اولیه به محصول تبدیل می‌شود و در فرآیند تولید، مواد زائد نیز تولید می‌شود که این مواد غیر قابل استفاده هستند. اما در اقتصاد مدور، چرخه از یک حلقه بسته پیروی می‌کند [۱۱]. شکل (۱) مدل کسب و کار اقتصاد خطی و مدل کسب و کار اقتصاد مدور را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، اقتصاد خطی یک حلقه باز ارائه می‌دهد که در آن چرخه عمر محصول با استخراج منابع و سپس دفع محصول مورد استفاده در محیط شروع می‌شود [۲۷]. در حالی که اقتصاد مدور یک حلقه بسته است که از اصل 3R (کاهش - استفاده مجدد - بازیافت) پیروی می‌کند. در این مفهوم تولید زباله بسیار کمتر است؛ زیرا دوباره در فرآیند تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد و آسیب کمتری به محیط زیست وارد می‌کند [۲۶]. اقتصاد مدور به عنوان یک اقتصاد پراکنده با یک حلقه مواد بسته دیده می‌شود. جایی که زباله‌ها دوباره به چرخه تولید بازگردانده می‌شوند یا به عنوان یک محصول جانبی - که از ابتدای سیستم به چرخه بازگردانده می‌شود - در نظر گرفته می‌شود [۲۸].

استفاده کرد [۱۶]. پیاده‌سازی اقتصاد مدور نیازمند همکاری تولیدکنندگان، تامین‌کنندگان و مشتریان است. اقتصاد مدور دیدگاه منحصر به فردی را در مورد ساختارهای عملیاتی و اداری برای بازیابی کالاهای استفاده شده و ضایعات ارائه می‌دهد. پیاده‌سازی اقتصاد مدور با "استراتژی به اشتراک‌گذاری اطلاعات" مناسب به دستیابی به برتری عملیاتی (به عنوان مثال انتشار و توزیع مجدد محصولات بازیافتی، بازگشت محصول، استفاده مجدد از محصول و غیره) در عملیات زنجیره تامین کمک می‌کند [۱۷]. بنابراین، فرآیند مدیریت زنجیره تامین را می‌توان با ترکیب مفاهیم اقتصاد مدور بهبود بخشید. علاوه بر این، می‌توان با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته انقلاب صنعتی چهارم مانند هوش مصنوعی، رباتیک و اینترنت اشیا، اثربخشی و پایداری مدیریت زنجیره تامین را افزایش داد [۱۸]. با این حال، به گفته منتقدان، مرزهای مبهم اقتصاد مدور و موانع پیاده‌سازی، مطالعه جنبه‌های اجرایی آن را از دیدگاه‌های مختلف ضروری می‌کند [۱]. پژوهش [۱۹] نشان داد علی‌رغم اینکه اقتصاد مدور به عنوان راه‌حلی برای پایداری شناخته می‌شود، چالش‌های اجرای آن دست کم گرفته می‌شود. همچنین پژوهش [۲۰] نشان داد که اقتصاد مدور بر اساس یک دستور کار فنی و اقتصادی غیر واقعی است که منجر به عدم اطمینان می‌شود. علاوه بر این پژوهش [۲۱] نشان داد که دیدگاه‌های اقتصاد مدور توسط مداخلات صنعت، سیاست‌ها و تعاملات آنها شکل می‌گیرد. شیوه‌های اقتصاد مدور بدون مرزهای مشخص و جنبه‌های اجرای سیاست پدیدار شده است که آن را به موضوعی جذاب برای مطالعه تبدیل می‌کند [۲۲]. اگرچه کار زیادی روی زنجیره‌های تامین پایدار انجام شده است، رابطه بین اقتصاد مدور و زنجیره تامین در صنعت ۵۰٪ هنوز نیاز به بررسی دارد، به ویژه برای شناسایی روش‌ها و ابزارهایی که باید در سراسر زنجیره تامین برای حمایت از پیاده‌سازی کارآمد اقتصاد مدور و امکان‌گذار "کامل" از یک زنجیره تامین خطی به مدور به دلیل افزایش پیچیدگی آن اتخاذ شوند [۱۵]. محققان در حال بررسی پیشران‌ها و موانع مختلف برای پیاده‌سازی اقتصاد مدور در هر صنعت یا زنجیره تاملینی هستند [۲۳]. با این حال، مطالعات و شواهد تجربی کمیاب است. این امکان وجود دارد که زنجیره تامین پتروشیمی بتواند اثرات منفی زیست‌محیطی خود را کاهش دهد و با پذیرش صنعت ۵۰٪ و اقتصاد مدور به بخش پایداری تبدیل شود. این شکافی است که پژوهش حاضر قصد دارد به آن بپردازد. بنابراین، اهداف پژوهش حاضر عبارتند از: (الف) شناسایی پیشران‌ها و موانع اصلی برای پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی. (ب)



شکل (۱): مدل کسب و کار خطی و مدور [۲۸]



شکل (۲): مدل اقتصاد مدور [۱۱]

با توجه به شکل (۲)، یک اقتصاد مبتنی بر یک مدل مدور، تفکر پایان عمر را با استفاده مجدد جایگزین می‌کند، منابع پایدار را اولویت‌بندی می‌کند، مواد خطرناک را حذف می‌کند، استفاده مجدد را ترویج می‌کند و ضایعات را با بهینه‌سازی محصولات، فرآیندها و سامانه‌ها کاهش می‌دهد [۳۳]. در نتیجه، اقتصاد مدور شامل همه

مفهوم اقتصاد مدور یک نظریه نیست، بلکه روشی برای تولید و مصرف کالاها است که باعث ایجاد علاقه و هیجان می‌شود، زیرا می‌تواند به ایجاد یک چارچوب جدید برای مقابله با انبوهی از مشکلات کمک کند [۱]. مفهوم اقتصاد مدور ابتدا در پژوهش [۲۹] به عنوان اقتصادی تعریف شد که در آن ضایعات تولید شده از یک فرآیند به عنوان ماده اولیه برای فرآیند دیگر استفاده یا بازیافت می‌شود. یک تعریف به طور گسترده پذیرفته شده از اقتصاد مدور که توسط محققان ارائه شده است، به تولید صنعتی احیا کننده یا پایدار اشاره دارد [۱۱]. اعتقاد بر این است که مفهوم اقتصاد مدور مجموعه‌ای از دیدگاه‌های کل نگر مختلف است که هدف آن دستیابی به جامعه‌ای پایدار و بدون زباله است [۳۰]. بنیاد الن مک آرتور پیشنهاد کرد که طرح‌های جدید و رویه‌های پیشرفته باید با استفاده مجدد از محصولات دور ریخته شده، به جای آوردن منابع جدید در هر بار چرخه معرفی شوند [۳۱]. اقتصاد مدور یک تغییر پارادایم در شیوه عملکرد تولیدکنندگان است که هدف آن جلوگیری از تهی شدن منابع و افزایش بهره‌وری منابع و انرژی است [۳۲]. تمرکز اصلی اقتصاد مدور، تاکید بر به حداقل رساندن هزینه‌ها و ایجاد مسیری برای ارزش بیشتر است [۲۷]. جنبه‌های مختلف اقتصاد مدور در طول عمر محصول در شکل (۲) خلاصه شده است.

[۳۶، ۳]. بنابراین، صنعت ۵/۰ مبتنی بر فناوری های صنعت ۴/۰ است، در حالی که بر تعامل انسان و ماشین، پایداری و اقتصاد مدور متمرکز است و مفهومی از صنعت را ترویج می کند که فراتر از مدل ساده اقتصادی سود است و موجب رونق پایدار می شود [۳۹].

### ۲-۳- اقتصاد مدور در زنجیره تامین

زنجیره تامین شامل هماهنگی، برنامه ریزی و کنترل محصولات و خدمات از طریق فعالیت های یکپارچه بین تامین کنندگان و مشتریان است [۱۵]. رشد جمعیت مرتبط با توسعه اقتصادی منجر به تغییراتی در انواع تولید و مصرف شده و زنجیره های تامین را به طور فزاینده ای وابسته و ناپایدار کرده است [۴۰]. رقابت فزاینده بازار، تغییرات محیطی، فشار عمومی و قوانین زیست محیطی نیاز سازمان ها را به تغییر عملیات سامانه های تولیدی خود برای اطمینان از همزیستی توسعه صنعتی و حفاظت از محیط زیست ایجاد کرده است [۴۱]. برای اینکه این تغییرات اتفاق بیفتد، لازم است ساختار اساسی زنجیره های تامین را مجدداً تعریف نمود تا مسائل زیست محیطی را در بر گیرد [۴۲]. همان طور که توسط ادبیات اقتصاد مدور توصیه می شود، اولین گام این تغییر، گذر از یک زنجیره تامین خطی به یک حلقه بسته است. هنگامی که نگرانی زیست محیطی زنجیره های تامین در عملیات آنها لحاظ شود، به عنوان یک زنجیره تامین مدور شناخته می شوند. مدیریت زنجیره تامین مدور را می توان به عنوان ادغام تفکر زیست محیطی با مدیریت زنجیره تامین، از جمله طراحی محصول، انتخاب مواد و تامین، فرآیندهای تولید، تحویل محصول نهایی به مصرف کنندگان و مدیریت کل چرخه عمر محصول، حتی پس از پایان عمر مفید آن تعریف کرد [۴۱]. پذیرش مدیریت زنجیره تامین مدور نیازمند یک تغییر پارادایم است. به طور دقیق تر، سازمان ها باید نگاه به مسائل زیست محیطی را به عنوان محدودیت های بیرونی که هزینه های عملیاتی و کاهش رقابت پذیری شان را به سازمان ها تحمیل می کنند را متوقف کنند و در عوض به آنها به عنوان فرصتی برای تولید منافع اقتصادی و مالی و بهبود عملکرد نگاه کنند [۴۳]. برای دستیابی به این هدف، چندین روش باید اتخاذ شود، از جمله: (۱) پروژه های مدور: طراحی محصولات و عملیات در زنجیره تامین با در نظر گرفتن حفاظت از محیط زیست و سلامت در طول چرخه عمر محصول، (۲) لجستیک معکوس (برنامه ریزی و کنترل جریان مواد خام، موجودی ها و محصولات از نقطه مصرف تا نقطه مبدا برای بازپس گیری ارزش یا اطمینان از دفع مناسب)، (۳) عملیات بازیافت و

فعالیت ها، از استخراج تا تولید و تحویل است و به گونه ای تنظیم می شود که اطمینان حاصل شود ضایعات یک تجارت، به منبعی برای تجارت دیگری تبدیل می شود [۳۴]. در حلقه بسته، حفظ منابع بسیار آسان تر است، زیرا مواد ضایعاتی مجدداً استفاده می شوند، همچنین زمانی که محصولات به چرخه عمر پایانی خود می رسند، می تواند مجدداً استفاده شود [۱۱]. پژوهش [۳۵] نشان داد که اقتصاد مدور به عنوان یک استراتژی در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه استفاده می شود، زیرا شناسایی پیشران ها و موانع برای اجرای اقتصاد مدور مزایای متنوعی را برای توسعه به همراه خواهد داشت.

### ۲-۲- صنعت ۵/۰ و اقتصاد مدور

یک دهه پس از ظهور صنعت ۴/۰، کمیسیون اروپا به طور رسمی از ابتکار جدید خود (صنعت ۵/۰) در سال ۲۰۲۱ رونمایی کرد [۳]. صنعت ۵/۰ مکمل صنعت ۴/۰ است و بر اهمیت همسویی کسب و کارها با ارزش های اجتماعی و صنایع انسان محور پایدار و انعطاف پذیر مبتنی بر دیجیتالی سازی صنعت ۴/۰ تأکید می کند. علاوه بر این، انسانی محوری، پایداری و انعطاف پذیری را در حوزه های تکنولوژیکی، اجتماعی و زیست محیطی ترکیب می کند [۳۶]. در حالی که صنعت ۴/۰ به ماشین ها، فرآیندها و سیستم های به هم پیوسته برای بهینه سازی عملکرد اشاره می کند، صنعت ۵/۰ شامل تعاملات مشترک بین انسان و ماشین برای افزایش کارایی و پایداری است [۳۷]. صنعت ۵/۰ انتظارات صنعت ۴/۰ را با تمرکز بیشتر بر پایداری، شیوه های اخلاقی و مسئولیت پذیر اجتماعی و ادغام بیشتر بین انسان ها و فناوری ترکیب می کند. برخلاف صنعت ۴/۰ که بر سودآوری کوتاه مدت و ایجاد ارزش سهام داران تمرکز دارد، هدف صنعت ۵/۰ ارتقای پایداری بلندمدت و ایجاد ارزش سهام داران است [۳۸]. همچنین انگیزه جدیدی را برای تکامل اقتصاد مدور از طریق پذیرش فناوری های دیجیتالی پیشرفته ایجاد می کند. در حالی که اقتصاد مبتنی بر مدل های دیجیتال بر اتوماسیون، فرآیندهای تولید منطقی، کارایی و کاهش هزینه ها تأکید دارد، اقتصاد مبتنی بر مدل مدور بر استفاده مجدد، بازیافت و کاهش ضایعات تمرکز دارد؛ زیرا اقتصاد مدور عمدتاً بر روی R6 (شناسایی، تجدید نظر، تحقق، کاهش، استفاده مجدد و بازیافت) برای همسو کردن سازمان ها و جامعه با پایداری تمرکز دارد [۱]. با ترکیب این دو رویکرد، هدف صنعت ۵/۰ دستیابی به فرآیندهای تولید کارآمدتر و پایدارتر است

پایدار از طریق ساختار مدور و پایدار خود، مدیریت عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را به طور بهینه متعادل می‌کند [۴۸].

