Research in Production and Operations Management
University of Isfahan E-ISSN: 2981-0329
Vol. 17, Issue 3, No. 46, 2026
DOI: 10.22108/POM.2026.148533.1657

(Research paper)

Barriers to Implementing the Circular Economy in the Automotive Parts Manufacturing Industry: A Pythagorean Fuzzy DEMATEL Approach

Mahsa Pishdar *
Department of Industrial Management and Technology, Faculty of Management and Accounting-College of Farabi, University of Tehran, Tehran, Iran, mahsa.pishdar@ut.ac.ir
Meysam Parvani
Department of Industrial Management and Technology, Faculty of Management and Accounting-College of Farabi, University of Tehran, Tehran, Iran, meysamparvani@gmail.com

Purpose: The transition from a linear "take–make–dispose" industrial paradigm to a circular economy (CE) has become a strategic imperative for sustainable development. Circular supply chains (CSCs) operationalize circular principles through closed-loop processes involving reuse, remanufacturing, recycling, and recovery. While industrialized economies have made notable progress, developing nations continue to face systemic, institutional, and technological bottlenecks. In Iran's automotive parts manufacturing industry, operations remain predominantly linear, characterized by high reliance on virgin materials, underdeveloped reverse logistics, and minimal integration of remanufacturing considerations into early design stages. Although the benefits of CSCs—such as resource efficiency, emissions reduction, and supply chain resilience—are widely recognized, implementation is hindered by deeply interconnected structural challenges. Existing scholarship largely presents fragmented barrier lists without examining their causal mechanisms or directional interdependencies. Therefore, the primary purpose of this study is to systematically identify, validate, and evaluate the structural barriers impeding CSC adoption in Iran's automotive parts manufacturing sector, and to model the causal network structure among these barriers under conditions of decision-making uncertainty.

Design/methodology/approach: This research employs an applied, descriptive-survey methodology organized into two sequential phases. In the first phase, a comprehensive systematic literature review was conducted to synthesize existing knowledge, yielding an initial pool of 18 potential barriers across five core dimensions:

* Corresponding author, 0000-0003-4517-8796 2981-0329 / © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)
How to cite: Pishdar, M. , and Parvani, M. (2026). Barriers to Implementing the Circular Economy in the Automotive Parts Manufacturing Industry: A Pythagorean Fuzzy DEMATEL Approach. *Research in Production and Operations Management*, 17(3), 1-22. doi: 10.22108/pom.2026.148533.1657

technical, economic, regulatory, cultural, and operational. To screen, contextualize, and validate these barriers within the target industrial environment, the fuzzy Delphi method was applied. Purposive sampling was used to engage an expert panel of nine senior and middle managers from leading automotive parts manufacturing and trading enterprises, selected for their specialized expertise in supply chain management, design engineering, industrial operations, and financial governance. Through fuzzy aggregation operators and a predefined defuzzification acceptance threshold, the initial set was refined to ten critical structural barriers. In the second phase, the Pythagorean Fuzzy Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) approach was employed to examine the direct, indirect, and total influence among the validated barriers. The use of Pythagorean fuzzy sets substantially expands the membership–non-membership decision space, capturing epistemic uncertainty and expert ambiguity more effectively than classical fuzzy sets. This approach produced a prominence–relation causal diagram and categorized the barriers into decisive cause and effect groups.

Findings: The empirical results reveal a complex and highly interdependent causal network shaping CSC adoption. The barrier "considering re-manufacturability in the initial design of parts" emerged as the most influential driving factor in the system, exhibiting the highest net causal influence ($D-R > 0$). This indicates that Design-for-Circularity (DfC) and modular architecture constitute essential upstream prerequisites for enabling viable downstream recovery processes. Additional prominent cause-group factors include regulatory frameworks that disproportionately incentivize the use of virgin materials, ongoing instability in export markets, and the substantial capital investment required for remanufacturing infrastructure. Conversely, factors such as the operational difficulty and occupational risks associated with disassembly and reassembly, comparatively low short-term profitability relative to linear production, and deep-seated negative consumer perceptions of remanufactured parts were classified within the net effect group ($D-R < 0$). These dependent barriers are symptoms of upstream regulatory and design-stage deficiencies rather than autonomous impediments.

Research limitations/implications: A primary limitation of this research arises from its empirical focus on expert panels within Iran's automotive parts sector. Although this provides strong contextual grounding, it may limit the direct generalizability of the findings to more mature regulatory environments or to other manufacturing industries. Furthermore, while the Pythagorean Fuzzy DEMATEL method effectively captures structural interdependencies and directional causality, it relies on static, cross-sectional expert evaluations. Future research should incorporate dynamic modeling approaches, such as System Dynamics or Agent-Based Modeling, to examine the temporal evolution of these barriers across extended transition periods. Comparative studies involving emerging Middle Eastern and broader Global South economies would also help establish cross-jurisdictional validity.

Practical implications: The study provides strategic decision-support insights for automotive executives, operations managers, and design engineers. Practitioners should shift operational priorities from end-of-pipe recovery toward upstream design interventions by incorporating Design-for-Disassembly (DfD) and modular component standards. Manufacturing firms are encouraged to develop collaborative supply ecosystems with tier-one suppliers to distribute the substantial capital investment required for specialized remanufacturing lines. Additionally, the adoption of digital traceability platforms—such as digital product passports—can streamline reverse logistics, reduce disassembly-related risks, and ensure the quality of secondary components, thereby helping to mitigate negative market perceptions.

Social implications: A systemic transition toward circular automotive supply chains enhances social welfare by reducing landfill burdens, lowering industrial emissions, and conserving critical mineral resources. At the policy level, the findings indicate that regulatory authorities should remove tariff and subsidy structures that privilege virgin inputs over circular feedstocks. Targeted fiscal incentives, extended producer responsibility (EPR) mandates, and standardized remanufacturing certification programs can protect consumers, legitimize remanufactured products in domestic markets, and stimulate employment in green industrial sectors.

Originality/value: This research contributes to circular supply chain theory and practice in three key ways. First, it addresses a significant contextual gap by examining structural CSC barriers within a developing, resource-constrained automotive manufacturing environment. Second, it enhances methodological rigor by integrating Pythagorean fuzzy sets with DEMATEL, demonstrating improved capacity to model hesitation and subjective expert judgments in circular transition research. Third, rather than presenting unweighted lists of obstacles, the study reveals the underlying causal hierarchy of CSC barriers, distinguishing structural root causes from downstream symptoms and offering a targeted intervention roadmap for industrial transition.

Keywords: Circular Economy, Circular Supply Chain (CSC), Automotive Parts Manufacturing, Pythagorean Fuzzy DEMATEL, Fuzzy Delphi method, Structural barriers, Design for Remanufacturing, Developing countries

پژوهش در مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۷، شماره ۳، پیاپی ۴۶، ۱۴۰۵
دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۹ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱ ص ۱-۲۲
DOI: 10.22108/POM.2026.148533.1657

(مقالهٔ پژوهشی)

موانع پیاده‌سازی اقتصاد دایره‌ای در صنعت قطعه‌سازی خودرو: رویکرد دیمتل فازی-فیثاغورثی

مهسا پیشدار[1*]؛ میثم پروانی[2]

۱- استادیار گروه مدیریت صنعتی و تکنولوژی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، mahsa.pishdar@ut.ac.ir
۲- کارشناسی ارشد گروه مدیریت صنعتی و تکنولوژی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشکدگان فارابی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، meysamparvani@gmail.com

چکیده: با وجود مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی اقتصاد دایره‌ای، گذار از الگوی خطی به زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای در صنایع تولیدی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، با موانع ساختاری و بین‌بخشی متعددی مواجه است. پژوهش حاضر با هدف شناسایی، پالایش و تحلیل روابط علّی-معلولی میان موانع پیاده‌سازی زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای در صنعت قطعه‌سازی خودرو ایران انجام شده است. در مرحلهٔ اول، با استفاده از مرور نظام‌مند پیشینه، ۱۸ مانع در پنج دستهٔ اصلی شامل موانع تکنیکی، اقتصادی، قانون‌گذاری، فرهنگی و عملیاتی شناسایی شد؛ سپس با به‌کارگیری روش دلفی فازی و بر پایهٔ نظر ۹ نفر از مدیران ارشد و میانی شرکت‌های فعال در صنعت قطعه‌سازی، این موانع به ۱۰ مانع کلیدی تقلیل یافت. در مرحلهٔ دوم، برای تحلیل ساختار روابط درون‌سیستمی میان موانع و تفکیک عوامل علّی از معلولی، از روش دیمتل فازی فیثاغورثی استفاده شد؛ روشی که امکان مدل‌سازی ابهام و عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان را فراهم می‌کند. نتایج نشان داد که مانع «لزوم در نظر گرفتن قابلیت بازتولید در طراحی اولیهٔ قطعات» با بالاترین مقدار **D−R**، اثرگذارترین متغیر در شبکهٔ علّی موانع است. همچنین مانع «ریسک و دشواری دمونتاژ و مونتاژ قطعات»، بیشترین اثرپذیری را دارد و مهم‌ترین عامل معلولی است. یافته‌ها نشان می‌دهد که اصلاح رویکرد طراحی محصول، تقویت حمایت‌های سیاستی و نهادی و تأمین مالی مناسب، از مهم‌ترین پیش‌شرط‌های تسهیل‌گذار به زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای در صنعت قطعه‌سازی خودرو به شمار می‌روند. این پژوهش با ارائهٔ نقشهٔ علّی موانع، مبنای تحلیلی را برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و سیاستی در مسیر استقرار اقتصاد دایره‌ای فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اقتصاد دایره‌ای، زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای، روش دیمتل فازی فیثاغورثی، صنعت قطعه‌سازی خودرو

* نویسنده مسئول، 0000-0003-4517-8796

2981-0329 / © University of Isfahan
This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

استناد به این مقاله: پیشدار، مهسا و پروانی، میثم . (۱۴۰۵). موانع پیاده‌سازی اقتصاد دایره‌ای در صنعت قطعه‌سازی خودرو: رویکرد دیمتل فازی-فیثاغورثی . *پژوهش در مدیریت تولید و عملیات* ۱۷(۳)، ۱-۲۲. doi: 10.22108/pom.2026.148533.1657 .