## ۲-۵- زنجیره تامین پتروشیمی

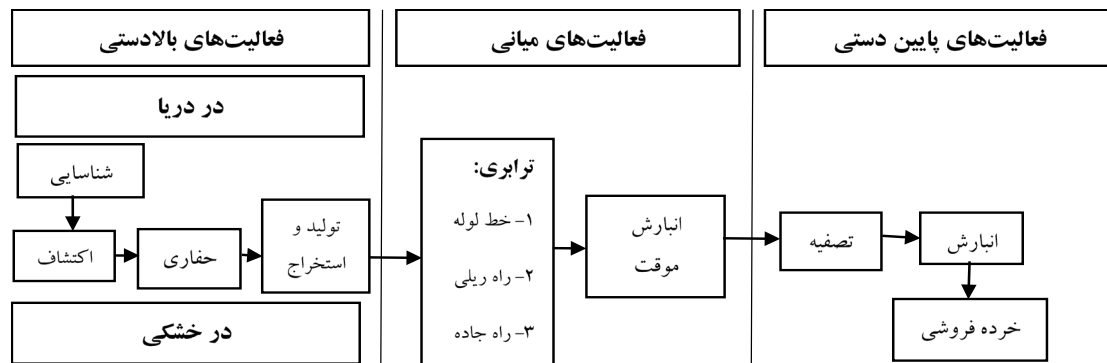
مدیریت زنجیره تامین در صنعت پتروشیمی عبارت است از هماهنگی و بهبود مستمر عملیات سازماندهی شده و به سه بخش عملکردی، یعنی بالادست، میان‌دست و پایین‌دست طبقه‌بندی می‌شود. "بالادست" و "پایین‌دست" اصطلاحات تجاری عمومی هستند که به موقعیت یک شرکت نفت یا گاز در زنجیره تامین اشاره می‌کنند. هر چه یک عملکرد یا شرکت به کاربر نهایی نزدیک تر باشد، گفته می‌شود که پایین‌دست تر است. استخراج یا تولید مواد خام عناصری از زنجیره تامین هستند که به عنوان بالادست در نظر گرفته می‌شوند [۴۹]. بخش بالادستی زنجیره تامین نفت بر اساس فعالیت‌های اکتشاف و تولید مربوط به یافتن ذخایر نفت و گاز است. شرکت‌های بالادستی ذخایر نفت و گاز طبیعی را شناسایی کرده و به استخراج این منابع از زیرزمین می‌پردازند. زنجیره تامین نفت میانی شامل پردازش، ذخیره‌سازی و حمل و نقل نفت خام به پالایشگاه‌ها می‌شود، جایی که به محصولات قابل فروش تبدیل می‌شود. در نهایت، پالایشگاه‌ها عنصر پایین‌دستی زنجیره تامین نفت و گاز را نشان می‌دهند. بخش پایین‌دستی یک تجارت متفاوت است، زیرا فعالیت‌های پایین‌دستی ارزش افزوده را از طریق فرآیند پالایشگاه ایجاد می‌کند و محصولات متعددی را برای مصرف‌کنندگان خود فراهم می‌کند. همه این بخش‌های زنجیره تامین نفت به طور همزمان با جریان محصولات، سرمایه و اطلاعات سروکار دارند. این فرآیند نیازمند یک رویکرد زنجیره تامین یکپارچه برای حل مشکلات در کل زنجیره و بهبود کارایی شبکه‌های زنجیره تامین پیچیده است [۵۰]. زنجیره ارزشی که از فروشنده تا مشتری نهایی را پوشش می‌دهد، زنجیره تامین نامیده می‌شود و یکپارچه‌سازی و هماهنگی فرآیندهای کسب و کار با هدف پاسخ به تغییرات تقاضاهای مشتریان نهایی در سراسر زنجیره تامین انجام می‌شود [۵۱]. شکل (۳) ساختار شماتیک زنجیره تامین در صنعت پتروشیمی را به تصویر کشیده است. همچنین در ادامه خلاصه‌ای از مهم‌ترین پژوهش‌های داخلی مرتبط با عنوان پژوهش در جدول (۱) آورده شده است

تولید مجدد: بازیابی، استفاده مجدد و اصلاح محصولات و بسته‌بندی، (۴) مدیریت زباله و به حداقل رساندن آن و (۵) جایگزینی مواد یا فرآیندهای خطرناک با مواد کم خطر [۴۴].

## ۲-۴- مدیریت زنجیره تامین حلقه بسته پایدار<sup>۱</sup>

مدیریت زنجیره تامین یک رویکرد مدیریتی جامع برای یکپارچگی و هماهنگی جریان مواد، اطلاعات و امور مالی در امتداد زنجیره تامین است. با در نظر گرفتن یک زنجیره تامین رو به جلو، محققان مدیریت زنجیره تامین را فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل عملیات زنجیره تامین به شیوه‌ای مؤثر تعریف کرده‌اند. علاوه بر این، لجستیک معکوس و مدیریت ضایعات به عنوان یکی از فرآیندهای مهم در زنجیره‌های تامین در نظر گرفته می‌شود. امروزه برای پرداختن به اهداف توسعه پایدار، مفهوم مدیریت زنجیره تامین پایدار تعریف شده است که منجر به در نظر گرفتن همزمان عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی می‌شود [۴۵]. یکی از شیوه‌های نوظهور در زنجیره‌های تامین پایدار، اقتصاد مدور است که نیاز به سطح بالایی از یکپارچگی دارد و به عنوان زنجیره‌های تامین حلقه بسته شناخته می‌شوند. در حالی که مدیریت زنجیره‌های تامین پایدار عموماً بر بهینه‌سازی عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی متمرکز است، زنجیره‌های تامین پایدار حلقه بسته نه تنها به اقتصاد مدور، بلکه به پایداری اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی مبتنی بر ساختار مدور خود نیز توجه دارند. بنابراین، یک زنجیره تامین پایدار حلقه بسته، تمام ویژگی‌های یک زنجیره تامین پایدار را نیز در بر می‌گیرد. ایده اصلی در این دیدگاه این است که از طریق راهبردهایی مانند بازیافت و به حداقل رساندن انتشار کربن، ضمن کاهش هزینه‌های تولید و افزایش حاشیه سود، از محیط زیست محافظت شود و در نتیجه ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی پایداری را منعکس کند [۴۶]. زنجیره‌های تامین پایدار حلقه بسته به لطف ساختار مدور خود، با بازگرداندن محصولات دور ریخته شده به زنجیره تامین از طریق فرآیندهایی مانند تعمیر، فروش مجدد یا جداسازی قطعات، ضایعات را کاهش می‌دهند [۴۷]. مدیریت زنجیره تامین حلقه بسته پایدار شامل اهداف اجتماعی زیربنایی مربوط به شیوه‌های کار، فرصت‌های شغلی، رفاه اجتماعی، توسعه اجتماعی و رضایت مشتری بدون غفلت از خواسته‌های اقتصادی و زیست‌محیطی است. یک زنجیره تامین مدور

<sup>۱</sup> Sustainable Closed-Loop Supply Chain Management



شکل (۳): اجزاء زنجیره تامین صنعت پتروشیمی [۴۹]

جدول (۱): خلاصه‌ای از مهم‌ترین تحقیقات داخلی مرتبط با موضوع پژوهش

منبع	عنوان	نتایج
[۵۲]	تحلیلی بر موانع پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ۴/۰ در زنجیره تامین: رویکرد فراترکیب و دنپ فازی	یافته‌ها نشان داد که موانع اقتصادی، زیرساختی و فنی - قانونی جزء ابعاد تأثیرگذار (علّی) محسوب می‌شوند که بر ابعاد منابع انسانی و سازمانی - مدیریتی (معلول) تأثیر می‌گذارند؛ همچنین موانع کمبود تخصص و آگاهی کارکنان در خصوص اقتصاد مدور و صنعت ۴/۰، ترس از بیکاری و مقاومت در مقابل تغییرات سازمانی و فرآیندی و کمبود بودجه و ابزارهای مالی برای آموزش و تحقیق و توسعه و عملیات به ترتیب مهم‌ترین موانع موجود در پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ۴/۰ در زنجیره تأمین صنایع آلاینده همانند صنعت شیشه‌سازی محسوب می‌شوند.
[۵۳]	طراحی مدل سنجش تاب‌آوری زنجیره تأمین با رویکرد مدل‌سازی معادلات ساختاری	نتایج اجرای مدل نشان داد که متغیرهای انعطاف‌پذیری، فرهنگ مدیریت ریسک، همکاری، افزونگی و چابکی به ترتیب بیشترین نقش را در تبیین تغییرات تاب‌آوری زنجیره تأمین دارند.
[۵۴]	تحلیلی بر توانمندسازهای موثر بر پیاده‌سازی اقتصاد مدور و صنعت ۴/۰ در زنجیره تامین	نتایج نشان می‌دهد که در بُعد اقتصادی، «تخصیص بودجه جهت اجرای اقتصاد مدور و صنعت ۴/۰» و «تحریک تقاضا برای محصولات مدور»، در بُعد منابع انسانی «آموزش و توسعه کارکنان» و «فرهنگ سازمانی»، در بُعد سازمانی-مدیریتی «حمایت و تعهد مدیریت ارشد» و «همکاری و شبکه‌سازی با شرکای زنجیره تامین (همزیستی صنعتی)»؛ و در نهایت در بُعد زیرساختی، «توسعه استانداردها و زیرساخت‌های فناوری اطلاعات» و «امنیت و حفاظت از حقوق مالکیت معنوی» به ترتیب تأثیرگذارترین و تأثیرپذیرترین توانمندسازها برای اجرای اقتصاد مدور و صنعت ۴/۰ در کارخانجات شیشه‌سازی اردکان یزد محسوب می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که کارخانجات شیشه‌سازی یزد برای اجرای اقتصاد مدور و صنعت ۴/۰ باید به توانمندسازهای اقتصادی و زیرساختی توجه داشته باشند.

جدول (۱): خلاصه‌ای از مهم‌ترین تحقیقات داخلی مرتبط با موضوع پژوهش

منبع	عنوان	نتایج
[۵۵]	شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های پایداری زنجیره تامین پتروشیمی با بهره‌گیری از تکنیک دیمتل	یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که در بعد زیست‌محیطی، کاهش مصرف انرژی، بازیافت پسماندهای شیمیایی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، از اولویت‌های مهم این صنعت هستند. در بعد اقتصادی، بهبود عملکرد لجستیکی و کاهش هزینه‌های انرژی با استفاده از فناوری‌های نوین، از جمله خودکارسازی فرآیندها، اهمیت ویژه‌ای دارند. همچنین در بعد اجتماعی، توسعه برنامه‌های مسئولیت اجتماعی شرکتی، ایجاد فرصت‌های شغلی در مناطق محروم و ارتقاء برابری جنسیتی و فرصت‌های شغلی به عنوان مهم‌ترین شاخص‌ها شناسایی شدند. در نتیجه، این تحقیق نشان می‌دهد که توجه به این شاخص‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد زنجیره تامین پتروشیمی، کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری اقتصادی و اجتماعی منجر شود و گامی موثر در راستای توسعه پایدار باشد.
[۵۶]	طراحی مدل بلوغ پایداری زنجیره تامین با رویکرد بهبود مستمر (مورد مطالعه: صنعت داروسازی ایران)	مدل بلوغ طراحی شده رویکرد توصیفی، تجویزی و مقایسه‌ای دارد. طراحی مدل بلوغ پایداری زنجیره تامین ویژه صنایع دیگر، شفاف‌سازی وضعیت پایداری زنجیره تامین صنایع داروسازی کشور با استفاده از مدل بلوغ طراحی شده، تدوین استاندارد پایداری زنجیره تامین ویژه صنعت داروسازی ایران، برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌گردد.
[۵۷]	ارائه مدلی جهت ارزیابی مدیریت عملکرد زنجیره تامین سبز در صنعت پتروشیمی با استفاده از روش داده بنیاد	نتایج نشان داد که چگونه می‌توان با استفاده از ترکیب مناسبی از عوامل مطرح شده به ارائه مدلی جهت ارزیابی مدیریت عملکرد زنجیره تامین سبز در صنعت پتروشیمی با استفاده از روش داده بنیاد پرداخت. پس از طراحی نظریه، ابعاد آن از طریق تلفیق رویکرد نظریه داده بنیاد با روش دلفی مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفت.
[۵۸]	طراحی شبکه زنجیره تأمین پایدار با بکارگیری اصول ناب	نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند که پیاده‌سازی تکنیک‌های ناب باعث صرفه‌جویی در هزینه‌ها شده و علاوه بر آن به سازمان در رسیدن به اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی کمک می‌کند.
[۵۹]	ارائه مدل برنامه ریزی ریاضی برای زنجیره تأمین حلقه بسته تاب آور پایدار با در نظر گرفتن معیار پاسخگویی و اثرات غیر قطعی کووید ۱۹	نتایج نشان می‌دهد که که تحقق پاسخگویی نیازمند هزینه بیشتر، تشدید مسائل زیست‌محیطی و البته بهبود مسئولیت اجتماعی می‌باشد. یعنی هر چه مسئولیت اجتماعی بیشتر شود پاسخگویی بیشتر می‌شود اما افزایش پاسخگویی مستلزم افزایش هزینه و بدتر شدن مسائل زیست‌محیطی نیز می‌باشد. در نهایت راهبردهای اثرگذار بر بهبود زنجیره تأمین در دوران کووید بررسی شد که استراتژی‌های افزایش ظرفیت به عنوان بهترین استراتژی‌ها تعیین شدند.
[۶۰]	ارائه مدلی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز و در نظر گرفتن فروش از دست‌رفته	نتایج نشان می‌دهد که بررسی دو عامل مهم هزینه و انتشار گاز کربن دی‌اکسیدی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین آلاینده‌ها، باعث کاربردی شدن این مدل در شبکه زنجیره تأمین شده است و همچنین نتایج نشان می‌دهد که توجه به انتشار گازهای گلخانه‌ای در تقاضاهای بالاتر ضروری‌تر است.

عملی داشتند. برای نمونه گیری از روش گلوله برفی استفاده شد. این روش، یک روش غیر تصادفی است که در آن محققان برای شناسایی افراد بالقوه در مطالعاتی که یافتن نمونه‌ها دشوار است، به افراد از طریق معرفی دیگران دسترسی پیدا می‌کنند. روند نمونه‌گیری تا زمانی که به تعداد کافی از افراد دست یابند، ادامه می‌یابد. ویژگی‌های جمعیت‌شناختی خبرگان به شرح زیر است:

جدول (۲): ویژگی‌های جمعیت‌شناختی خبرگان

رشته	مدرک	سمت	سابقه
مدیریت فناوری	دکتری	عضو هیات علمی دانشگاه	۱۸
سیاست گذاری	دکتری	عضو هیات علمی دانشگاه	۲۳
مدیریت فناوری	دکتری	عضو هیات علمی دانشگاه	۱۳
مدیریت صنعتی	دکتری	عضو هیات علمی دانشگاه	۲۱
مدیریت فناوری	دکتری	مشاور ارشد و مدیریت فنی	۱۷
شیمی	کارشناس ارشد	مشاور ارشد پتروشیمی	۱۲
اقتصاد	کارشناس ارشد	مشاور ارشد مطالعات بازار	۱۲

برای اطمینان از پوشش همه جانبه شاخص‌های شناسایی شده، پرسش‌نامه‌های مرحله اول دلفی پیش از اجرا روی نمونه کوچک (۳ خبره) پیش‌آزمون شد و بازخورد آن‌ها در اصلاح عبارت‌بندی‌ها لحاظ گردید. سپس شاخص‌ها بر اساس ضریب صدق محتوا<sup>۳</sup> (CVR) با استفاده از معیار لاشه<sup>۴</sup> ارزیابی شدند که مقادیر بالاتر از آستانه ۰/۵ کسب کردند. نتایج شاخص (CVR) به شرح جدول (۳) می‌باشد:

### ۳- روش تحقیق

هدف این تحقیق شناسایی پیشران‌ها و موانع اجرای اقتصاد مدور در صنعت ۵/۰ در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی و تحلیل سطوح آن‌هاست. برای این منظور، از روش مدلسازی ساختاری تفسیری<sup>۱</sup> استفاده شد. این روش شامل چهار مرحله است: [۱۵] (۱) شناسایی عناصری که موضوع تحقیقاتی را از طریق مرور ادبیات به هم مرتبط می‌کنند که این گام یک فهرست اولیه را ایجاد کرد. (۲) جمع‌آوری داده‌ها از طریق مصاحبه با متخصصین برای اعتبارسنجی این فهرست از دیدگاه تجربی، (۳) شرح و بسط مدل ساختاری و (۴) توسعه MICMAC<sup>۲</sup> با یک نمودار خوشه‌ای که قدرت نفوذ و وابستگی را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- مرور ادبیات

در اولین مرحله، پیشران‌ها و موانع مرتبط با موضوع تحقیق شناسایی می‌شوند. این مرحله معمولاً با مرور ادبیات و مطالعات پیشین آغاز می‌شود و به شناسایی عواملی که بیشترین اهمیت را در مسئله مورد نظر دارند، می‌پردازد. محققان همچنین ممکن است از مصاحبه‌ها یا جلسات گروهی با خبرگان برای شناسایی متغیرهای مهم استفاده کنند. این مرحله به اطمینان از جامعیت و ارتباط متغیرها با هدف پژوهش کمک می‌کند. در این مرحله، محقق به کمک بررسی منابع و ادبیات مرتبط، عوامل اصلی موثر در مسئله را شناسایی می‌کند. این مرحله پایه‌ای برای تحلیل دقیق تر روابط میان عوامل بوده و دقت در انتخاب متغیرها ضروری است، زیرا دقت نتایج نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۶۱].

### ۳-۲- ارزیابی متغیرها توسط خبرگان

پس از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه‌های اکتشافی با خبرگان و متخصصان، با رسیدن به اشباع نظری، روند گردآوری داده‌ها متوقف شد. تمامی خبرگان مورد بررسی مرد بودند. ۷۱ درصد از آن‌ها دارای مدرک دکتری (۵ نفر) و ۲۹ درصد دارای مدرک کارشناسی ارشد (۲ نفر) بودند و همگی حداقل ۱۰ سال سابقه کاری داشتند.

جامعه هدف پژوهش شامل پژوهشگران و خبرگان دانشگاهی و مدیران ارشد صنعت پتروشیمی بود که در این حوزه تجربه علمی و

<sup>۳</sup> Content Validity Ratio

<sup>۴</sup> Lawshe's CVR

<sup>۱</sup> Interpretive Structural Modeling

<sup>۲</sup> Matrix of Crossed Impact Multiplications Applied to a Classification

جدول (۳): ارزیابی ضریب CVR بر اساس معیار لاشه

شاخص	شرح	تعداد خبرگان (n)	تعداد خبرگان موافق (Ne)	ضریب CVR (استانده $\leq 0/5$ )	وضعیت پذیرش
TGY	بهبود کیفیت مواد اولیه و کاهش ضایعات	۳	۳	۱/۰۰	پذیرش
BEN	بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها	۳	۳	۱/۰۰	پذیرش
SOC	تقویت تعاملات اجتماعی و پایداری اجتماعی	۳	۲	۰/۳۳	رد
DES	طراحی مجدد فرآیندهای تولید	۳	۳	۱/۰۰	پذیرش
TCL	توسعه زیرساخت‌های فناوری	۳	۳	۱/۰۰	پذیرش
LOG	بهبود لجستیک و زنجیره تامین	۳	۲	۰/۳۳	رد
COS	کاهش هزینه‌های عملیاتی	۳	۳	۱/۰۰	پذیرش

مقدار CVR برای هر شاخص بر اساس رابطه لاشه به صورت زیر محاسبه شده است.

$$CVR = \frac{\frac{n}{2} - Ne}{\frac{n}{2}}$$

که در رابطه بالا Ne تعداد خبرگان موافق و n تعداد کل خبرگان هست.

### ۳-۳-۳- مدلسازی ساختاری تفسیری (ISM)

مدلسازی ساختاری تفسیری یک تکنیک پیشرفته و پیچیده است که افراد یا گروه‌ها را قادر می‌سازد که با مواجهه با مسائل یا چالش‌های پیچیده، آنها را به عنوان یک مدل ساختاری در سطوح مختلف

مفهومی بیان کنند. این روش امکان تبدیل مدل‌های فرضی مبهم و نامشخص ذهنی درباره سیستم‌ها به مدل‌های دقیق و قابل مشاهده فراهم می‌کند [۶۲]. مدلسازی ساختاری تفسیری یکی از روش‌های تحقیقاتی پرکاربرد در مطالعات علوم اجتماعی، مدیریت و فناوری اطلاعات است که برای شناسایی و تحلیل روابط پیچیده میان عوامل متعدد به کار می‌رود. این روش، بر پایه ادغام دانش و نظرات خبرگان با یک رویکرد سیستمی، به تحلیل سلسله‌مراتبی متغیرها می‌پردازد و با استفاده از ماتریس‌های ارتباطی، روابط میان عوامل را به صورت ساختاریافته و قابل فهم نمایش می‌دهد. مطالعه حاضر از نوع کاربردی، بر اساس روش، توصیفی و از نوع ترکیبی (کیفی و کمی) است. در بخش کیفی، نظرات و تجربیات خبرگان از طریق مصاحبه و جلسات گردآوری می‌شود تا عوامل کلیدی و روابط آن‌ها شناسایی گردد. سپس در بخش کمی، ماتریس‌های روابط متقابل و ماتریس دسترسی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده تشکیل شده و با استفاده از محاسبات ریاضی، سطح‌بندی عوامل انجام می‌شود. این ترکیب از روش‌های کیفی و کمی به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا علاوه بر درک عمیق از روابط میان عوامل، نتایج قابل اندازه‌گیری و تحلیل دقیق‌تری از آن‌ها ارائه کند [۱۱].

### ۳-۳-۱- ایجاد ماتریس روابط متقابل ساختاری<sup>۱</sup> (SSIM)

پس از تعیین متغیرها، مرحله بعد به ساخت یک ماتریس روابط متقابل اختصاص دارد. در این ماتریس، ارتباطات میان عوامل از نظر تأثیرگذاری و تأثیرپذیری مورد بررسی قرار می‌گیرند. معمولاً در این مرحله از جلسات گروهی با خبرگان استفاده می‌شود تا روابط متقابل به دقت مشخص شوند. هر خانه در ماتریس SSIM یک رابطه خاص بین دو متغیر را نشان می‌دهد که می‌تواند یکی از چهار حالت را نشان دهد: یک عامل بر دیگری تأثیر دارد، دومی بر اولی تأثیر دارد، هر دو متقابلاً بر هم تأثیر دارند، یا هیچ تأثیری وجود ندارد. این ماتریس به عنوان نقشه اولیه برای شناسایی روابط کلیدی میان عوامل عمل می‌کند [۶۳؛ ۶۲].

### ۳-۳-۲- تعریف نوع و جهت روابط

در ماتریس روابط متقابل ساختاری هر رابطه میان دو عامل با یکی از چهار نماد زیر مشخص می‌شود:

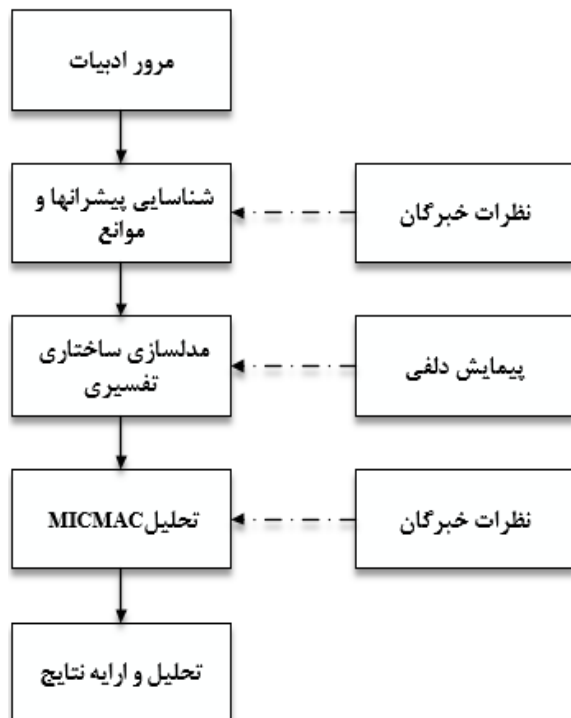
<sup>۱</sup> Structural Self-Interaction Matrix

### ۳-۴- تحلیل MICMAC

نرم افزار میک مک یکی از ابزارهای تحلیل ساختاری است که برای شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی یک سیستم استفاده می شود. میک مک از طریق ماتریس نفوذ و وابستگی<sup>۳</sup> تعاملات بین عوامل مختلف را بررسی می کند و آن ها را در قالب نقشه ای گرافیکی دسته بندی می کند. نتایج تحلیل در قالب نموداری که موقعیت هر عامل را نشان می دهد، ارائه می شود. یکی از نتایج مهم تحلیل، ترسیم نمودار نفوذ و وابستگی است که موقعیت هر عامل را در یکی از چهار دسته زیر مشخص می کند:

- خوشه اول: عوامل خودمختار، عواملی که نسبتاً از سیستم جدا هستند و وابستگی ضعیف یا بدون وابستگی به عوامل دیگر دارند.
- خوشه دوم: عوامل وابسته - عوامل خوشه دوم در درجه اول به عوامل دیگر وابسته هستند.
- خوشه سوم: عوامل پیوندی - عوامل پیوندی که ناپایدار هستند و بیشتر بر دیگران تأثیر می گذارند.
- خوشه چهارم: عوامل مستقل - این عوامل تأثیر ضعیفی از سایر عوامل دارند و با توجه به عوامل کلیدی قوی باید حداکثر توجه را به آنها معطوف کرد [۶۳].