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، الگوی سنتی اقتصاد خطی مبتنی بر «برداشت-تولید-دورریز»، با چالش‌های جدی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی مواجه شده است (Suman & Rajak, 2025). در پاسخ به این چالش‌ها، مفهوم اقتصاد دایره‌ای، پارادایمی نوین مطرح شده است که بر حفظ ارزش منابع، مواد و محصولات در طولانی‌ترین زمان ممکن، حداقل‌سازی پسماند و بازیابی مجدد در چرخهٔ تولید تأکید دارد. این رویکرد نه‌تنها راهبردی کلیدی برای دستیابی به اهداف توسعهٔ پایدار و کاهش فشار بر منابع طبیعی محدود محسوب می‌شود، به ایجاد مزیت رقابتی، افزایش تاب‌آوری زنجیرهٔ تأمین و خلق ارزش اقتصادی جدید نیز منجر می‌شود (Roshanbakhsh et al., 2025).

صنعت قطعه‌سازی خودرو در ایران، حلقهٔ اتصال صنعت خودروسازی در یک زنجیرهٔ ارزش گسترده محسوب می‌شود و از اهمیت راهبردی برخوردار است. با این حال، این صنعت در حال حاضر عمدتاً در چارچوب یک الگوی خطی عمل می‌کند که با مصرف بالای منابع، تولید ضایعات درخور توجه و وابستگی زیاد به واردات مواد اولیه و قطعات مشخص می‌شود. تحریم‌های بین‌المللی، نوسانات ارزی، چالش‌های زیست‌محیطی مانند مصرف انرژی بالا و مدیریت پسماندهای صنعتی و فشار برای افزایش بهره‌وری و رقابت‌پذیری، ضرورت تحول به‌سمت اقتصاد دایره‌ای را در این صنعت بیش از پیش آشکار کرده است (Mahboubkheirkhah et al., 2025). پیاده‌سازی این پارادایم به افزایش خوداتکایی، کاهش هزینه‌های تولید، کاهش آلودگی محیطی و ارتقای جایگاه این صنعت در زنجیرهٔ ارزش جهانی منجر می‌شود. زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای در صنعت قطعه‌سازی خودرو، یک رویکرد نوین برای مدیریت منابع و کاهش آثار زیست‌محیطی مطرح شده است. با این حال، اجرای مؤثر این زنجیره با چالش‌ها و موانع متعددی مواجه است که به تحقق‌نیافتن اهداف پایداری و کارایی منجر می‌شود (Suman & Rajak, 2025).

با وجود مزایای آشکار، گذار از اقتصاد خطی به دایره‌ای در صنعت قطعه‌سازی ایران، با موانع ساختاری عمیق و درهم‌تنیده‌ای روبه‌رو است. این موانع تنها فنی یا مالی نیست، در ساختارهای نهادی، زیرساختی، قانونی، فرهنگی و شبکه‌ای نیز ریشه دارد (Sabale et al., 2025)؛ برای مثال، به نبود چارچوب‌های قانونی و مشوق‌های کافی، ضعف در زیرساخت‌های بازیافت و بازیابی مواد پیشرفته، الگوهای کسب‌وکار خطی جاافتاده، مقاومت در برابر تغییر، پراکندگی و ضعف همکاری بین بازیگران زنجیرهٔ تأمین، محدودیت‌های فناورانه و کمبود سرمایه‌گذاری در نوآوری‌های دایره‌ای اشاره می‌شود. درک این موانع به‌مثابهٔ یک «سیستم» در هم تنیده، که در آن عوامل بر یکدیگر تأثیر متقابل و پویا می‌گذارند، برای طراحی راهبردهای مؤثر تغییر، امری حیاتی است (Hosseini et al., 2024).

به این ترتیب، مسئلهٔ این پژوهش آن است که با وجود شناخت اولیه از مزایای اقتصاد دایره‌ای، شناسایی، تحلیل و تعیین روابط علّی-معلولی میان موانع ساختاری کلیدی پیاده‌سازی آن در صنعت قطعه‌سازی خودرو ایران، به‌طور نظام‌مند و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ذهنی موجود در نظرات خبرگان، انجام نشده است. پرسش اصلی چنین مطرح می‌شود که کدام یک از موانع ساختاری، نقش علّی بنیادین‌تری در سیستم دارند، به‌عنوان مانع محوری عمل می‌کنند و چگونه اولویت‌بندی و تقدم اقدام برای مقابله با آنها انجام می‌شود؟

این مقاله برای پاسخ به این پرسش‌ها، از رویکرد دیمتل فازی-فیثاغورثی بهره می‌گیرد. این روش ترکیبی قدرتمند، امکان مدل‌سازی روابط پیچیدهٔ تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بین عوامل را در یک محیط فازی فراهم می‌آورد. استفاده از مجموعه‌های فازی فیثاغورثی نیز، دامنهٔ انعطاف بیشتری را برای ثبت عدم قطعیت در قضاوت‌های خبرگان ارائه می‌دهد. خروجی این روش، تشخیص عوامل «علّی» مؤثر بر سیستم از عوامل «معلولی»، ترسیم نقشهٔ روابط شبکه‌ای (نقشهٔ تأثیرگذاری متقابل) و تعیین درجهٔ اهمیت هر مانع با توجه به روابط درون‌سیستمی آن است.

این مطالعه ازنظر کاربردی به سیاست‌گذاران صنعتی، مدیران ارشد شرکت‌های قطعه‌سازی و خودروسازی و نهادهای حاکمیتی کمک می‌کند تا با درک ساختاریافته از موانع و روابط آنها، منابع و تلاش‌های خود را بر اهرم‌های تغییر کلیدی متمرکز و راهبردهای عملیاتی کارآمدی را برای تسریع گذار به اقتصاد دایره‌ای در این صنعت حیاتی طراحی کنند.

پس نوآوری مقالهٔ حاضر در سه محور اصلی تبیین می‌شود. در ابتدا، نوآوری این پژوهش در سطح نظری-کاربردی بوده و به بومی‌سازی روش خلاصه نشده است. این مطالعه، ساختار پنهان روابط علّی موانع را در بستر یک «اقتصاد در حال توسعهٔ تحت فشار تحریم‌های ساختاری» به واکاوی می‌کند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در چنین بسترهایی، متغیر «طراحی اولیه با قابلیت بازتولید» نه‌تنها یک مانع فنی است، به یک «ابراهرم ساختاری» نیز تبدیل می‌شود که دیگر موانع مالی و عملیاتی را بازتولید می‌کند. این یافته، پیشینهٔ موجود را به چالش می‌کشد که معمولاً موانع مالی را در رأس علیت قرار می‌دهند و با افزودن بعد «تاب‌آوری زنجیرهٔ تأمین در برابر شوک‌های بیرونی (ارزی و تحریمی)» به مدل‌های خطی انتقال به اقتصاد دایره‌ای، مرزهای دانش نظری را در حوزهٔ اقتصادهای نوظهور بسط می‌دهد. دوم، از جنبهٔ روش‌شناختی، ترکیب روش دیمتل با مجموعه‌های فازی فیثاغورثی برای تحلیل ساختاری موانع، یک پیشرفت کاربردی است. این رویکرد نه‌تنها امکان مدل‌سازی کیفی و کمی روابط متقابل پیچیده را فراهم می‌آورد، با گسترش فضای تصمیم‌گیری خبرگان، قادر است سطوح بالاتری از ابهام و عدم قطعیت ذاتی را در قضاوت‌های مرتبط با مسائل ساختاری ایران ثبت و پردازش کند. سوم از حیث کاربردی، پژوهش با تحلیل روابط متقابل میان موانع، مبنایی را برای شناسایی عوامل اثرگذارتر و تنظیم اولویت‌های مداخلهٔ مدیریتی و سیاستی فراهم می‌کند.

۲- پیشینهٔ پژوهش

اقتصاد دایره‌ای در مفاهیم توسعهٔ پایدار و طراحی احیاگر ریشه دارد که در تقابل با پارادایم خطی مرسوم شکل گرفته است. این مفهوم بر پایهٔ نظریه‌هایی مانند «حلقه‌بستهٔ مواد» و «طرح‌بندی برای پسماند» استوار است و بر حفظ ارزش منابع ازطریق استراتژی‌های کاهش، استفادهٔ مجدد، بازیافت و بازیابی تأکید می‌ورزد (Gaur et al., 2024). زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای یک چارچوب تحولی در مدیریت زنجیرهٔ تأمین است که براساس اصول اقتصاد دایره‌ای بنا شده است. در مقابل مدل خطی سنتی «دریافت-تولید-دورریز» این رویکرد، با هدف بستن حلقه‌های جریان مواد و انرژی طراحی شده است. در این مدل، محصولات، مواد و منابع تا حد امکان در چرخهٔ اقتصادی حفظ، بازیابی، بازتولید و بازیافت می‌شوند تا از اتلاف منابع و تولید پسماند جلوگیری شود (Ahmadov et al., 2025). این امر مستلزم بازطراحی عمیق در فرآیندها، محصولات و مدل‌های کسب‌وکار است. مؤلفه‌های کلیدی آن، شامل طراحی

برای ماندگاری و بازیافت، مدل‌های کسب‌وکار دایره‌ای مانند محصول به‌عنوان سرویس، تفکیک و جمع‌آوری لجستیک کارآمد و استفاده از فناوری‌های نوین مانند ردیابی دیجیتال و پلتفرم‌های اشتراک‌گذاری داده است (Gaur et al., 2024).

زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای در صنعت خودروسازی، رویکرد نوین و پایدار است که تمرکز آن بر حفظ ارزش منابع و مواد اولیه در طول چرخهٔ عمر محصول و به حداقل رساندن ضایعات و آلودگی‌های زیست‌محیطی است. در این الگو، خودروها از مراحل طراحی تا پایان عمر، به‌گونه‌ای مهندسی می‌شوند که قطعات و مواد به‌سادگی قابلیت جداسازی، بازیافت، بازسازی و استفادهٔ مجدد داشته باشند. این فرآیند علاوه بر وابستگی خودروسازان به منابع طبیعی، با استفاده از مواد بازیافتی و زیست‌پایه، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز کاهش می‌دهد. فناوری‌هایی مانند طراحی مدولار قطعات، استفاده از آلومینیوم و پلاستیک بازیافتی و بهره‌گیری از فرآیندهای تولید پیشرفته، ازجمله مؤلفه‌های اصلی این چرخه‌اند (Iglesias-Émbil et al., 2025). استقرار این رویکرد، علاوه بر دستیابی به منافع زیست‌محیطی و اقتصادی، موجب خلق ارزش‌افزوده، نوآوری در محصولات و افزایش رقابت‌پذیری شرکت‌های خودروسازی در بازار جهانی می‌شود (Martins et al., 2021).

به‌طور مشخص زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای به‌عنوان یک چارچوب تحولی مبتنی بر اصول اقتصاد دایره‌ای، در مقابل مدل خطی سنتی قرار دارد و با هدف بستن حلقه‌های جریان مواد و انرژی، محصولات و منابع را تا حد امکان در چرخهٔ اقتصادی حفظ و بازیابی می‌کند (Wamane, 2025). این رویکرد مستلزم بازطراحی اساسی در فرآیندها، محصولات و مدل‌های کسب‌وکار است. در سطح صنعتی، صنعت خودرو به‌دلیل حجم عظیم مصرف مواد و انرژی، کانون اصلی توجه پژوهش‌ها و اجرای این مفهوم بوده است. تجارب بین‌المللی نشان می‌دهد که راهبردهای کلیدی ازجمله بازطراحی محصول برای تفکیک آسان و ماندگاری، استقرار مدل‌های کسب‌وکار دایره‌ای مانند «محصول به‌عنوان سرویس»، بازیافت پیشرفتهٔ خودروهای اسقاطی با استفاده از فناوری‌هایی مانند بازیافت شیمیایی، بازتولید قطعات و ادغام مواد بازیافتی با کیفیت تضمین‌شده در تولید اولیه، به‌طور هم‌زمان چندین هدف را محقق می‌کنند (Nagamalini, & Wesley, 2025).

بالداساری و همکاران[1] (۲۰۲۵) در مطالعهٔ خود، گردش‌پذیری پلاستیک را در بخش خودروسازی اتحادیهٔ اروپا بررسی کردند. تمرکز مطالعه بر محرک‌ها و موانع بازیافت پلاستیک بوده است تا بر مبنای آن، گزینه‌های سیاستی مؤثر در پیش‌نویس مقررات جدید پایان عمر خودروها تعریف شود که کمیسیون اروپا در سال ۲۰۲۳ پیشنهاد داده است.

سسانا و همکاران[2] (۲۰۲۴) در پژوهش خود بیان کردند که در فضای پیچیده و پویای صنعت خودروسازی، پایداری و اقتصاد دایره‌ای به مفاهیم کلیدی بدل شده‌اند. با وجود این، حرکت به‌سوی اقتصاد دایره‌ای با موانع متعددی، به‌ویژه به‌دلیل همکاری محدود بین بازیگران زنجیرهٔ ارزش خودروسازی، مواجه است.

ون کیکن و همکاران[3] (۲۰۲۴) در پژوهش خود، مدل‌سازی، کمی‌سازی و تحلیل پیامدهای زیست‌محیطی افزایش عمر محصولات را بر مواد دایره‌ای در افق زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت بررسی کردند. زنجیرهٔ تأمین آلومینیوم نوردشدهٔ اروپایی در صنعت خودروسازی، به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش عمر محصولات باعث کاهش تقاضا برای محصولات و همچنین کاهش نیاز به منابع اولیه و ثانویه، هم در کوتاه‌مدت و هم بلندمدت می‌شود.

مارتینز و همکاران[۴] (۲۰۲۱) در مقالهٔ خود، مفهوم راهبردی «خودروی دایره‌ای» را مطرح کردند که جریان دایره‌ای را در سراسر چرخهٔ عمر محصول به کار می‌گیرد و بر کاهش، بازیابی، تعمیر، نوسازی، استفادهٔ مجدد و بازیافت همهٔ قطعات خودرو تأکید می‌کند. این فرآیندها به‌طور مستقیم بخشی از زنجیرهٔ ارزش‌اند و هدف از آنها، افزایش ارزش و چرخش‌پذیری مواد است. هدف مقاله، توسعهٔ یک مدل مفهومی با محوریت خودروهاست تا به توسعهٔ کامل یک خودروی دایره‌ای در سراسر چرخهٔ عمر محصول از طراحی تا مصرف یاری برساند و شرکت‌ها را ازنظر زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی مسئول‌تر کند.

گونزالس-سانچز و همکاران[۵] (۲۰۲۰)، چارچوب مفهومی را برای زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای ارائه کردند که از دیدگاه‌های نظری اصلی در پژوهش‌های مدیریت استراتژیک استفاده می‌کند. آنها به چهار بعد شدت بیشتر در روابط تعیین‌شده در زنجیرهٔ تأمین، انطباق لجستیک و سازمان، فناوری‌های هوشمند و یک محیط عملکردی توجه کردند. نتایج بررسی آنها نشان می‌دهد محققان به‌دنبال هماهنگی زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای، مدیریت زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای و رویکرد خرید، مصرف دایره‌ای، بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر و مدیریت زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای و فناوری‌ها هستند.

مطالعات پیشین، موانع پیاده‌سازی این پارادایم را در قالب‌های مختلفی دسته‌بندی کرده‌اند. این موانع، عمدتاً شامل چالش‌های فنی و زیرساختی (مانند فناوری‌های ناکافی بازیافت)، موانع اقتصادی و مالی (نظیر نیاز به سرمایه‌گذاری اولیهٔ بالا)، محدودیت‌های قانونی و نهادی (ضعف در چارچوب‌های سیاستی و نظارتی)، چالش‌های فرهنگی-اجتماعی (مقاومت در برابر تغییر و کمبود مهارت) و دشواری‌های مدیریتی در هماهنگی زنجیرهٔ تأمین می‌شوند. با این حال، عمدهٔ پژوهش‌های موجود، به ارائهٔ فهرستی از این موانع بسنده کرده و کمتر به تحلیل روابط علّی-معلولی و ساختار درهم‌تنیدهٔ آنها به‌عنوان یک سیستم پیچیده روی آورده‌اند. این شکاف به‌ویژه در بافت خاص صنعت قطعه‌سازی ایران، که با شرایط ویژهٔ نهادی، تحریمی و ساختاری مواجه است، مشهودتر است. موانع مستخرج از پیشینه، در جدول (۱) آورده شده است.

طبقه‌بندی اولیهٔ موانع براساس مرور پیشینه و با استفاده از رویکرد اقتباسی-استقرایی انجام شد. به این صورت که موانع شناسایی‌شده از مطالعات پیشین، بر مبنای قرابت مفهومی در چند دستهٔ اولیه شامل موانع تکنیکی-عملیاتی، اقتصادی، نهادی و قانون‌گذاری، فرهنگی و موانع طراحی و مهندسی سازمان‌دهی شدند؛ سپس در مرحلهٔ دلفی، از خبرگان خواسته شد علاوه بر بررسی و اصلاح فهرست موانع، دربارهٔ افزودن، حذف، ادغام یا بازتخصیص موانع به طبقات نیز اظهارنظر کنند؛ درنتیجه، طبقه‌بندی نهایی نه‌تنها مبتنی بر پیشینه، حاصل ترکیب شواهد نظری و اجماع خبرگان صنعتی است.

موانع تکنیکی- عملیاتی، به محدودیت‌هایی اطلاق می‌شود که از ویژگی‌های فرآیندی، فناوری‌های تولید، استانداردسازی، جریان مواد و الزامات عملیاتی زنجیرهٔ تأمین ناشی می‌شوند و پیاده‌سازی اقتصاد دایره‌ای را در سطح سیستم تولید و عملیات با مشکل مواجه می‌کنند. موانع اقتصادی – مالی به محدودیت‌های مرتبط با هزینه، سرمایه‌گذاری، سودآوری، ریسک مالی و توجیه‌پذیری اقتصادی اجرای الگوهای اقتصاد دایره‌ای اطلاق می‌شود. موانع نهادی – قانون‌گذاری به کاستی‌ها، ناسازگاری‌ها یا نبود قوانین، مقررات، مشوق‌ها و سازوکارهای حمایتی اطلاق می‌شود که انگیزهٔ لازم را برای گذار از الگوی خطی به اقتصاد دایره‌ای تضعیف می‌کنند. موانع فرهنگی و بازار، به نگرش‌ها، باورها، الگوهای رفتاری و میزان پذیرش ذی‌نفعان، به‌ویژه مصرف‌کنندگان و بازیگران بازار،

نسبت‌به محصولات بازتولیدشده و الگوهای دایره‌ای اشاره دارد. موانع فنی به محدودیت‌های مرتبط با طراحی مهندسی محصول، ویژگی‌های ساختاری قطعات، امکان دمونتاژ، تعمیر، بازتولید و ملاحظات ایمنی و عملکردی آنها اشاره دارد. درنهایت، موانع طراحی و مهندسی، به محدودیت‌های مرتبط با طراحی مهندسی محصول، ویژگی‌های ساختاری قطعات، امکان دمونتاژ، تعمیر، بازتولید و ملاحظات ایمنی و عملکردی آنها اشاره دارد.