شکل (۴) مراحل انجام پژوهش را به تصویر کشیده است:



شکل (۴): مراحل انجام پژوهش

V: عامل A بر عامل B تأثیر می گذارد.

A: عامل B بر عامل A تأثیر می گذارد.

X: هر دو عامل A و B بر هم تأثیر متقابل دارند.

O: هیچ ارتباط مستقیمی بین A و B وجود ندارد.

با استفاده از این نمادها، روابط بین تمام عوامل به دقت مشخص می شوند و هر رابطه ای در ماتریس روابط متقابل ساختاری وارد می شود [۴۹؛۵۰].

### ۳-۳- تبدیل ماتریس به ماتریس دسترسی اولیه<sup>۱</sup>

در این مرحله، ماتریس روابط متقابل ساختاری به یک ماتریس دسترسی اولیه تبدیل می شود که به کمک تبدیل های ریاضی انجام می شود. این ماتریس نشان دهنده ساختار سلسله مراتبی اولیه میان متغیرهاست و به روابط غیرمستقیم بین عوامل نیز توجه دارد. برای محاسبه ماتریس دسترسی، از الگوریتم های خاصی استفاده می شود که ارتباطات مستقیم و غیرمستقیم را به طور همزمان در نظر می گیرند. خروجی این مرحله به تعیین اهمیت نسبی عوامل در مدل ساختاری کمک می کند و سلسله مراتب بین متغیرها را آشکار می سازد. به عبارت دیگر، این ماتریس مشخص می کند که کدام عوامل بر دیگران تأثیر بیشتری دارند و به عنوان متغیرهای کلیدی مطرح می شوند [۶۲].

### ۳-۳-۴- تعیین سطوح متغیرها و رسم مدل نهایی<sup>۲</sup>

در این مرحله، بر اساس نتایج ماتریس دسترسی، سطوح مختلف متغیرها تعیین می شوند. این سطح بندی به کمک تحلیل سلسله مراتبی انجام می شود و به شناسایی جایگاه هر عامل در ساختار کلی مدل کمک می کند. سطوح پایین تر به متغیرهایی تعلق دارند که تأثیرپذیری بیشتری دارند و کمتر تأثیرگذار هستند، در حالی که سطوح بالاتر برای متغیرهایی است که بیشترین تأثیر را بر دیگر عوامل دارند. این تحلیل سلسله مراتبی، ساختار مدل نهایی ISM را تشکیل می دهد و به عنوان نقشه ای از روابط بین عوامل ارائه می شود. مدل نهایی می تواند در قالب یک نمودار به تصویر کشیده شود که تأثیرات متقابل عوامل را نمایش داده و به سیاست گذاران و مدیران کمک می کند تا عوامل کلیدی را به ترتیب اولویت شناسایی و تحلیل کنند [۶۲؛۶۳].

<sup>1</sup> Initial Reachability Matrix

<sup>2</sup> Level Partitioning and Final Model Development

<sup>3</sup> Influence and Dependence Matrix

## ۴- یافته‌ها

است. به طوری که این فرایند به گروهی از افراد، به عنوان یک کل، امکان حل یک مسئله پیچیده را می‌دهد. هدف اصلی روش دلفی دستیابی به قابل اطمینان ترین اجماع گروهی از نظرات خبرگان به واسطه یک سری از پرسشنامه های متمرکز همراه با بازخورد کنترل شده است. لذا با کسب اجماع گروهی از خبرگان، پیشران‌ها و موانع مربوط به پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی نهایی شد که در جداول (۴) و (۵) قابل مشاهده است.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در این تحقیق ابتدا با بررسی و مطالعه ادبیات نظری و مقالات مرتبط، پیشران‌ها و موانع مربوط به پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی شناسایی شد. سپس پیشران‌ها و چالش‌های حاصله توسط ۷ نفر از خبرگان، با استفاده از روش دلفی مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفت. روش دلفی، جهت ساختاردهی یک فرایند در یک ارتباط گروهی

جدول (۴): پیشران‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی

منبع	شرح	کد	مفوله
[۶۴]	بازیافت شیمیایی پیشرفته، مانند پیرولیز و گازی‌سازی، با بازیافت پلاستیک‌های مختلط و آلوده، ضایعات را کاهش داده و مواد اولیه باکیفیت برای زنجیره تامین تولید می‌کند.	TGY	پیشران‌های فناوری
[۶۵]	بازیافت مکانیکی پیشرفته با تبدیل پلاستیک‌ها به مواد اولیه قابل استفاده مجدد، اثرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. این روش برای پلیمرهای ساده کارآمد است، اما در پلاستیک‌های چندلایه به فناوری‌های پیشرفته و سرمایه‌گذاری بالا نیاز دارد.		
[۳]	هوش مصنوعی و اینترنت اشیا با تحلیل داده‌ها و ارتباط دستگاه‌ها، به بهبود تولید، کاهش مصرف انرژی و پیش‌بینی مشکلات کمک می‌کنند. این فناوری‌ها بهره‌وری را افزایش داده، هزینه‌ها را کاهش داده و به پایداری و اقتصاد مدور کمک می‌کنند.		
[۶۶]	پیشرفت در نانوفناوری با بهبود ویژگی‌های مواد در مقیاس نانو، کارایی و عملکرد را در صنایع مختلف افزایش می‌دهد. این فناوری در پتروشیمی و انرژی بازدهی را بالا برده و ضایعات را کاهش می‌دهد.		
[۶۷]	مدیریت انرژی در فرآیندهای بازیافت با استفاده از فناوری‌های نوین و سیستم‌های هوشمند، مصرف انرژی را بهینه کرده، هزینه‌ها را کاهش داده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را محدود می‌کند. این رویکرد به تسریع پیاده‌سازی مدل‌های اقتصاد مدور کمک می‌کند.		
[۶۸]	تولید مواد زیست‌بنیان با استفاده از پسماندهای شهری و گاز سنتز، جایگزینی نفت خام را ممکن ساخته، اثرات زیست‌محیطی را کاهش داده و به تحقق اقتصاد مدور کمک می‌کند.		
[۶۹]	بهینه‌سازی فرآیندهای تولید در صنعت پتروشیمی با استفاده از فناوری‌های نوین، کاهش مصرف انرژی و ضایعات، به بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و تولید محصولات با کیفیت بالاتر کمک می‌کند. این فرآیند موجب افزایش سودآوری و تحقق اهداف پایداری و اقتصادی می‌شود.		
[۱۱]	استفاده از اصول اقتصاد مدور با بهره‌برداری از مواد بازیافتی و کاهش مصرف مواد اولیه تازه، هزینه‌های تولید را کاهش داده و منابع طبیعی را حفظ می‌کند. همچنین، کاهش نیاز به دفع ضایعات منجر به کاهش هزینه‌های مدیریت و حمل و نقل ضایعات و افزایش بهره‌وری می‌شود.		
[۷۰]	افزایش آگاهی محیط زیستی و فشارهای اجتماعی باعث شده است که مصرف‌کنندگان به محصولات پایدار و مدور علاقه بیشتری نشان دهند. این تقاضا نه تنها بر تصمیمات خرید تأثیر می‌گذارد، بلکه شرکت‌ها را به تغییر و انطباق با استانداردهای زیست‌محیطی و ارائه محصولات با کیفیت تشویق می‌کند.	SOC	پیشران‌های اجتماعی
[۷۱]	دولت‌ها و نهادهای بین‌المللی با تدوین سیاست‌های حمایتی مانند اعمال جریمه برای عدم رعایت استانداردهای زیست‌محیطی و ارائه مشوق‌های مالی، به پیاده‌سازی اقتصاد مدور کمک می‌کنند.		

جدول (۵): موانع پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی

منبع	شرح	کد	مقوله
[۶۹]	محدودیت‌های مهندسی و طراحی مجدد، شامل تغییرات پرهزینه و زمان‌بر در طراحی محصولات و فرآیندها، یکی از موانع پیاده‌سازی اقتصاد مدور است. این تغییرات نیاز به تخصص فنی پیشرفته دارند و ممکن است کیفیت محصولات و نرخ بازگشت سرمایه را کاهش دهند.	DES	موانع طراحی و مهندسی
[۷۲]	مواد بازیافتی مانند روغن‌های پیرولیز نیازمند شرایط ذخیره‌سازی خاص هستند. نبود تسهیلات مناسب برای ذخیره‌سازی موجب کاهش کیفیت و افزایش هزینه‌ها، و در نتیجه مشکلات لجستیکی و اقتصادی در زنجیره تامین ایجاد می‌کند.		
[۶۹]	پیچیدگی‌های فنی و هزینه‌های بالا در تغییرات فرآیندهای تولید مانع پیاده‌سازی اقتصاد مدور در پتروشیمی است. پیاده‌سازی فناوری‌های جدید نیاز به سرمایه‌گذاری سنگین و تخصص فنی دارد که می‌تواند برای شرکت‌ها مشکل‌ساز باشد، به‌ویژه در صنایع با بازدهی طولانی.	TCL	موانع فنی
[۷۳]	نیاز به ترکیب فناوری‌های بازیافت شیمیایی و مکانیکی برای بازیافت پلاستیک‌های پیچیده، فرآیند را پیچیده کرده و نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتر دارد، که می‌تواند هزینه‌ها و زمان بازیافت را افزایش دهد و پیاده‌سازی را دشوار سازد.		
[۷۱]	عدم هماهنگی در استانداردهای فنی برای مواد بازیافتی، اعتماد تولیدکنندگان را کاهش داده و مشکلاتی در کنترل کیفیت و هزینه‌های اضافی برای تطبیق با تفاوت‌های منطقه‌ای ایجاد می‌کند.		
[۷۴]	کمبود زیرساخت‌های مناسب، شامل سامانه‌های بازیافت، فناوری‌های دیجیتال و فرآیندهای لجستیکی، مانع استفاده بهینه از منابع و کاهش ضایعات می‌شود و پیاده‌سازی مدل اقتصاد مدور را به تأخیر می‌اندازد.		موانع لجستیکی و زنجیره تامین
[۷۱]	عدم دسترسی به اطلاعات کافی درباره مواد اولیه، تأمین‌کنندگان و فرایندهای تولید، باعث کاهش اعتماد به سیستم‌های بازیافت و استفاده از مواد بازیافتی می‌شود و مشکلاتی در ردیابی مواد و مدیریت منابع ایجاد می‌کند.		
[۶۹]	مدیریت زنجیره تامین در اقتصاد مدور به هماهنگی بین تولیدکنندگان، تأمین‌کنندگان و مراکز بازیافت نیاز دارد. مشکلات لجستیکی مانند جمع‌آوری و حمل مواد بازیافتی می‌تواند پیاده‌سازی این مدل را دشوار و کارایی را کاهش دهد.	LOG	
[۷۵]	چالش‌های تفکیک ضایعات پلاستیکی شامل نیاز به فناوری‌های پیشرفته و پیچیده برای جداسازی پلاستیک‌های چندلایه است. این فرآیند زمان‌بر و پرهزینه بوده و در صورت عدم دسترسی به تکنولوژی‌های مناسب، منجر به اتلاف منابع و کاهش نرخ بازیافت می‌شود.		
[۷۶]	هزینه‌های بالای فناوری شامل سرمایه‌گذاری در تجهیزات پیچیده، نصب و هزینه‌های عملیاتی است. توسعه فناوری‌های پیشرفته مانند بازیافت شیمیایی نیاز به مقیاس‌پذیری بالا دارد که برای شرکت‌های کوچک دشوار است. چالش‌های تامین مالی و زمان طولانی بازگشت سرمایه نیز موانع مهمی هستند.	COS	موانع اقتصادی
[۷۷]	محدودیت منابع اولیه به دلیل آلودگی و تنوع ترکیبات ضایعات پلاستیکی، قابلیت استفاده بهینه در فناوری‌های بازیافت پیشرفته را کاهش می‌دهد. جمع‌آوری ناکافی پلاستیک‌های استاندارد و پراکندگی منابع اولیه بهره‌وری فرآیند بازیافت را دشوار می‌کند.		

#### ۴-۱- تشکیل ماتریس خودتعاملی ساختاری

جمع‌بندی شده و ماتریس خودتعاملی ساختاری نهایی تشکیل شده است. منطق مدلسازی ساختاری تفسیری بر اساس روش‌های ناپارامتریک و بر مبنای مد در فراوانی‌ها عمل می‌کند؛ به این شکل که علامتی به صورت نهایی در جدول وارد می‌شود که توسط بیشترین تعداد متخصصین مورد تأیید قرار گرفته باشد. در جدول زیر ماتریس خودتعاملی ساختاری قابل مشاهده است.

ماتریس خودتعاملی ساختاری پیشران‌ها و موانع مربوط به پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی و مقایسه آنها با استفاده از چهار حالت روابط مفهومی تشکیل شده است. این ماتریس توسط خبرگان و متخصصین منابع انسانی تکمیل شده است. اطلاعات حاصل شده بر اساس روش مدل‌سازی ساختاری تفسیری

به پایین تنظیم می شوند و با استفاده از سطح بندی انجام شده، دیاگرامی با عنوان مدل پیشرانها و موانع پیاده سازی اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی ترسیم می شود. به این صورت که موانع سازمانی و فرهنگی به عنوان سطح اول شناخته شده است، در اولین سطح دیاگرام قرار می گیرد و به همین ترتیب سایر ابعاد در سطوح دیگر دیاگرام قرار می گیرند. این دیاگرام در شکل (۵) ارائه شده است.

برای اعتبارسنجی ساختاری نتایج ISM، نسبت همسازیک<sup>۱</sup> (CR) ماتریس نهایی دسترسی محاسبه شد و در همه روابط زیر ۰/۱ قرار گرفت که نشان دهنده انسجام منطقی مدل است. علاوه بر این، تحلیل حساسیت در MICMAC با اندکی تغییر در آستانه‌ها انجام شد تا پایداری طبقه‌بندی موانع و پیشرانها تأیید شود.

جدول (۱۰): ارزیابی همسازیک و تحلیل حساسیت در ISM

نشان طبقه‌بندی	وضعیت پذیرش (CR<1)	نسبت همسازیک (CR)	ارتباط اولیه (M)	جهت متغیرها
ثابت	پذیرش	۰/۰۵	۱	TGY → BEN
ثابت	پذیرش	۰/۰۸	۱	BEN → SOC
-	-	-	۰	SOC → DES
ثابت	پذیرش	۰/۰۲	۱	DES → TCL
ثابت	پذیرش	۰/۰۹	۱	TCL → LOG
ثابت	پذیرش	۰/۰۷	۱	LOG → COS

نسبت همسازیک برای هر جهت متغیر بر اساس محاسبات ماتریس دسترسی و سازگاری داخلی روابط در ISM محاسبه شده است. ارزیابی همسازیک در روش یکی از مراحل حیاتی برای اطمینان از دقت و پایداری ساختار سلسله‌مراتبی ایجاد شده است. هدف این ارزیابی، بررسی سازگاری درونی ماتریس دسترسی است تا مطمئن شویم روابط میان متغیرها به درستی و بدون تناقض تعیین شده‌اند. این ارزیابی معمولاً شامل مراحل زیر است:

(۱) تشکیل ماتریس دسترسی

(۲) محاسبه نسبت همسازیک

نسبت همسازیک، میزان ناسازگاری در ماتریس دسترسی را اندازه‌گیری می‌کند و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$CR = \frac{|\text{Directrelation} - \text{Transitive relation}|}{\text{Directrelation}}$$

<sup>1</sup> Consistency Ratio

جدول (۶): ماتریس خود تعاملی ساختاری

شاخص	A	B	C	D	E	F	G
TGY	O	X	V	X	X	X	X
BEN	-	O	X	X	X	X	X
SOC	-	-	O	O	O	O	X
DES	-	-	-	O	A	V	A
TCL	-	-	-	-	O	X	X
LOG	-	-	-	-	-	O	X
COS	-	-	-	-	-	-	O

جدول (۷): ماتریس دسترسی پذیری اولیه

شاخص	A	B	C	D	E	F	G	نفوذ
TGY	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷
BEN	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷
SOC	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۳
DES	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۴
TCL	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۶
LOG	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۵
COS	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷
وابستگی	۶	۷	۴	۵	۵	۶	۶	۳۹

جدول (۸): ماتریس دسترسی پذیری سطح ۱

کد	ورودی	خروجی	مشترک	سطح
TGY	1-2-3-4-5-6-7	1-2-4-5-6-7	1-2-4-5-6-7	1
BEN	1-2-3-4-5-6-7	1-2-3-4-5-6-7	1-2-3-4-5-6-7	1
SOC	2-3-7	1-2-3-7	2-3-7	
DES	1-2-4-6	1-2-4-5-7	1-2-4	
TCL	1-2-4-5-6-7	1-2-5-6-7	1-2-5-6-7	1
LOG	1-2-5-6-7	1-2-4-5-6-7	1-2-5-6-7	
COS	1-2-3-4-5-6-7	1-2-3-5-6-7	1-2-3-5-6-7	1

جدول (۹): ماتریس دسترسی پذیری سطح ۲ و ۳

شاخص	ورودی	خروجی	مشترک	سطح
SOC	3	3	3	2
DES	4-6	4	4	2
LOG	6	4-6	6	3

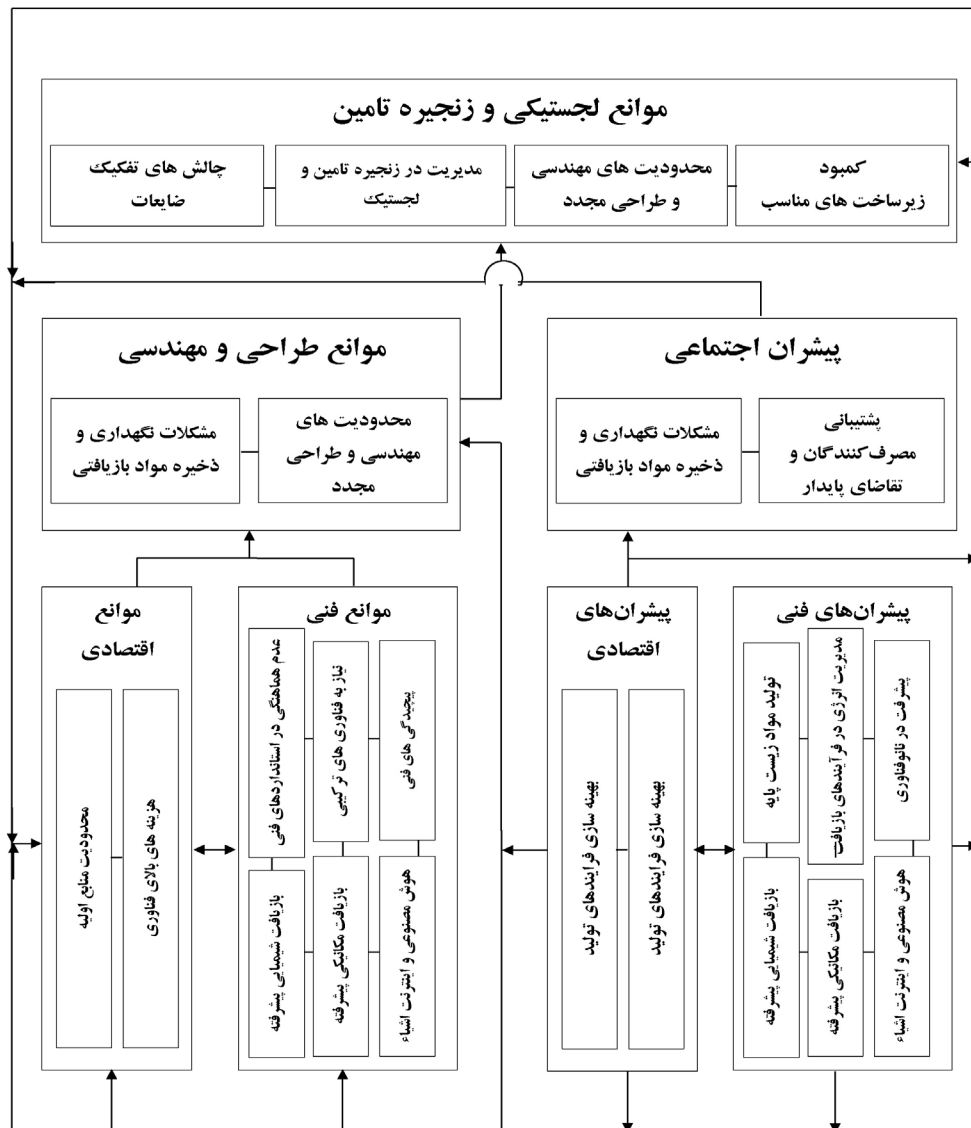
#### ۴-۲- ترسیم شبکه تعاملات ابعاد و شاخصها

پس از تعیین روابط و سطح متغیرها می‌توان آنها را به شکل مدلی ترسیم کرد. به همین منظور ابتدا متغیرها بر حسب سطح آنها از بالا

### ۴-۳- تحلیل MICMAC

در این مرحله پیشران‌ها و موانع هر کدام به چهار گروه طبقه‌بندی شده است. تحلیل میک مک با توجه به جدول ماتریس سطر و ستون عوامل در نظر گرفته شده است. میزان نفوذ هر عامل در محور عمودی و میزان وابستگی هر عامل در محور افقی مشخص شده است.

ستون ثبات طبقه‌بندی نشان‌دهنده پایداری ساختار مدل در برابر تغییرات جزئی در ماتریس است؛ به این معنا که اگر حتی با تغییرات کوچک در وزن یا تعداد روابط، طبقه‌بندی عناصر تغییر نکند، ساختار مدل پایدار است. پس از اطمینان از همسازیک بودن مدل، تحلیل MICMAC برای طبقه‌بندی متغیرها بر اساس قدرت تأثیرگذاری و وابستگی آن‌ها انجام شد.



شکل (۵): مدل شماتیک پیشران‌ها و موانع پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی

قرار دارند. همچنین سه شاخص (موانع اقتصادی و پیشران‌های فناوری و پیشران‌های اقتصادی) نیز در خوشه پیوندی قرار دارد که هم قدرت نفوذ و هم قدرت وابستگی بالایی دارند. شایان ذکر است که دو متغیر (موانع طراحی و مهندسی و پیشران‌های اجتماعی) در خوشه خود مختار جای گرفته‌اند که نشان‌دهنده آن است که هم قدرت نفوذ و هم قدرت وابستگی پایینی دارند.

عواملی که دارای بیشترین قدرت نفوذ باشند متغیرهای مستقل و عواملی که دارای بیشترین وابستگی باشند، متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که یک شاخص (موانع فنی) در خوشه متغیرهای مستقل قرار گرفته است که قدرت نفوذ بالا به همراه قدرت وابستگی پایینی دارند. همچنین شکل (۶) گویای این مطلب است که شاخص موانع لجستیکی در خوشه وابسته

	10	مستقل								پیوندی	
	9										
	8										
	7					Cos - Tgy	Ben				
	6				Tcal						
	5					Log					
	4				Des						
	3			Soc							
	2										
	1	خودمختار								وابسته	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		وابستگی									

شکل (۶): نمودار قدرت نفوذ و وابستگی

بالایی برخوردار می‌باشد. با توجه به طبقه‌بندی انجام شده، پیشران‌ها و موانع در سه سطح اصلی شامل فناوری و اقتصادی، اجتماعی و طراحی/مهندسی، و لجستیکی و زنجیره تامین تقسیم‌بندی شده‌اند که در ادامه تجزیه و تحلیل می‌شوند.

در سطح اول، پیشران‌های فناوری و اقتصادی در پیاده‌سازی اقتصاد مدور در صنعت پتروشیمی بیشترین تأثیر را دارند. فناوری‌های پیشرفته مانند بازیافت شیمیایی، بازیافت مکانیکی، و نانوفناوری از جمله پیشران‌های اساسی هستند که می‌توانند فرآیند بازیافت مواد را کارآمدتر کرده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهند. از طرف دیگر، پیشران‌های اقتصادی، نظیر بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و تولید مواد زیست‌پایه، به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کمک می‌کنند. این پیشران‌ها در نهایت می‌توانند منجر به سودآوری و بازدهی بالاتر در بلندمدت شوند. با این حال، در مقابل این پیشران‌ها، موانع فنی و اقتصادی متعددی وجود دارند که پیاده‌سازی این مدل را به تأخیر می‌اندازند. هزینه‌های بالای فناوری‌های پیشرفته، پیچیدگی‌های فنی مربوط به به کارگیری این فناوری‌ها، و نیاز به زیرساخت‌های خاص از جمله چالش‌های اساسی در این زمینه هستند. علاوه بر این، مشکلات اقتصادی نظیر هزینه‌های بالا برای به‌روزرسانی فرآیندها، تأمین مالی پروژه‌های مربوط به اقتصاد مدور و مشکلات بازگشت سرمایه نیز به‌عنوان موانع عمده در پیاده‌سازی این مدل اقتصادی مطرح هستند. بنابراین، با وجود پیشرفت‌های فناوری و مزایای اقتصادی که می‌توانند در بلندمدت در پی داشته باشند، موانع مالی و فنی به‌ویژه در صنایع بزرگ مانند پتروشیمی، ممکن است پیاده‌سازی این مدل را با دشواری‌های فراوان مواجه کنند.