جدول ۱- موانع پیاده‌سازی اقتصاد دایره‌ای در خودروسازی براساس پیشینهٔ پژوهش

Table 1- Barriers of circular economy implementation in car industry based on literature

طبقه	مانع	منبع
موانع تکنیکی–عملیاتی	قطعات عمدتاً نیازمند ترکیب چند مادهٔ اولیه‌اند و همین موضوع، استفاده از مواد بازیافتی را در تولید قطعات پیچیده می‌کند.	احمدو و همکاران[۶] (۲۰۲۵)، وامن[۷] (۲۰۲۵)
	تنوع تولیدکنندگان خودور در دنیا و نبود تعریف استاندارد یکسان مشکل‌ساز است.	ون کیکن و همکاران (۲۰۲۴)، گوآر و همکاران[۸] (۲۰۲۵)
	هزینهٔ بازتولید بیشتر از هزینهٔ تولید مواد اولیه است.	جنسن[۹] (۲۰۲۵)، مارتین[۱۰] (۲۰۲۵)
	بازار مصرف خودرو در خارج از مرزهای کشور تولیدکننده است.	ون کیکن و همکاران (۲۰۲۴)، وامن (۲۰۲۵)
موانع اقتصادی و مالی	بازتولید نیازمند منابع مالی بالاست.	مارتینز و همکاران (۲۰۲۱)، بلاکریشنان و همکاران[۱۱] (۲۰۲۵)
	طراحی و اجرای زنجیرهٔ تأمین معکوس، هزینهٔ بالایی دارد.	گوآر و همکاران (۲۰۲۵)، احمدو و همکاران (۲۰۲۵)
	در حال حاضر سود زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای در مقایسه با زنجیرهٔ تأمین خطی کم است.	گوآر و همکاران (۲۰۲۵)، بلاکریشنان و همکاران (۲۰۲۵)
موانع نهادی و قانون‌گذاری	بسیاری از قوانین فعلی، استفاده از مواد اولیهٔ خام را به‌جای بازیافت تشویق می‌کنند.	مارتینز و همکاران (۲۰۲۱)، گوآر و همکاران (۲۰۲۵)
	استفاده از مشوق‌های مالیاتی و قانونی برای بازتولید به‌جای تولید اولیه	ایگلسیس–امبیل و همکاران[۱۲] (۲۰۲۵) مارتین (۲۰۲۵)
	مواد اولیه در کشورهای دارای معادن به‌نسبت مواد بازتولیدشده ارزان است.	گوآر و همکاران (۲۰۲۵)، جنسن (۲۰۲۵)
	مواد اولیه سهمیه‌بندی شده است.	احمدو و همکاران (۲۰۲۵)، مارتینز و همکاران (۲۰۲۱)، ایگلسیس–امبیل و همکاران (۲۰۲۵)
موانع فرهنگی و بازار	مصرف‌کنندگان، کالای بازتولیدشده را کالای بی‌کیفیت تلقی می‌کنند.	مارتین (۲۰۲۵)، علیزاده‌افروزی و همکاران[۱۳] (۲۰۲۵)
	مصرف‌کنندگان نسبت‌به هرگونه تغییر مقاومت می‌کنند.	جنسن (۲۰۲۵)، مارتین (۲۰۲۵)
	زنجیرهٔ تأمین خطی در بازار مصرف شکل گرفته و جا افتاده است.	احمددو و همکاران (۲۰۲۵)، وامن (۲۰۲۵)
	هماهنگی و آموزش بازار مصرف برای اجرای زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای دشوار است.	ایگلسیس–امبیل و همکاران (۲۰۲۵)، مارتین (۲۰۲۵)
موانع طراحی و مهندسی	دمونتاژ و مونتاژ قطعات مشکل و دربردارندهٔ ریسک است.	احمدو و همکاران (۲۰۲۵)، گوآر و همکاران (۲۰۲۵)
	باید امکان بازتولید در طراحی اولیهٔ قطعات در نظر گرفته شود.	گوآر و همکاران (۲۰۲۵)، علیزاده‌افروزی و همکاران (۲۰۲۵)
	نبود امکان بازتولید قطعاتی که در طول عمر خود دچار حادثه می‌شوند.	ون کیکن و همکاران (۲۰۲۴)، علیزاده‌افروزی و همکاران (۲۰۲۵)

۳- روش‌شناسی پژوهش

این مقاله برای پاسخ به مسئله، از رویکرد دیمتل فازی-فیثاغورثی بهره می‌گیرد. روش دیمتل با قابلیت ترسیم روابط شبکه‌ای بین عوامل، امکان تشخیص عوامل علّی و معلولی را فراهم می‌کند. با توجه به اینکه قضاوت‌های خبرگان در محیط‌های واقعی همواره با ابهام و عدم قطعیت همراه است، ادغام این روش با مجموعه‌های فازی فیثاغورثی، امکان ثبت دقیق‌تر این ابهامات را در قالب اعداد فازی، با فضای ارزیابی گسترده‌تر ممکن می‌کند؛ بنابراین، این پژوهش با تلفیق مبانی نظری اقتصاد دایره‌ای، شناسایی موانع ساختاری در صنعت قطعه‌سازی ایران و به‌کارگیری روش پیشرفتهٔ دیمتل فازی-فیثاغورثی، در پی ارائهٔ تحلیلی نظام‌مند از ساختار روابط بین این موانع است تا نقشهٔ علّی را برای اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی فراهم آورد. پژوهش حاضر به‌لحاظ هدف، کاربردی و به‌لحاظ روش انجام، توصیفی-پیمایشی است.

این پژوهش شامل دو مرحلهٔ اصلی است: مرحلهٔ اول به فاز شناسایی موانع اجرای زنجیرهٔ تأمین در صنعت قطعه‌سازی خودرو مربوط می‌شود که ازطریق مطالعات کتابخانه‌ای موانع اولیه معین و با بهره‌گیری از تکنیک دلفی نهایی شده‌اند؛ در مرحلهٔ دوم پژوهش، میزان اهمیت هریک از شاخص‌ها تعیین می‌شود. با بهره‌گیری از تکنیک دیمتل فازی فیثاغورثی، روابط بین موانع شناسایی‌شده در مرحلهٔ قبلی معین و موانع به دو دستهٔ علت و معلول تقسیم می‌شوند. تعریف عملیاتی خبرگان در جدول (۲) قید شده است.

جدول ۲- تعریف عملیاتی خبرگان

Table 2-Operational definitions of experts

نقش در پژوهش	تحصیلات	سابقهٔ کاری (سال)	حوزهٔ تخصص اصلی	شرکت محل فعالیت	سطح مدیریتی	سمت سازمانی	کد خبره
دلفی + دیمتل	دکتری مدیریت صنعتی	۱۸	طراحی و بهینه‌سازی زنجیرهٔ تأمین قطعات خودرو	گروه عظام	ارشد	مدیر زنجیرهٔ تأمین	E1
دلفی + دیمتل	کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک	۱۶	طراحی قطعات با رویکرد قابلیت بازتولید	گروه عظام	ارشد	مدیر مهندسی محصول	E2
دلفی + دیمتل	دکتری مدیریت بازرگانی	۲۰	توسعهٔ بازار صادراتی و مدیریت بازارهای خارجی	بازرگانی الدورا	ارشد	مدیر برنامه‌ریزی استراتژیک	E3
دلفی + دیمتل	کارشناسی ارشد حسابداری	۱۷	تأمین مالی پروژه‌های صنعتی و تحلیل اقتصادی بازتولید	بازرگانی الدورا	ارشد	مدیر مالی صنعتی	E4
دلفی + دیمتل	کارشناسی ارشد مهندسی صنایع	۱۴	فرآیندهای تولید و بهینه‌سازی مصرف مواد اولیه	گروه عظام	میانی	مدیر تولید	E5
دلفی + دیمتل	دکتری مهندسی مواد	۱۵	فناوری‌های بازیافت و بازتولید قطعات	بالتین	ارشد	مدیر پژوهش و توسعه (R&D)	E6
دلفی + دیمتل	کارشناسی ارشد مدیریت لجستیک	۱۳	طراحی زنجیرهٔ تأمین معکوس و مدیریت بازگشت قطعات	بالتین	میانی	مدیر لجستیک و تأمین معکوس	E7
دلفی + دیمتل	کارشناسی ارشد مهندسی کیفیت	۱۲	استانداردسازی قطعات و تضمین کیفیت مواد بازیافتی	گروه عظام	میانی	مدیر کیفیت و استاندارد	E8
دلفی + دیمتل	کارشناسی ارشد مدیریت بازرگانی	۱۹	رفتار مصرف‌کننده و بازار قطعات یدکی	بازرگانی الدورا	میانی	مدیر بازرگانی داخلی	E9

۳-۱ مجموعه‌های فازی فیثاغورثی

یَگر[۱۴] (۲۰۱۳) مجموعه‌های فازی فیثاغورثی را مطرح کرد. مجموعه‌های فازی فیثاغورثی، که به‌عنوان تعمیمی پیشرفته‌تر از مجموعه‌های فازی معمولی مطرح می‌شوند، با هدف پوشش دامنهٔ وسیع‌تری از عدم قطعیت در قضاوت‌های انسانی توسعه یافته‌اند. در این چارچوب، هر گزاره یا قضاوت با سه مؤلفهٔ اصلی درجهٔ عضویت (میزان موافقت)، درجهٔ عدم عضویت (میزان مخالفت) و درجهٔ بی‌تصمیمی کمّی‌سازی می‌شود که از رابطهٔ فیثاغورثی بین این دو حاصل می‌شود. شرط اساسی در این نظریه، برقراری رابطه‌ای به شکل مجموع مربعات درجهٔ عضویت و عدم عضویت است که باید کوچک‌تر یا مساوی یک باشد. این شرط در مقایسه با مدل‌های پیشین، فضای تصمیم‌گیری را به‌طور درخور توجهی گسترش می‌دهد. این انعطاف‌پذیری بیشتر، باعث می‌شود تا مجموعه‌های فازی فیثاغورثی ابهام و تردید ذاتی را در نظرات خبرگان، به‌ویژه در مسائل پیچیدهٔ مبتنی بر قضاوت مانند شناسایی و تحلیل روابط بین موانع ساختاری، با دقت و واقع‌نمایی بهتری مدل کنند.

تعریف ۱. مجموعهٔ فازی فیثاغورثی تعریف‌شده بر X به‌صورت رابطهٔ (۱) است (Yang, 2025):

$$P = \{\langle x, \mu_p(x), \nu_p(x)\rangle \mid x \in X\} \quad (۱)$$

که در آن $\mu_p: X \to [۰,۱]$ و $\nu_p: X \to [۰,۱]$ به ترتیب تابع عضویت و عدم عضویت‌اند که شرط رابطهٔ (۲) را برآورده می‌کنند.

$$۰ \le \left(\mu_p(x)\right)^2 + \left(\nu_p(x)\right)^2 \le 1, \forall x \in X \quad (۲)$$

درجهٔ عضویت نادقیق با نماد $\pi_p(x)$ نمایش داده و به‌صورت رابطهٔ (۳) تعریف می‌شود:

$$\pi_p(x) = \sqrt{1 - \left(\mu_p(x)\right)^2 - \left(\nu_p(x)\right)^2} \quad (۳)$$

تعریف ۲. یک عدد فازی فیثاغورثی ذوزنقه‌ای (TrPFN[۱۵]) به‌صورت رابطهٔ (۴) نمایش داده می‌شود.

$$A = \langle (a_1, a_2, a_3, a_4); \mu, \nu\rangle \quad (۴)$$

با پارامترهای a_1, a_2, a_3, a_4 به‌طوری که a_1 از همه کوچک‌تر و a_4 از همه بزرگ‌تر باشد.

$$a_1 \le a_2 \le a_3 \le a_4 \quad (۵)$$

درجات عضویت μ و عدم عضویت ν نیز باید شرط رابطهٔ (۶) را ارضا کنند؛ یعنی مجموع توان دوم آنها بزرگ‌تر و مساوی یک باشد.

$$\mu^2 + \nu^2 \le 1 \quad (۶)$$

تعریف ۵. فرض کنید $\langle (a_1, a_2, a_3, a_4); \mu, \nu\rangle$ یک عدد فازی نرمالیزه‌شدهٔ چهاروجهی با احتمال ترجیحی (TrPFN) باشد که در آن a_1, a_2, a_3, a_4 اعداد حقیقی‌اند. در این صورت، مقدار مورد انتظار عدد فازی A به‌صورت رابطهٔ (۷) تعریف می‌شود.

$$E(A) = \frac{(a_1 + a_2 + a_3 + a_4)}{4}\sqrt{\mu^2 + \nu^2} \quad (۷)$$

۳-۲ روش دیمتل فازی فیثاغورثی

در فرآیند تصمیم‌گیری، تصمیم‌گیرندگان معمولاً براساس تجربه و تخصص خود قضاوت می‌کنند. ارزیابی دقیق معیارها برای روش دیمتل یا هر روش تصمیم‌گیری دیگری در محیط‌های نامطمئن، کاری نسبتاً دشوار است. مجموعهٔ فازی فیثاغورثی به‌طور مؤثری با عدم قطعیت در محیط تصمیم‌گیری برخورد می‌کند. در روش پیشنهادی دیمتل فازی فیثاغورثی، ارزیابی معیارها براساس مقیاس زبانی فازی فیثاغورثی و همچنین عدد فازی ذوزنقه‌ای فیثاغورثی انجام می‌شود. در ادامه، دربارهٔ روش پیشنهادی بحث می‌شود.

مرحلهٔ اول: تشکیل ماتریس ارتباطات مستقیم فیثاغورثی

در این گام میزان تأثیرپذیری معیارها بر هم، براساس طیف ۰ تا ۶ جدول (۳) تکمیل می‌شود.

جدول ۳- عبارات کلامی و اعداد فازی ذوزنقه‌ای(Giri et al., 2022)

Table 3- Lingual items and Trapezoidal fuzzy numbers (Giri et al., 2022)

عبارت کلامی	کد	عدد فازی ذوزنقه‌ای
کاملاً کم	۰	((۰،۰،۰،۰);۰،۱)
کم	۱	((۰ ،۰/۱ ،۰/۲ ،۰/۳);۰/۱ ،۰/۸)
نسبتاً کم	۲	((۰/۱ ،۰/۲ ،۰/۳ ،۰/۴);۰/۳ ،۰/۷)
متوسط	۳	((۰/۳ ،۰/۴ ،۰/۵ ،۰/۶);۰/۵ ،۰/۵)
نسبتاً زیاد	۴	((۰/۵ ،۰/۶ ،۰/۷ ،۰/۸);۰/۶ ،۰/۴)
زیاد	۵	((۰/۷ ،۰/۸ ،۰/۹ ،۱);۰/۸ ،۰/۲)
کاملاً زیاد	۶	((۱،۱،۱،۱);۱،۰)

مرحلهٔ دوم: تبدیل ماتریس فیثاغورثی به ماتریس معمولی

در این گام، ماتریس فازی فیثاغورثی فازی‌زدایی می‌شود که در مرحلهٔ اول تشکیل شد.

مرحلهٔ سوم: ادغام نظرات خبره‌ها

زمانی که از دیگاه چند نفر استفاده می‌شود، از میانگین سادهٔ نظرات براساس رابطهٔ (۸) استفاده می‌شود تا نظرات تجمیع شود.

$$z = \frac{x^1 + x^2 + x^3 + \ldots + x^p}{p} \quad (۸)$$

در این فرمولp تعداد خبرگان و x^1 ، x^2 ،x^p به ترتیب ماتریس معمولی برای هر خبره‌اند.

مرحلهٔ چهارم: نرمال‌سازی ماتریس

در این گام، نرمال‌سازی براساس رابطهٔ (۹) و (۱۰) انجام می‌شود.

$$N = K \times M \quad (۹)$$

$$K = \frac{1}{\max(\sum_{j=1}^{n} a_{ij}, \sum_{i=1}^{n} a_{ij})} \quad (۱۰)$$

مرحلهٔ پنجم: تشکیل ماتریس ارتباطات کل

در این گام، ماتریس ارتباطات کل براساس رابطهٔ (۱۱) تشکیل می‌شود.

$$T = N \times (I - N)^{-1} \quad (۱۱)$$

مرحلهٔ ششم: تشکیل نمودار علّی

در این گام، نمودار علی براساس مقادیر D و R تشکیل می‌شود که در ادامه توضیح داده می‌شود.

- جمع عناصر هر سطر (D) برای هر عامل نشانگر میزان تأثیرگذاری آن عامل بر دیگر عامل‌های سیستم است (میزان تأثیرگذاری متغیرها)؛
- جمع عناصر ستون (R) برای هر عامل نشانگر میزان تأثیرپذیری آن عامل از دیگر عامل‌های سیستم است (میزان تأثیرپذیری متغیرها)؛
- بنابراین بردار افقی (D + R) میزان تأثیر و تأثر عامل مدنظر در سیستم است. به عبارت دیگر هرچه مقدار D + R عاملی بیشتر باشد، آن عامل تعامل بیشتری با دیگر عوامل سیستم دارد؛
- بردار عمودی (D - R) قدرت تأثیرگذاری هر عامل را نشان می‌دهد. به‌طور کلی اگر D - R مثبت باشد، متغیر یک متغیر علی محسوب می‌شود و اگر منفی باشد، معلول محسوب می‌شود.

۴- یافته‌ها

در مرحلهٔ پیشبرد تکنیک دلفی، پرسش‌نامه‌ای شامل ۱۸ موانع اجرای زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای، که از مرور پیشینهٔ پژوهش استخراج شده است، در اختیار ۹ خبرهٔ پژوهش قرار داده و از آنها درخواست شد نظرشان را دربارهٔ هر معیار در قالب متغیرهای کلامی مندرج در پرسش‌نامه بیان کنند.