## ۵- بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه با تحلیل جامع پیشران‌ها و موانع موجود در صنعت پتروشیمی، چارچوبی برای درک بهتر فرصت‌ها و چالش‌های پیش روی این صنعت در حرکت به سوی اقتصاد مدور ارائه می‌کند. پیشران‌ها و موانع مختلفی در سطوح مختلف زنجیره تامین شناسایی شدند که هر کدام نقش اساسی در تسهیل یا محدود کردن این روند دارند. این تحقیق کارایی تکنیک‌های ترکیبی یک مرحله دلفی، مدل‌سازی ساختاری تفسیری و تحلیل MICMAC را برای مطالعه پیشران‌ها و موانع پیاده‌سازی اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی نشان داد. پس از جستجوی جامع ادبیات، سه پیشران و چهار مانع حیاتی شناسایی و به روش دلفی تایید شدند. سپس از مدل‌سازی ساختاری تفسیری برای تعیین روابط متقابل استفاده شد. مدل ساختاری تفسیری را می‌توان به سه سطح تقسیم کرد:

پیشران‌ها و موانع سطح بالا، سطح متوسط و سطح پایین. موانع سطح پایین به عنوان پایه مدل شناسایی می‌شوند و احتمالاً بر سایر پیشران‌ها و موانع تأثیر زیادی خواهند گذاشت. در این تجزیه و تحلیل، پیشران‌ها و موانع فنی و اقتصادی در سطح پایین قرار داشتند و پیشران‌های اجتماعی و موانع طراحی و مهندسی که در سطح میانی قرار داشتند را هدایت می‌کردند. شرکت‌های فعال در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی باید روی پیشران‌ها و موانع سطح پایین تمرکز کنند تا پیچیدگی‌های پیاده‌سازی اقتصاد مدور را کاهش دهند. موانع سطح بالا، موانع لجستیکی و زنجیره تامین بوده که تأثیرگذاری بسیار کمی دارند زیرا به مولفه‌ها و سطوح پایین‌تر بستگی دارند. شایان ذکر است که این موانع از قدرت تأثیرپذیری

(۱) **پیشران ها و موانع خودمختار:** عواملی با وابستگی و قدرت پیشران کم توصیف می شوند. عواملی که در این دسته قرار می گیرند را می توان به راحتی برطرف کرد و تأثیر کمتری بر سیستم دارد. در این مورد، پیشران های اجتماعی و موانع طراحی و مهندسی تحت این خوشه قرار گرفت.

(۲) **پیشران ها و موانع وابسته:** به عنوان یک پیشران ضعیف اما عمیقاً به دیگران وابسته است. به طور کلی، این موانع در بالای مدل ISM ظاهر می شوند. در این تحلیل، متغیر موانع لجستیکی و زنجیره تامین در خوشه وابسته قرار دارد.

(۳) **پیشران ها و موانع پیوندی:** آنها قدرت پیشران و وابستگی قوی دارند. موانع موجود در این خوشه ناپایدار در نظر گرفته می شوند. این موانع ناپایدار را می توان به راحتی تحت تأثیر قرار داد، زیرا به موانع دیگر بستگی دارد. در این مدل، موانع اقتصادی و پیشران های فنی و اقتصادی در این دسته قرار می گیرند. عوامل پیوند یک اثر بازخورد دارند و باید در هنگام اجرای اقتصاد مدور در زنجیره تامین صنعت پتروشیمی به دقت مورد توجه قرار گیرند.

(۴) **پیشران ها و موانع مستقل:** قدرت پیشران بالایی دارند اما وابستگی کمی دارند. چنین موانعی حداکثر توجه تصمیم گیرندگان را می طلبد. موانع فنی به عنوان موانع مهم با نیروی پیشران قوی در مطالعه حاضر ظاهر شدند.

## ۶- پیشنهادها

یافته های این پژوهش می تواند به طور معناداری فرآیند تصمیم گیری برای سیاست گذاران و برنامه ریزان صنعت پتروشیمی را تسهیل کند. با شناسایی و تحلیل دقیق عوامل، معیارها و زیرمعیارهای تاثیرگذار، این پژوهش به سازمان ها این امکان را می دهد تا در طراحی پایدار زنجیره تامین در صنعت پتروشیمی بر ابعاد فنی و تکنولوژیکی، اقتصادی، اجتماعی و لجستیکی، تمرکز بیشتری داشته باشند. در ادامه پیشنهادهای کاربردی در سطوح مختلف بر اساس مدل پژوهش ارائه شده است:

### ۶-۱- پیشنهادهای کاربردی

**سطح اول: پیشران های فناوری و اقتصادی و موانع فنی و**

#### اقتصادی

[۱] سرمایه گذاری در تحقیق و توسعه: برای تسهیل گذار به اقتصاد مدور در صنعت پتروشیمی، راه اندازی مراکز نوآوری مشترک میان شرکت های پتروشیمی، دانشگاه ها و استارت آپ های فعال در حوزه

در سطح دوم، پیشران های اجتماعی و موانع طراحی و مهندسی به طور ویژه اهمیت دارند. پیشران های اجتماعی شامل پشتیبانی مصرف کنندگان و تقاضای پایدار از محصولات بازیافتی و حمایت های دولتی و بین المللی برای سیاست گذاری و فراهم سازی زیرساخت های مناسب هستند. این پیشران ها می توانند فرهنگ سازی لازم را برای پیاده سازی گسترده تر مدل اقتصاد مدور ایجاد کنند. همچنین، دولت ها و نهادهای بین المللی با وضع قوانین و سیاست های حمایتی می توانند به طور مستقیم به پیاده سازی این مدل کمک کنند.

در کنار این پیشران ها، موانع طراحی و مهندسی نیز چالش های بزرگی در پیاده سازی اقتصاد مدور به شمار می آیند. طراحی مجدد محصولات و فرآیندها برای بهینه سازی بازیافت و تولید مواد بازیافتی، نیازمند تخصص های مهندسی پیچیده و منابع مالی قابل توجه است. محدودیت های مهندسی و طراحی در ایجاد فرآیندهایی که با سیستم های بازیافت هماهنگ باشند، همچنین به کارگیری تکنولوژی های نوین و نیاز به هماهنگی بین بخش های مختلف طراحی و تولید می تواند فرآیند پیاده سازی را دشوار کند.

در سطح سوم، موانع لجستیکی و زنجیره تامین نقش مهمی ایفا می کنند. مدیریت زنجیره تامین و لجستیک در مدل اقتصاد مدور بسیار پیچیده است و نیازمند هماهنگی دقیق بین تولیدکنندگان، تأمین کنندگان، و مراکز بازیافت است. مشکلاتی مانند هزینه های بالای حمل و نقل، ذخیره سازی و جمع آوری مواد بازیافتی، و عدم شفافیت در زنجیره تامین می تواند پیاده سازی این مدل اقتصادی را محدود کند. همچنین، نداشتن زیرساخت های مناسب برای بازیافت و فرآیندهای دیجیتال در بسیاری از کشورها، مانع از ایجاد سیستم های مؤثر بازیافت در صنعت پتروشیمی می شود.

در نتیجه، در سه سطح شناسایی شده، موانع فنی و اقتصادی در سطح اول، موانع طراحی و مهندسی در سطح دوم و مشکلات لجستیکی و زنجیره تامین در سطح سوم هر کدام به طور خاص می توانند پیاده سازی اقتصاد مدور را در صنعت پتروشیمی با چالش مواجه کنند. از سوی دیگر، پیشران های اجتماعی و فناوری می توانند از طریق همکاری های بین المللی و ایجاد تقاضای پایدار برای محصولات بازیافتی، گام های مؤثری در تسهیل پیاده سازی این مدل اقتصادی بردارند.

همچنین در ادامه، بر اساس قدرت پیشران و وابستگی، تمام موانع با استفاده از تجزیه و تحلیل MICMAC برای بررسی بیشتر به چهار خوشه گروه بندی شدند:

#### سطح دوم: پیشران‌های اجتماعی و موانع طراحی و مهندسی

[۴] آموزش و فرهنگ‌سازی در سطح جامعه: برای تقویت پیشران‌های اجتماعی در راستای اجرای اقتصاد مدور در صنعت پتروشیمی، آموزش و فرهنگ‌سازی در سطح جامعه از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از اقدامات مؤثر در این زمینه، تدوین کتب درسی و طراحی برنامه‌های آموزشی ویژه درباره اصول و مزایای اقتصاد مدور در مقاطع دبیرستان و دانشگاه است که می‌تواند آگاهی و نگرش نسل جوان را نسبت به توسعه پایدار تقویت کند. همچنین بهره‌گیری از ظرفیت رسانه‌های ملی، به‌ویژه همکاری با صدا و سیما برای تولید محتوای آموزشی و مستندهای تلویزیونی جذاب و کاربردی، به گسترش دانش عمومی در این حوزه کمک خواهد کرد. در کنار این اقدامات، مشارکت فعال انجمن‌های صنفی و اتحادیه‌های صنایع پایین دستی پتروشیمی نیز ضروری است تا با نقش آفرینی مستقیم در طراحی و اجرای برنامه‌های فرهنگی و آموزشی، این تغییرات رفتاری در بدنه صنعت نیز نهادینه شود.

[۵] پشتیبانی‌های قانونی و مالی از سوی دولت: در راستای غلبه بر موانع طراحی و مهندسی و تقویت انگیزه شرکت‌ها برای گذار به سمت اقتصاد مدور در صنعت پتروشیمی، ارائه پشتیبانی‌های قانونی و مالی از سوی دولت نقشی حیاتی دارد. از جمله اقدامات مؤثر در این زمینه، تصویب قوانینی است که تولیدکنندگان پتروشیمی را ملزم به استفاده حداقل ۱۵ درصدی از مواد بازیافتی در محصولات خود تا سال ۱۴۰۸ کند؛ این الزام می‌تواند موجب افزایش تقاضا برای مواد بازیافتی و ایجاد بازار پایدار در این حوزه شود. علاوه بر آن، دولت می‌تواند با اعطای تسهیلات مالی کم‌بهره به شرکت‌هایی که اقدام به تغییر خطوط تولید یا طراحی مجدد محصولات خود در راستای سازگاری با اصول اقتصاد مدور می‌کنند، انگیزه‌های اقتصادی لازم را فراهم آورد. برای هدایت، نظارت و هماهنگی مؤثر این اقدامات، ایجاد کارگروه ملی راهبری اقتصاد مدور با اختیارات قانونی مشخص و ترکیب نمایندگانی از بخش‌های دولتی، دانشگاهی و صنعتی، ضرورتی انکارناپذیر است.

[۶] گسترش همکاری‌های بین‌المللی در زمینه طراحی مجدد: در راستای رفع موانع طراحی و مهندسی و ارتقای ظرفیت‌های فنی برای پیاده‌سازی اقتصاد مدور در صنعت پتروشیمی، گسترش همکاری‌های بین‌المللی می‌تواند نقش کلیدی ایفا کند. یکی از اقدامات عملی در این مسیر، عضویت ایران در پلتفرم‌های جهانی نظیر بنیاد الن مک آرتور است که استانداردها و تجربیات بین‌المللی در حوزه طراحی محصول با چرخه بسته را ارائه می‌دهند. چنین عضویتی به انتقال

بازیافت و زیست‌پایه پیشنهاد می‌شود. این مراکز با تمرکز بر توسعه فناوری‌های نوین می‌توانند پروژه‌های تحقیقاتی مشترک را افزایش داده و به تجاری‌سازی راهکارهای پایدار کمک کنند؛ شاخص ارزیابی موفقیت آن‌ها، تعداد پروژه‌های تحقیقاتی مشترک تا سال ۱۴۰۶ است. همچنین، اعطای مشوق‌هایی نظیر معافیت مالیاتی برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بازیافتی و محصولات زیست‌پایه می‌تواند انگیزه مشارکت فعال را افزایش دهد. نمونه موفق این رویکرد را می‌توان در استفاده از فناوری‌های پلاسمای سرد و الکترورسی در پتروشیمی اروپا مشاهده کرد که توانسته بازیافت ضایعات پلاستیکی پیچیده را به‌صورت مؤثر ممکن سازد.

[۲] ایجاد مدل‌های اقتصادی پایدار: در راستای تحقق اقتصاد مدور در صنعت پتروشیمی، ایجاد مدل‌های اقتصادی پایدار با تأکید بر تدوین چارچوب‌های مشارکت عمومی-خصوصی برای احداث واحدهای بازیافت منطقه‌ای در شهرک‌های صنعتی اهمیت ویژه‌ای دارد. این رویکرد با تجمع منابع بخش دولتی و خصوصی، زمینه را برای ارتقای بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها فراهم می‌کند. برای پشتیبانی از این مدل‌ها، استفاده از ابزارهایی مانند اعطای وام‌های کم‌بهره یا تضمین خرید محصولات بازیافتی توسط دولت می‌تواند نقش کلیدی ایفا کند و ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش دهد. شاخص عملکرد در این زمینه، نسبت بودجه تخصیصی به پروژه‌های اقتصاد مدور نسبت به کل سرمایه‌گذاری شرکت‌ها خواهد بود، که می‌تواند میزان اولویت‌بخشی به پایداری اقتصادی را در تصمیم‌گیری‌های سازمانی نشان دهد.

[۳] توسعه زیرساخت‌های فنی و بهبود فرآیندهای تولید: برای بهبود فرآیندهای تولید و پشتیبانی از زیرساخت‌های فنی در مسیر پیاده‌سازی اقتصاد مدور، استقرار سیستم‌های بازیافت درون‌سازمانی در پالایشگاه‌های پتروشیمی اقدامی کلیدی به شمار می‌رود. این سیستم‌ها امکان استفاده مجدد از پسماندهای فرآیند تولید را فراهم کرده و بهره‌وری منابع را افزایش می‌دهند. در این راستا، بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند نانوفیلترها و راکتورهای زیست‌تخریب‌پذیر به منظور جداسازی و تصفیه مواد، نقش مؤثری در ارتقای کیفیت بازیافت خواهد داشت. همچنین، تدوین آیین‌نامه‌های فنی برای طراحی و استانداردسازی خطوط بازیافت در تأسیسات پتروشیمی، می‌تواند چارچوبی منسجم برای اجرای این فرآیندها فراهم کند و از بروز پراکندگی و ناکارآمدی در پیاده‌سازی جلوگیری نماید.