در این پژوهش، عدد آستانه ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود (Mousavi et al., 2015)؛ بنابراین شاخص‌هایی حذف می‌شود که میانگین قطعی آنها از عدد ۰/۷ کمتر باشد. ملاک حصول اجماع در این پژوهش، همگرایی تدریجی دیدگاه‌های خبرگان در دورهای متوالی و تثبیت نسبی امتیازها در دور نهایی بود؛ درنتیجه از میان ۱۸ مانع اولیه، ۱۰ مانع به‌عنوان موانع نهایی برای ورود به مرحلهٔ تحلیل دیمتل فازی فیثاغورثی انتخاب شد. نتایج در دور دوم تکنیک دلفی، تأیید ۱۰ شاخص را نشان می‌دهد که در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴- نتایج روش دلفی فازی

Table 4- Results of fuzzy Delphi method

طبقه	مانع	میانگین غیرفازی	نماد	تعداد خبرگان موافق/مخالف	وضعیت و دلیل پذیرش/عدم پذیرش خبرگان
موانع تکنیکی- عملیاتی	قطعات عمدتاً نیازمند ترکیب چند مادهٔ اولیه‌اند و همین موضوع استفاده از مواد بازیافتی را در تولید قطعات پیچیده می‌کند.	۰/۸۵	C1	۷، ۲	پذیرش: پیچیدگی مواد و چند جزئی بودن قطعات، بازیافت و بازتولید را عملاً دشوار می‌کند.
	تنوع تولیدکنندگان خودور در دنیا و نبود تعریف استاندارد و یکسان مشکل‌ساز است.	۰/۶۷		۴، ۵	رد: به‌دلیل وجود شبکهٔ خدمات پس از فروش در بازارهای هدف، امکان مدیریت بازیافت و زنجیرهٔ معکوس در همان بستر وجود دارد.
	هزینهٔ بازتولید بیشتر از هزینهٔ تولید مواد اولیه است.	۰/۶۸		۴، ۵	رد: با طراحی بازیافت‌پذیر قطعات و بهینه‌سازی زنجیرهٔ معکوس، هزینهٔ بازتولید توجیه‌پذیر می‌شود.
	بازار مصرف خودرو در خارج از مرزهای کشور تولیدکننده است.	۰/۹۴	C2	۸، ۱	پذیرش: پراکندگی جغرافیایی بازار، بازگشت قطعات و مدیریت زنجیرهٔ معکوس را دشوارتر می‌کند.

طبقه	مانع	میانگین غیرفازی	نماد	تعداد خبرگان موافق/مخالف	وضعیت و دلیل پذیرش/عدم پذیرش خبرگان
موانع اقتصادی و مالی	بازتولید نیازمند منابع مالی بالاست.	۰/۸۹	C3	۸، ۱	پذیرش: سرمایه‌گذاری اولیه برای زیرساخت، فناوری و فرآیندهای بازتولید بالاست.
	طراحی و اجرای زنجیرهٔ تأمین معکوس هزینهٔ بالایی دارد.	۰/۶۴		۴، ۵	رد: در صورت کاهش مصرف مواد اولیهٔ جدید، هزینه‌های زنجیرهٔ معکوس برای بنگاه توجیه‌پذیر است.
	در حال حاضر سود زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای در مقایسه با زنجیرهٔ تأمین خطی کم است.	۰/۸۴	C4	۷، ۲	پذیرش: در شرایط فعلی، بازده اقتصادی کوتاه‌مدت مدل خطی برای بسیاری از بنگاه‌ها بیشتر است.
موانع نهادی و قانون‌گذاری	بسیاری از قوانین فعلی، استفاده از مواد اولیه خام را به‌جای بازیافت تشویق می‌کنند.	۰/۸	C5	۷، ۲	پذیرش: نبود سازوکارهای تنظیم‌گری مؤثر، جهت‌گیری بنگاه‌ها را به‌سمت الگوی خطی حفظ می‌کند.
	استفاده از مشوق‌های مالیاتی و قانونی برای بازتولید به‌جای تولید اولیه	۰/۸۸	C6	۸، ۱	پذیرش: کمبود مشوق‌های حمایتی، انگیزهٔ لازم را برای توسعهٔ بازتولید کاهش می‌دهد.
	مواد اولیه در کشورهای دارای معادن به‌نسبت مواد بازتولیدشده ارزان است.	۰/۶۵		۴، ۵	رد: با توجه به محدودیت منابع طبیعی و انرژی، این عامل در شرایط فعلی مانع اصلی تلقی نشد.
	مواد اولیه سهمیه‌بندی شده است.	۰/۸۸	C7	۸، ۱	پذیرش: سهمیه‌بندی و محدودیت دسترسی، برنامه‌ریزی پایدار برای جایگزینی مواد و بازتولید را مختل می‌کند.
موانع فرهنگی و بازار	مصرف‌کنندگان، کالای بازتولیدشده را بی‌کیفیت تلقی می‌کنند.	۰/۸	C8	۷، ۲	پذیرش: ذهنیت منفی مشتریان نسبت‌به کیفیت، پذیرش بازار را کاهش می‌دهد.
	مصرف‌کنندگان نسبت‌به هرگونه تغییر مقاومت می‌کنند.	۰/۶۴		۴، ۵	رد: با فرهنگ‌سازی و اطلاع‌رسانی، این مقاومت کاهش‌پذیر است و مانع پایدار تلقی نمی‌شود.
	زنجیرهٔ تأمین خطی در بازار مصرف شکل گرفته و جا افتاده است.	۰/۶۷		۴، ۵	رد: بازار خدمات پس از فروش به‌تدریج علمی‌تر و منعطف‌تر می‌شود و ظرفیت تغییر دارد.
	هماهنگی و آموزش بازار مصرف برای اجرای زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای دشوار است.	۰/۶۸		۴، ۵	رد: گسترش فضای مجازی و آموزش‌های آنلاین، دشواری آموزش و فرهنگ‌سازی را کاهش داده است.
موانع طراحی و مهندسی	دمونتاژ و مونتاژ قطعات مشکل و دربردارندهٔ ریسک است.	۰/۸۴	C9	۷، ۲	پذیرش: محدودیت‌های طراحی و ریسک‌های مهندسی، بازیابی و استفادهٔ مجدد قطعات را دشوار می‌کند.
	باید امکان بازتولید در طراحی اولیهٔ قطعات در نظر گرفته شود.	۰/۹۳	C10	۸، ۱	پذیرش: طراحی برای بازتولید، پیش‌نیاز کلیدی استقرار موفق اقتصاد دایره‌ای است.
	نبود امکان بازتولید قطعاتی که در طول عمر خود دچار حادثه می‌شوند.	۰/۳۶		۷، ۲	رد: سهم این قطعات نسبت‌به قطعات پایان عمر استاندارد کمتر است و اثر تعیین‌کننده‌ای ندارد.

نتیجهٔ تکنیک دلفی مجدداً به خبرگان ارائه و با استفاده از ابزار مصاحبه از آنها خواسته شده است تا نتیجه را تحلیل کنند. ازنظر خبرگان، مانع «تنوع تولیدکنندگان خودور در دنیا و نبود تعریف استاندارد یکسان مشکل‌ساز است»، حائز اهمیت نبود؛ زیرا تمامی کمپانی‌های تولید خودرو در کشورهایی که بازار فروش دارند، خدمات پس از فروش را نیز ارائه می‌دهند؛ بنابراین، بازیافت قطعات مصرفی و یا زنجیرهٔ تأمین معکوس نیز، در همان بستر انجام

می‌شود. دربارهٔ مانع «هزینهٔ بازتولید بیشتر از هزینهٔ تولید مواد اولیه است» نیز، باید گفت که طبق نظر خبرگان، طراحان قطعات را بازیافت‌پذیر طراحی می‌کنند و همچنین طراحی زنجیرهٔ معکوس بهینه، هزینه‌های بازیافت را به‌حدی کاهش می‌دهد تا بازتولید توجیه‌پذیر باشد. در ضمن، ازنظر خبرگان مانع «طراحی و اجرای زنجیرهٔ تأمین معکوس، هزینهٔ بالایی دارد.» در صورت استفاده‌نکردن از مواد اولیهٔ جدید، هزینه‌های زنجیرهٔ تأمین معکوس توجیه‌پذیر است. از سوی دیگر، مانع «مواد اولیه در کشورهای دارای معادن به‌نسبت مواد بازتولیدشده ارزان است.» به‌علت محدودبودن منابع طبیعی و انرژی به‌صورت کلی، در حال حاضر اهمیت بالایی ندارد و یک مانع اصلی تلقی نمی‌شود. از دید خبرگان، با فرهنگ‌سازی مناسب و اطلاع‌رسانی مناسب، مانع «مصرف‌کنندگان نسبت‌به هرگونه تغییر مقاومت می‌کنند»، حل می‌شود و این موضوع تنها منوط به زمان است. دربارهٔ مانع «زنجیرهٔ تأمین خطی در بازار مصرف شکل گرفته و جا افتاده است»، با توجه به علمی‌شدن بازارهای خدمات پس از فروش برای مدیریت هزینه‌های زنجیرهٔ تأمین، این بازار از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار شده است. مانع «هماهنگی و آموزش بازار مصرف برای اجرای زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای دشوار است»، در حال حاضر و با توجه به رشد استفاده از فضای مجازی و آموزش‌های آنلاین، سختی آموزش و فرهنگ‌سازی اهمیت کمتری پیدا کرده است. درنهایت، مانع «نبود امکان بازتولید قطعاتی که در طول عمر خود دچار حادثه می‌شوند»، تعداد این قطعات نسبت‌به قطعاتی خیلی کمتر است که طول عمر استاندارد خود را طی کرده‌اند و به همین دلیل، این مانع اهمیت بسیار کمی دارد.

در گام بعدی، مراحل دیمتل فازی فیثاغورسی پیش می‌رود. در جداول (۵) و (۶)، به ترتیب ماتریس‌های ارتباط مستقیم و ماتریس ارتباط کل نشان داده شده است. به‌جهت تشکیل نمودار علی مجموع سطرها (D) و ستون‌ها (R)، ماتریس روابط کل به دست آمده و سپس D+R و D-R محاسبه شده است. نتایج در جدول (۷) آورده شده است. بر این اساس، شاخص D نشان‌دهندهٔ تأثیرگذاری معیارهاست. بر این اساس، پیچیدگی قطعات و ترکیب چند مواد اولیه (C1) دارای بیشترین قدرت تأثیرگذاری است. شاخص R نشان‌دهندهٔ تأثیرپذیری معیارهاست. هر چقدر عدد R یک معیار بیشتر باشد، آن معیار دارای تأثیرپذیری بیشتری در سیستم است که بر این اساس، پیچیدگی قطعات و ترکیب چند مواد اولیه (C1) بیشترین تأثیرپذیری را دارد (جدول ۷).

جدول ۵- ماتریس ارتباط مستقیم

Table 5- Direct Relations

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	۰/۰	۰/۳۴۹	۰/۵۵۵	۰/۴۱۶	۰/۲۴۲	۰/۲۳۶	۰/۵۸۱	۰/۵۷۲	۰/۹۳۴	۰/۲۷۶
C2	۰/۳۲۱	۰/۰	۰/۳۷۱	۰/۵۹۰	۰/۴۳۵	۰/۳۱۸	۰/۶۶۶	۰/۵۹۸	۰/۶۲۴	۰/۲۳۶
C3	۰/۲۱۴	۰/۲۷۶	۰/۰	۰/۳۵۲	۰/۵۷۶	۰/۶۰۷	۰/۲۶۸	۰/۳۵۲	۰/۴۳۰	۰/۱۸۱
C4	۰/۲۳۸	۰/۱۹۰	۰/۳۵۲	۰/۰	۰/۲۰۵	۰/۲۰۵	۰/۲۹۲	۰/۳۱۸	۰/۳۰۴	۰/۱۹۰
C5	۰/۴۹۸	۰/۳۵۲	۰/۳۲۱	۰/۳۳۵	۰/۰	۰/۳۱۸	۰/۶۴۹	۰/۶۳۳	۰/۶۲۹	۰/۳۵۲
C6	۰/۵۸۹	۰/۳۶۶	۰/۲۱۹	۰/۶۴۹	۰/۳۱۸	۰/۰	۰/۶۳۳	۰/۶۴۹	۰/۹۳۴	۰/۲۸۲
C7	۰/۲۹۲	۰/۱۷۵	۰/۳۱۸	۰/۴۳۵	۰/۱۹۰	۰/۳۳۵	۰/۰	۰/۲۹۲	۰/۴۳۵	۰/۱۹۷
C8	۰/۲۰۶	۰/۱۸۳	۰/۲۹۰	۰/۳۲۱	۰/۱۶۷	۰/۲۷۶	۰/۲۴۷	۰/۰	۰/۲۹۰	۰/۱۲۱
C9	۰/۱۳۹	۰/۲۱۹	۰/۳۱۸	۰/۴۱۱	۰/۱۹۰	۰/۱۳۶	۰/۱۹۰	۰/۳۲۱	۰/۰	۰/۲۳۳
C10	۰/۵۸۱	۰/۵۵۴	۰/۹۳۴	۰/۵۷۲	۰/۴۴۷	۰/۳۵۲	۰/۶۳۳	۰/۸۳۴	۰/۶۴۹	۰/۰

جدول ۶- ماتریس روابط کل

Table 6- Total Relations Matrix

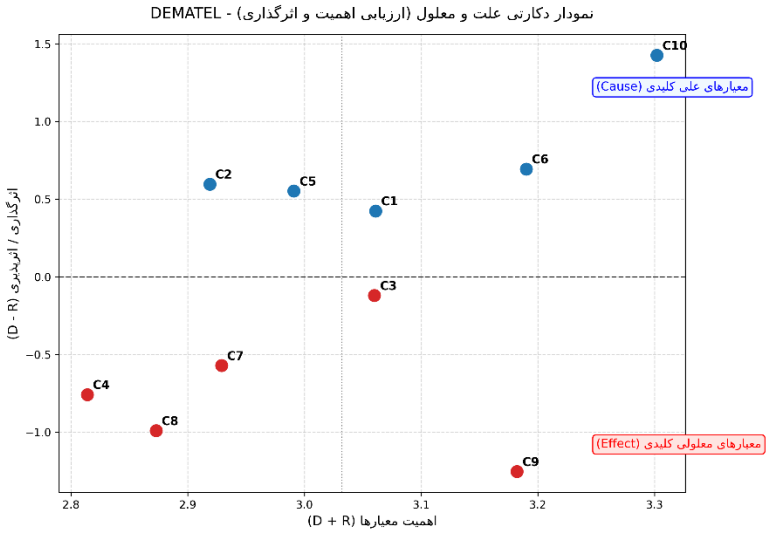
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	۰/۰۸۹	۰/۱۳۹	۰/۲۰۴	۰/۱۹۶	۰/۱۲۸	۰/۱۳۰	۰/۲۱۴	۰/۲۲۷	۰/۳۰۴	۰/۱۱۳
C2	۰/۱۴۷	۰/۰۸۱	۰/۱۷۴	۰/۲۲۵	۰/۱۵۸	۰/۱۴۳	۰/۲۳۱	۰/۲۳۳	۰/۲۵۷	۰/۱۰۸
C3	۰/۱۱۹	۰/۱۱۸	۰/۰۹۲	۰/۱۶۸	۰/۱۶۹	۰/۱۷۶	۰/۱۵۳	۰/۱۷۷	۰/۲۰۸	۰/۰۹۰
C4	۰/۰۹۶	۰/۰۸۲	۰/۱۲۶	۰/۰۷۵	۰/۰۸۷	۰/۰۸۹	۰/۱۲۲	۰/۱۳۴	۰/۱۴۴	۰/۰۷۳
C5	۰/۱۷۷	۰/۱۴۳	۰/۱۷۰	۰/۱۸۶	۰/۰۸۶	۰/۱۴۴	۰/۲۳۱	۰/۲۴۲	۰/۲۶۶	۰/۱۲۷
C6	۰/۱۹۸	۰/۱۵۱	۰/۱۶۳	۰/۲۴۸	۰/۱۴۶	۰/۰۹۵	۰/۲۳۸	۰/۲۵۶	۰/۳۲۴	۰/۱۲۳
C7	۰/۱۱۲	۰/۰۸۶	۰/۱۳۰	۰/۱۵۹	۰/۰۹۲	۰/۱۱۷	۰/۰۸۲	۰/۱۴۲	۰/۱۷۹	۰/۰۸۰
C8	۰/۰۸۶	۰/۰۷۶	۰/۱۰۹	۰/۱۲۴	۰/۰۷۶	۰/۰۹۶	۰/۱۰۹	۰/۰۷۳	۰/۱۳۴	۰/۰۵۸
C9	۰/۰۷۶	۰/۰۸۳	۰/۱۱۷	۰/۱۳۹	۰/۰۸۲	۰/۰۷۵	۰/۱۰۱	۰/۱۳۰	۰/۰۸۵	۰/۰۷۷
C10	۰/۲۲۰	۰/۲۰۲	۰/۳۰۴	۰/۲۶۶	۰/۱۹۵	۰/۱۸۴	۰/۲۶۹	۰/۳۱۹	۰/۳۱۷	۰/۰۹۰

جدول ۷- روابط علت و معلولی موانع

Table 7- Cause and Effect relations of barriers

نام	نماد	D+R	D-R	نوع
پیچیدگی قطعات و ترکیب چند مواد اولیه	C1	۳/۰۶۱	۰/۴۲۴	اثرگذار
بازار مصرف خودرو در خارج از مرز های کشور تولیدکننده	C2	۲/۹۱۹	۰/۵۹۷	اثرگذار
نیاز به منابع مالی زیاد برای بازتولید	C3	۳/۰۶۰	-۰/۱۲۰	اثرپذیر
کم‌بودن سوددهی زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای نسبت‌به خطی	C4	۲/۸۱۴	-۰/۷۵۸	اثرپذیر
استفاده از قوانین بازدارنده برای استفاده از مواد اولیهٔ خام به‌جای بازیافت	C5	۲/۹۹۱	۰/۵۵۲	اثرگذار
استفاده از مشوق‌های مالیاتی و قانونی برای بازتولید به‌جای تولید اولیه	C6	۳/۱۹۰	۰/۶۹۴	اثرگذار
سهمیه‌بندی مواد اولیه	C7	۲/۹۲۹	-۰/۵۷۱	اثرپذیر
تعریف مصرف‌کنندگان از کالای تولیدشده، کالای بی‌کیفیت است.	C8	۲/۸۷۳	-۰/۹۹۱	اثرپذیر
دمونتاژ و مونتاژ قطعات مشکل و ریسکی است.	C9	۳/۱۸۲	-۱/۲۵۴	اثرپذیر
باید در طراحی اولیهٔ قطعات، امکان بازتولید در نظر گرفته شود.	C10	۳/۳۰۲	۱/۴۲۶	اثرگذار