بازیافتی قابل ردیابی به کل مواد بازیافتی استفاده شده باشد که این معیار میزان شفافیت در فرآیند بازیافت و استفاده مجدد از مواد را اندازه‌گیری می‌کند.

[۹] ایجاد ظرفیت‌های ذخیره‌سازی و مدیریت بهینه مواد بازیافتی: برای ایجاد ظرفیت‌های ذخیره‌سازی و مدیریت بهینه مواد بازیافتی در صنعت پتروشیمی، یکی از زیرساخت‌های پیشنهادی، احداث انبارهای منطقه‌ای با قابلیت کنترل شرایط دما، رطوبت و نور است که می‌تواند به حفظ کیفیت مواد حساس مانند روغن‌های بازیافتی و دیگر مواد مستعد تغییرات کیفیت کمک کند. این انبارها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که شرایط ذخیره‌سازی به‌صورت دقیق و بهینه برای انواع مختلف مواد بازیافتی فراهم شود. در کنار این زیرساخت‌ها، طراحی نرم‌افزار مدیریت چرخه عمر مواد بازیافتی<sup>۱</sup> نیز ضروری است. این نرم‌افزار به‌عنوان یک ابزار کارآمد می‌تواند فرآیندهای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، انتقال و استفاده مجدد مواد بازیافتی را در تمام مراحل ردیابی کرده و از بروز مشکلاتی مانند اتلاف یا کاهش کیفیت مواد جلوگیری کند. همچنین، اختصاص ردیف بودجه ویژه در برنامه‌های سالانه شرکت‌های پتروشیمی برای نگهداری مواد بازیافتی به‌عنوان یک سیاست مالی حمایتی می‌تواند به تأمین منابع لازم برای احداث و نگهداری این ظرفیت‌ها کمک کند و آن‌ها را در مسیر بهبود پایدارتر قرار دهد.

پیاده‌سازی اقتصاد مدور در صنعت پتروشیمی به‌ویژه در زنجیره تأمین، نیازمند یک رویکرد جامع و هماهنگ است که پیشران‌ها و موانع مختلف در سطوح مختلف را در بر بگیرد. برای غلبه بر موانع فنی، اقتصادی، طراحی و مهندسی، و لجستیکی، باید سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، بهبود زیرساخت‌ها، سیاست‌گذاری‌های حمایتی، و ارتقاء فرهنگ عمومی را در نظر گرفت. همچنین، تقویت همکاری‌های بین‌المللی و ایجاد مدل‌های مالی پایدار می‌تواند گام‌های مؤثری در تسهیل پیاده‌سازی این مدل اقتصادی بردارد.

## ۶-۲- محدودیت‌های پژوهش

یافته‌های این مطالعه بینش‌های ارزشمندی را برای سیاست‌گذاران و دست‌اندرکاران در راستای توسعه استراتژی‌هایی برای اطمینان از اجرای اقتصاد مدور ارائه می‌کند. تحقیق حاضر دو محدودیت اصلی را بر دوش می‌کشد. ابتدا، تعمیم یافته‌های این تحقیق به زنجیره تأمین صنعت پتروشیمی محدود می‌شود. برای بررسی پیشران‌ها و موانع

دانش، تسهیل آموزش و دسترسی به ابزارهای استانداردسازی جهانی کمک می‌کند. همچنین، از طریق دیپلماسی فناوری، می‌توان با کشورهای منطقه مانند ترکیه، هند و امارات، کنسرسیوم‌های مهندسی مشترک برای طراحی محصولات بازیافتی تشکیل داد که منجر به توسعه ظرفیت‌های بومی با پشتوانه بین‌المللی شود. خروجی ملموس این همکاری‌ها می‌تواند تدوین استانداردهای طراحی محصولات بازیافتی با نشان‌گذاری "CE" یا معادل ملی آن باشد که تضمین‌کننده کیفیت، ایمنی و قابلیت بازاریابی محصولات بازیافتی در بازارهای داخلی و صادراتی است.

## سطح سوم: موانع لجستیکی و زنجیره تأمین

[۷] بهبود فرآیندهای لجستیکی و تسهیل در جمع‌آوری مواد بازیافتی: برای تقویت زنجیره تأمین مواد بازیافتی در صنعت پتروشیمی، بهبود فرآیندهای لجستیکی و جمع‌آوری نقشی اساسی دارد. در این راستا، یکی از راهکارهای فنی پیشنهادی، طراحی یک شبکه لجستیکی هوشمند مبتنی بر فناوری اینترنت اشیا است که از طریق نصب سنسورها روی ظروف ضایعاتی در واحدهای پایین‌دستی، امکان ردیابی دقیق و به‌موقع مسیر و وضعیت مواد بازیافتی فراهم می‌شود. هم‌زمان، توسعه داشبوردهای مرکزی برای پایش مکانی و زمانی داده‌های جمع‌آوری، به تصمیم‌گیری سریع‌تر و کارآمدتر در مدیریت پسماندها کمک می‌کند. این مدل می‌تواند با الگوبرداری از تجربه موفق شرکت BASF در اروپا در زمینه لجستیک معکوس طراحی و بومی‌سازی شود؛ مدلی که با تلفیق فناوری‌های دیجیتال و مدیریت داده، راندمان جمع‌آوری و استفاده مجدد از مواد را به‌طور چشمگیری افزایش داده است.

[۸] تقویت شفافیت در زنجیره تأمین: برای تقویت شفافیت در زنجیره تأمین مواد بازیافتی در صنعت پتروشیمی، استفاده از فناوری‌های نوین نظیر بلاک‌چین می‌تواند به‌طور چشمگیری بهبود یابد. یکی از ابزارهای پیشنهادی، بهره‌گیری از بلاک‌چین برای ثبت مبادلات مواد بازیافتی و اعتبارسنجی منشأ این مواد است که به‌طور هم‌زمان از تقلب و جعل در فرآیندهای بازیافت جلوگیری می‌کند. این فناوری می‌تواند اطلاعات مربوط به مواد بازیافتی را به‌صورت شفاف و قابل دسترس برای تمامی ذی‌نفعان ثبت کرده و نظارت دقیق‌تری بر فرآیندها ایجاد کند. علاوه بر آن، توسعه سامانه ملی ردیابی مواد بازیافتی در پتروشیمی ایران با همکاری وزارت صنعت، معدن و تجارت (صمت) می‌تواند به‌عنوان یک پلتفرم دیجیتال مرکزی برای نظارت و کنترل زنجیره تأمین بازیافت در سطح کشور عمل کند. شاخص شفافیت در این زمینه می‌تواند نسبت مواد

<sup>1</sup> Lifecycle Tracking System

- [10] L. R. Luttenberger, "Waste management challenges in transition to circular economy—case of Croatia," *Journal of Cleaner Production*, vol. 256, p. 120495, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120495
- [11] S. Manoharan et al., "Contextual relationships among drivers and barriers to circular economy: An integrated ISM and DEMATEL approach," *Sustainable Operations and Computers*, vol. 3, pp. 43-53, 2022. DOI: 10.1016/j.susoc.2021.09.003
- [12] T. Nasyiah et al., "Explaining Sustainable Performance with SEM-FsQCA: The Role of Traceability Systems, Knowledge Management, Halal SCM Practices, and Spiritual Leadership in Small-Medium Enterprises (SMEs)," *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 71, pp. 5691-5705, 2024. DOI: 10.1109/TEM.2024.3365660
- [13] X. Yao et al., "From intelligent manufacturing to smart manufacturing for Industry 4.0 driven by next generation artificial intelligence and further on," in *Proc. 5th Int. Conf. Enterprise Systems (ES)*, 2017, pp. 311-318. DOI: 10.1109/ES.2017.58
- [14] H. Kaur and S. P. Singh, "Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies," *International Journal of Production Economics*, vol. 231, p. 107830, 2021. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107830
- [15] M. Godinho Filho et al., "The relationship between circular economy, industry 4.0 and supply chain performance: a combined ISM/fuzzy MICMAC approach," *Sustainability*, vol. 14, no. 5, p. 2772, 2022. DOI: 10.3390/su14052772
- [16] M. Vacchi et al., "Industry 4.0 and smart data as enablers of the circular economy in manufacturing: Product re-engineering with circular eco-design," *Sustainability*, vol. 13, no. 18, p. 10366, 2021. DOI: 10.3390/su131810366
- [17] Kumar, S., Raut, R. D., Nayal, K., Kraus, S., Yadav, V. S., & Narkhede, B. E., 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, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126023
- [18] Sikder, M. R., Saif, S. J. A., Nadim, S. A., Tarik, K. I. B., & Islam, R., Integrating Circular Economy and Industry 5.0 for Sustainable Supply Chain Management in the Food Industry. *Supply Chain Insider* ISSN: 2617-7420 (Print), 2617-7420 (Online), 9(1). 2023.
- [19] Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of business ethics*, 140, 369-380, 2017. DOI: 10.1007/s10551-015-2693-2
- [20] Corvellec, H., Stowell, A. F., & Johansson, N. Critiques of the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 26(2), 421-432, 2022. DOI: 10.1111/jiec.13187
- [21] Niskanen, J., Anshelm, J., & McLaren, D. Local conflicts and national consensus: The strange case of circular economy in Sweden. *Journal of cleaner production*, 261, 121117, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121117
- [22] Inigo, E. A., & Blok, V. Strengthening the socio-ethical foundations of the circular economy: Lessons from responsible research and innovation. *Journal of cleaner production*, 233, 280-291, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.053
- [23] Abdul-Hamid, A.-Q., Ali, M. H., Tseng, M.-L., Lan, S., & Kumar, M. Impeding challenges on industry 4.0 in circular economy: Palm oil industry in Malaysia. *Computers & Operations Research*, 123, 105052, 2020. DOI: 10.1016/j.cor.2020.105052
- [24] Han, J., Heshmati, A., & Rashidghalam, M. Circular economy business models with a focus on servitization. *Sustainability*, 12(21), 8799, 2020 DOI: 10.3390/su12218799
- [25] D'Adamo, I., & Lupi, G. Sustainability and resilience after COVID-19: A circular premium in the fashion industry. *Sustainability*, 13(4), 1861, 2021. DOI: 10.3390/su13041861

سایر بخش‌ها، چالش‌ها باید بازتعریف و تعدیل شوند. دوم، تحلیل ISM و MICMAC مبتنی بر نظرات کارشناسان است. مدل به دست آمده ممکن است تا حدی دچار سوگیری باشد. هر تصمیم‌گیری به تجربه، علائق و برخی تعصبات تصمیم‌گیرندگان بستگی دارد. از این‌رو، قضاوت تصمیم‌گیرندگان احتمالاً با یکدیگر متفاوت است. همه کارشناسان منتخب از ایران بودند. بنابراین، نتیجه برای زنجیره تامین پتروشیمی در کشور ایران مناسب است و ممکن است برای سایر کشورهای در حال توسعه معتبر باشد. این کار تحقیقاتی را می‌توان برای حذف تعصب با مجموعه‌ای گسترده‌تر از داده‌ها با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و تحلیل حساسیت گسترش داد. علاوه بر این، کار فعلی را می‌توان برای یافتن رابطه علت و معلولی بین این موانع با رویکرد سیستمی پویا گسترش داد.

## ۸- مراجع

- [1] S. Narula, J. P. Tamvada, A. Kumar, H. Puppala, and N. Gupta, "Putting digital technologies at the forefront of Industry 0/5 for the implementation of a circular economy in manufacturing industries," *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2023. DOI: 10.1109/TEM.2023.3344373
- [2] S. S. Kamble, A. Gunasekaran, and S. A. Gawankar, "Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 117, pp. 408-425, 2018. DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.009
- [3] X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang, "Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 61, pp. 530-535, 2021. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006
- [4] P. Fraga-Lamas, S. I. Lopes, and T. M. Fernández-Caramés, "Green IoT and edge AI as key technological enablers for a sustainable digital transition towards a smart circular economy: An Industry 5.0 use case," *Sensors*, vol. 21, no. 17, p. 5745, 2021. DOI: 10.3390/s21175745
- [5] S. Huang, B. Wang, X. Li, P. Zheng, D. Mourtzis, and L. Wang, "Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, pp. 424-428, 2022. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.07.010
- [6] J. Leng et al., "Industry 5.0: Prospect and retrospect," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 65, pp. 279-295, 2022. DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.09.017
- [7] D. Kannan et al., "Unveiling barriers to the integration of blockchain-based circular economy and Industry 5.0 in manufacturing industries: A strategic prioritization approach," *Business Strategy and The Environment*, 2024. DOI: 10.1002/bse.3886
- [8] D. Kannan et al., "Sustainable circular supplier selection: A novel hybrid approach," *Science of the Total Environment*, vol. 722, p. 137936, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137936
- [9] K. Govindan et al., "A location-inventory-routing problem to design a circular closed-loop supply chain network with carbon tax policy for achieving circular economy: An augmented epsilon-constraint approach," *International Journal of Production Economics*, vol. 257, p. 108771, 2023. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108771

- [42] Hummels, H., & Argyrou, A. Planetary demands: Redefining sustainable development and sustainable entrepreneurship. *Journal of cleaner production*, 278, 123804. 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123804
- [43] Srivastava, S. K. Green supply-chain management a state-of-the-art literature review. *International journal of management reviews*, 9(1), 53-80, 2007. DOI:10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x
- [44] Isernia, R., Passaro, R., Quinto, I., & Thomas, A. The reverse supply chain of the e-waste management processes in a circular economy framework: Evidence from Italy. *Sustainability*, 11(8), 2430, 2019. DOI: 10.3390/su11082430
- [45] Soleimani, H., Chhetri, P., Fathollahi-Fard, A.M., Mirzapour Al-e-Hashem, S., and Shahparvari, S.: 'Sustainable closed-loop supply chain with energy efficiency: Lagrangian relaxation, reformulations and heuristics', *Annals of Operations Research*, 2022, 318, (1), pp. 531-556 DOI: 10.1007/s10479-022-04661-z
- [46] Zou, H., Qin, J., Yang, P., and Dai, B.: 'A coordinated revenue-sharing model for a sustainable closed-loop supply chain', *Sustainability*, 2018, 10, (9), pp. 3198 DOI: 10.3390/su10093198
- [47] Nasr, A.K., Tavana, M., Alavi, B., and Mina, H.: 'A novel fuzzy multi-objective circular supplier selection and order allocation model for sustainable closed-loop supply chains', *Journal of Cleaner production*, 2021, 287, pp. 124994 DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124994
- [48] Lozano-Oviedo, J., Cortés, C.E., and Rey, P.A.: 'Sustainable closed-loop supply chains and their optimization models: a review of the literature', *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2024, 26, (4), pp. 999-1023 DOI: 10.1007/s10098-023-02730-w
- [49] Shirazi, H., Bakhtiari, H., & Ghasemian Sahebi, I. Studying the influence of trust and commitment on sustainable supply chain performance considering the mediating role of supply flexibility The case of the petrochemical industry. *Research in Production and Operations Management*, 15(1), 29-50, 2024. DOI: 10.22108/pom.2024.138777.1525
- [50] Muhindo, A., Zhou, J., & Mzuza, M. K. Impact of logistics outsourcing strategy in oil and gas industry in Uganda. *International Journal of Business and Management*, 9(6), 187, 2014. DOI: 10.5539/ijbm.v9n6p187
- [51] Lambert, D. M., & Enz, M. G. Issues in supply chain management: Progress and potential. *Industrial marketing management*, 62, 1-16, 2017. DOI: 10.1016/j.indmarman.2016.12.002
- [۵۲] کیانی، م، عندلیب اردکانی، د، میرفرخالدینی، ح و زارع احمدآبادی، ح. تحلیلی بر موانع پیاده سازی اقتصاد مدور و صنعت ۴،۰ در زنجیره تامین: رویکرد فراترکیب و دنپ فازی. چشم‌انداز مدیریت صنعتی. ۱۳(۴)، ۹-۴۵ (۱۴۰۲). DOI: 10.48308/jimp.13.4.9
- [۵۳] کیانی، م، عندلیب اردکانی، د، میرفرخالدینی، ح و زارع احمدآبادی، ح. تحلیلی بر توانمندی‌های موثر بر پیاده سازی اقتصاد مدور و صنعت ۴،۰ در زنجیره تامین. مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۱(۷۰)، ۱-۴۳ (۱۴۰۲). DOI: 10.22054/jims.2023.71900.2835
- [۵۴] جهانی، م، مقبل باعرض، ع، و آذر، ع. طراحی مدل سنجش تاب آوری زنجیره تأمین با رویکرد مدل سازی معادلات ساختاری. چشم انداز مدیریت صنعتی، ۷(۲۵)، ۹۱-۱۱۴ (۱۳۹۶).
- [۵۵] روفی راد، م. شناسایی و اولویت بندی شاخص های پایداری زنجیره تامین پتروشیمی با بهره گیری از تکنیک دیمتل. اولین همایش بین المللی مدیریت پایداری. (۱۴۰۳). <https://civilica.com/doc/2159994>
- [۵۶] رفیعیان اصفهانی، م، یزدانی، بیتا، براتی، م، نقش، ا، و جنتیان، ن. طراحی مدل بلوغ پایداری زنجیره تامین با رویکرد بهبود مستمر (مورد مطالعه: صنعت داروسازی ایران). (۱۴۰۲). <https://civilica.com/doc/1942315>
- [26] Bemon, M., Tjahjono, B., & Ripanti, E. F. Aligning retail reverse logistics practice with circular economy values: an exploratory framework. *Production Planning & Control*, 29(6), 483-497, 2018. DOI: 10.1080/09537287.2018.1449266
- [27] Atif, S. Analysing the alignment between circular economy and industry 4.0 nexus with industry 5.0 era: An integrative systematic literature review. *Sustainable Development*, 31(4), 2155-2175, 2023. DOI: 10.1002/sd.2542
- [28] Atif, S., Ahmed, S., Wasim, M., Zeb, B., Pervez, Z., & Quinn, L. Towards a conceptual development of industry 4.0, servitisation, and circular economy: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(11), 6501, 2021. DOI: 10.3390/su13116501
- [29] Pearce, D. W., & Turner, R. K. Economics of natural resources and the environment. Johns Hopkins University Press, 1989.
- [30] Turner, R. K., & Pearce, D. W. The ethical foundations of sustainable economic development. International Institute for Environment and Development London, UK, 1990.
- [31] MacArthur, E. Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1), 23-44, 2013.
- [32] Dev, N. K., Shankar, R., & Qaiser, F. H. Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104583, 2020. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104583
- [33] Hasheminasab, H., Hashemkhani Zolfani, S., Kazimieras Zavadskas, E., Kharrazi, M., & Skare, M. A circular economy model for fossil fuel sustainable decisions based on MADM techniques. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 35(1), 564-582, 2022. DOI: 10.1080/1331677X.2021.1926305
- [34] Karuppiyah, K., Sankaranarayanan, B., Ali, S. M., Jabbour, C. J. C., & Bhalaji, R. Inhibitors to circular economy practices in the leather industry using an integrated approach: Implications for sustainable development goals in emerging economies. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1554-1568, 2021 DOI: 10.1016/j.spc.2021.03.015
- [35] Ranta, V., Aarikka-Stenroos, L., Ritala, P., & Mäkinen, S. J. Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: A cross-regional comparison of China, the US, and Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 70-82, 2018. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.017
- [36] Sindhvani, R., Afridi, S., Kumar, A., Banaitis, A., Luthra, S., & Singh, P. L. Can industry 5.0 revolutionize the wave of resilience and social value creation? A multi-criteria framework to analyze enablers. *Technology in Society*, 68, 101887, 2022. DOI: 10.1016/j.techsoc.2022.101887
- [37] Saniuk, S., Grabowska, S., & Straka, M. Identification of social and economic expectations: Contextual reasons for the transformation process of Industry 4.0 into the Industry 5.0 concept. *Sustainability*, 14(3), 1391, 2022. DOI: 10.3390/su14031391
- [38] Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Luxembourg, LU: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 46, 2021.
- [39] Enang, E., Bashiri, M., & Jarvis, D. Exploring the transition from techno centric industry 4.0 towards value centric industry 5.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 61(22), 7866-7902, 2023. DOI: 10.1080/00207543.2023.2221344
- [40] Kakadellis, S., Woods, J., & Harris, Z. M. Friend or foe: Stakeholder attitudes towards biodegradable plastic packaging in food waste anaerobic digestion. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105529, 2021. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105529
- [41] Diaz-Chao, Á., Ficopal-Cusi, P., & Torrent-Sellens, J. Environmental assets, industry 4.0 technologies and firm performance in Spain: A dynamic capabilities path to reward sustainability. *Journal of cleaner production*, 281, 125264, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125264

- [68] Leong, H., Chang, C.-K., Khoo, K. S., Chew, K. W., Chia, S. R., Lim, J., Chang, J.-S., & Show, P.-L. (2021). Waste biorefinery towards a sustainable circular bioeconomy: A solution to global issues. *Biotechnology for Biofuels*, 14, 1-15. DOI: 10.1186/s13068-021-01939-5.
- [69] Bocken, N. M., De Pauw, I., Bakker, C., & Van Der Grinten, B. Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308-320, 2016. DOI: 10.1080/21681015.2016.1172124
- [70] Hazen, B. T., Mollenkopf, D. A., & Wang, Y. Remanufacturing for the circular economy: An examination of consumer switching behavior. *Business Strategy and the Environment*, 26(4), 451-464, 2017. DOI: 10.1002/bse.1929
- [71] Kirchherr, J., et al. Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecological Economics*, 150, 264-272, 2018. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.04.028
- [72] Kabeyi, D., & Olanrewaju, O. Review and design overview of plastic waste-to-pyrolysis oil conversion with implications on the energy transition. *Journal of Energy*, 2023, 1-25, 2023. DOI: 10.1155/2023/1821129
- [73] Huysman, S., De Schaepmeester, J., Ragaert, K., Dewulf, J., & De Meester, S. Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 120, 46-54, 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.01.013
- [74] Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., & Sacconi, N. Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies. *Sustainability*, 10(3), 639, 2018. DOI: 10.3390/su10030639
- [75] Kaiser, K., Schmid, M., & Schlummer, M. Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging: A Review. *Recycling*, 3(1), 1, 2018. DOI: 10.3390/recycling3010001
- [76] de Tommaso, J., Galli, F., Weber, R., Dubois, J.-L., & Patience, G. Total capital investment of plastic recycling plants correlates with energy losses and capacity. *ChemSusChem*, 17, 10.1002/cssc.202301172, 2024. DOI: 10.1002/cssc.202301172
- [77] Kassab, A., Al Nabhani, D., Mohanty, P., Pannier, C., & Ayoub, G. Y. Advancing Plastic Recycling: Challenges and Opportunities in the Integration of 3D Printing and Distributed Recycling for a Circular Economy. *Polymers*, 15(19), 3881, 2023. DOI: 10.3390/polym15193881
- [57] علی پور، ح، سلطان پناه، م، و فاطمی، ع. ارائه مدلی جهت ارزیابی مدیریت عملکرد زنجیره تامین سبز در صنعت پتروشیمی با استفاده از روش داده بنیاد. فصلنامه جغرافیایا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، ۱۲ (۴۹)، (۱۴۰۱). DOI: 10.22034/jgeoq.2023.363027.3871
- [58] کاماسی، ح، میرزاپور آل هاشم، سید م ج، طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار با بکارگیری اصول ناب. مدیریت زنجیره تامین، ۲۲ (۶۹)، ۱۰۱-۱۱۶. (۱۳۹۹).
- [59] م، پیام، عالم تبریز، ا، ارشادی، م ج، و عزیزی، ا. ارائه مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای زنجیره تامین حلقه بسته تاب آور پایدار با در نظر گرفتن معیار پاسخگویی و اثرات غیر قطعی کووید ۱۹. مدیریت زنجیره تامین، ۲۵ (۷۹)، ۶۷-۸۶. (۱۴۰۲).
- [60] بابایی مراد، س. محبی، م، و باقری، ح. ارائه مدلی برای طراحی شبکه زنجیره تامین سبز و در نظر گرفتن فروش از دست‌رفته. مدیریت زنجیره تامین، ۲۲ (۶۶)، ۷۴-۶۳. (۱۳۹۹).
- [61] Turner, C., Oyekan, J., Garn, W., Duggan, C., & Abdou, K. Industry 5.0 and the circular economy: Utilizing LCA with intelligent products. *Sustainability*, 14(22), 14847, 2022. DOI: 10.3390/su142214847
- [62] J. Ebrahimpour Samani, N. Khani, B. Yazdani, and S. M. R. Davoudi, "Designing a sustainable supply chain model in the food and agriculture industries with an emphasis on economic, social, and environmental dimensions: An application of the interpretive structural modeling method", *Supply Chain Management*, vol. 26, no. 84, pp. 77-102, 2024.
- [63] M. Ahmad, X.-W. Tang, J.-N. Qiu, and F. Ahmad, "Interpretive structural modeling and MICMAC analysis for identifying and benchmarking significant factors of seismic soil liquefaction," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 2, p. 233, 2019. DOI:10.3390/app9020233.
- [64] Fleischmann, J., et al. Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. *McKinsey & Company*, 2-18, 2023.
- [65] Mulakkal, M., Castillo, A., Taylor, A., Blackman, B., Balint, D., Pimenta, S., & Charalambides, M. Advancing mechanical recycling of multilayer plastics through finite element modelling and environmental policy. *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105371, 2021. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105371
- [66] M. Farsi and B. Honarvar, "Applications of Nanotechnology in Oil and Petrochemical Industries," in *Proc. First National Conf. on Nanotechnology Applications in Oil and Petrochemical Industries*, Mahshahr, Iran, 2012. Available: DOI: civillca.com/doc/179523.
- [67] H. Gholampour Arbastan and M. Rezaei, "Intelligent Waste Management in the Country," *Monthly Expert Reports of the Parliament Research Center of the Islamic Consultative Assembly*, vol. 32, no. 2, p. 19726, 2024. DOI: 10.22034/report.2024.16832.1749.