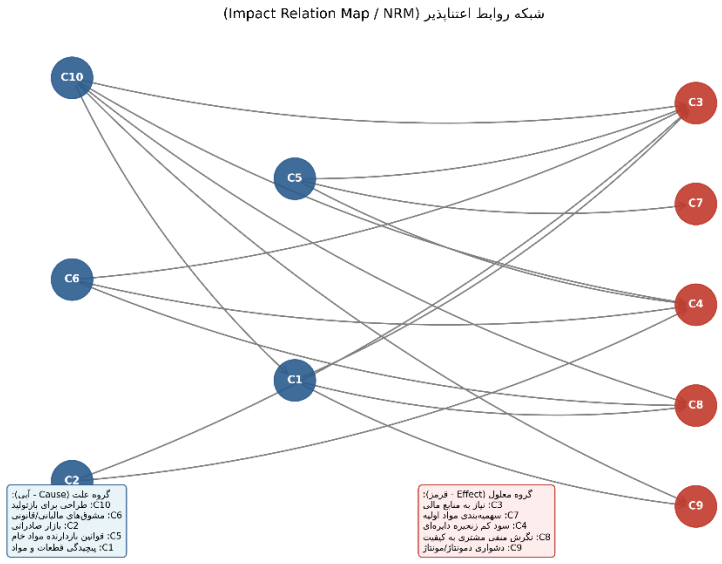
نمودار علّی روابط در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار علّی روابط

Fig. 1- Cause- Effect Relations Chart

شبکهٔ روابط[۱۶] نیز در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- شبکهٔ روابط اعتناپذیر

Fig. 2- Normalized Relation Matrix

۵- بحث

نتایج روش دیمتل فازی فیثاغورثی نشان داد که موانع پیچیدگی قطعات و ترکیب چند مواد اولیهٔ (C1) بازار مصرف خودرو در خارج از مرزهای کشور تولیدکننده (C2)، نیاز به منابع مالی زیاد برای بازتولید (C3)، استفاده از قوانین بازدارنده برای استفاده از مواد اولیه خام به‌جای بازیافت (C5) و سهمیه‌بندی مواد اولیه (C7) در ناحیهٔ علّی قرار دارند؛ به این معنا که این عوامل بیش از آنکه از دیگر موانع اثر بپذیرند، بر ساختار کلی زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای اثر می‌گذارند. در مقابل، معیارهای کم‌بودن سوددهی زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای نسبت‌به خطی (C4)، استفاده از مشوق های مالیاتی و قانونی برای بازتولید به‌جای تولید اولیه (C6)، ادراک مصرف کنندگان از کالای بازتولیدشده به‌عنوان کالای بی‌کیفیت (C8)، مشکل و پرریسک‌بودن دمونتاژ و مونتاژ قطعات (C9) و لزوم توجه به قابلیت بازتولید در طراحی اولیهٔ قطعات (C10)، در ناحیهٔ معلول قرار می‌گیرند و بنابراین بیشتر از متغیرهای علّی تأثیر می‌پذیرند.

تحلیل ماتریس روابط کل و نیز نقشهٔ شبکهٔ روابط اعتناپذیر نشان داد که C_1 مهم‌ترین گره شبکه است. این معیار هم دارای اثرگذاری بالا بر دیر موانع است و هم از چندین عامل دیگر اثر می‌پذیرد؛ ازاین‌رو یک مانع مرکزی و پیونددهنده در ساختار مسئله دانسته می‌شود. در نمودار شبکهٔ روابط نیز مشاهده می‌شود که C_1 به‌عنوان منبع تأثیر، به‌طور مستقیم با چند معیار کلیدی دیگر در ارتباط است و از این حیث، نقش محوری در شکل‌دهی به پویایی موانع دارد. همچنین C_2 ب یکی از اثرگذارترین معیارهاست که عمدتاً بر دیگر عوامل مؤثر است و خود از تعداد محدودی از موانع اثر می‌پذیرد؛ بنابراین، ماهیت بازار و پراکندگی جغرافیایی مصرف در خارج از مرزهای کشور تولیدکننده، یک فشار ساختاری مهم بر توسعهٔ زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای ایجاد می‌کند.

مقدار آستانهٔ روابط داخلی (۰٫۸۳۷) با احتساب میانگین حسابی نیز، نشان داد که تنها بخشی از روابط میان معیارها شدت درخور توجهی دارند و شبکهٔ علّی–معلولی مسئله، یک شبکهٔ فشرده، ولی انتخابی است. در چنین

وضعی، تمرکز بر تعداد محدودی از گره‌های کلیدی، بیشترین اثر را در کاهش دیگر موانع به‌همراه دارد. علاوه بر این، غلبهٔ روابط خروجی در C1، C2،C5، C6 و تا حدی C3، حاکی از آن است که مداخلات سیاستی باید در سطح طراحی محصول، مقررات‌گذاری و تأمین مالی متمرکز شوند؛ زیرا این متغیرها محرک‌های اصلی تغییر در دیگر بخش‌ها هستند.

تحلیل هم‌راستایی نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین، نشان می‌دهد که یافته‌ها در امتداد پژوهش‌های بین المللی و داخلی قرار دارند. تأکید این مطالعه بر «پیچیدگی قطعات و مواد اولیه» و «نیاز به منابع مالی» به‌عنوان موانع علّی کلیدی، با یافته‌های لو و همکاران[۱۷] (۲۰۲۵) همسو است که نوآوری را در مواد و بازیافت پیشرفتهٔ موتور محرک اقتصاد چرخشی در صنعت خودرو می‌دانند. همچنین، همسویی معناداری با مطالعهٔ بالداساری و همکاران (۲۰۲۵) در لزوم اتخاذ رویکرد کل‌نگر به زنجیرهٔ تأمین و نقش سیاست‌گذاری مؤثر در مدیریت لایه‌های متعدد موانع مشاهده می‌شود.

در بخش موانع معلولی، یافته‌های این پژوهش مبنی بر اثرپذیری «طراحی اولیه» و «ریسک دمونتاژ» از فقدان همکاری‌های زنجیره‌ای، از سوی سسانا و همکاران (۲۰۲۴) و مارتینز و همکاران (۲۰۲۱) پشتیبانی می‌شود؛ زیرا آنها نیز تبادل داده و اطلاعات میان بازیگران زنجیرهٔ ارزش را پیش نیاز بهبود طراحی برای بازیافت می‌دانند. ازنظر عملیاتی نیز، نتایج پژوهش حاضر با مطالعات ون کیکن و همکاران (۲۰۲۴) تطابق دارد که معتقدند حل موانع فنی و مالی، پیش‌شرط ارتقای عمر محصولات و دستیابی به عملکرد زیست‌محیطی است.

در سطح نهادی، انطباق کاملی میان تأکید این مطالعه بر «موانع قانون‌گذاری و نبود مشوق‌ها» با نتایج گنزالس-سانچز و همکاران[۱۸] (۲۰۲۰) وجود دارد؛ اما این پژوهشگران نیز، تعهد به مدیریت پایدار را مشروط به زیرساخت‌های مدیریتی و حمایت قانون‌گذار می‌دانند. درنهایت، نتایج حاضر با مطالعات داخلی نیز هم‌راستاست؛ به‌طوری که اولویت موانع مالی و فنی با یافته‌های سلمان‌نژاد و کرمی‌تکلو[۱۹] (۲۰۲۳) و نقش محوری قوانین و فرهنگ با مطالعهٔ کیانی و همکاران[۲۰] (۲۰۲۴) مطابقت دارد.

درمجموع، این تطبیق نشان می‌دهد که اگرچه بُعد تکنولوژیک عاملی حیاتی است، بدون تأمین مالی، حمایت قانونی و همکاری کل‌نگر در زنجیرهٔ ارزش به‌تنهایی برای گذار به اقتصاد دایره‌ای کافی نخواهد بود. مطالعهٔ حاضر با تحلیل روابط علّی و تفکیک موانع زیربنایی از پیامدهای معلولی، یافته‌های جهانی را در بستر صنعت قطعه‌سازی ایران، بومی‌سازی و تقویت کرده است.

در مقایسه با مطالعات پیشین، یافته‌های این پژوهش با پژوهش‌های بین‌المللی همسو است؛ برای مثال، مطالعات اخیر بر اهمیت نوآوری فناورانه، بازیافت پیشرفته مواد و استفاده از مواد زیست پایه در کاهش فشارهای محیط‌زیستی و عملیاتی صنعت خودرو تأکید کرده‌اند. در این راستا، شناسایی C1 و C3 به‌عنوان گره‌های علّی اصلی، نشان می‌دهد که محدودیت‌های مهندسی محصول و سرمایه‌گذاری اولیه، همچنان از موانع بنیادی گذار به الگوی دایره‌ای‌اند. همچنین، شناسایی C5 و C7 در ناحیهٔ علّی بیانگر آن است که ساختارهای نهادی و مقرراتی، به‌ویژه قوانین بازدارنده و نظام سهمیه‌بندی مواد اولیه، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری یا تضعیف رفتارهای دایره‌ای دارند.

درمجموع، هم‌راستایی یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که گذار به زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای، حاصل اثر هم‌زمان عوامل فنی، اقتصادی، نهادی و فرهنگی است. با این حال، برخی موانع شناسایی‌شده در این پژوهش، در بافت صنعت خودرو و قطعه‌سازی ایران برجسته‌تر و تا حدی مختص شرایط کشورند؛ ازجمله این عوامل به سهمیه‌بندی و محدودیت دسترسی به مواد اولیه، ناپایداری و ابهام‌های مقرراتی، ضعف مشوق‌های مالی و مالیاتی و محدودیت‌های سرمایه‌گذاری اشاره می‌شود. در کنار این چالش‌های زمینه‌مند، موانعی مانند پیچیدگی قطعات، دشواری دمونتاژ و ضعف طراحی برای بازتولید، ماهیت عمومی‌تری دارند و در بیشتر مطالعات بین المللی نیز گزارش شده‌اند؛ بنابراین، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت اقتصاد دایره‌ای در ایران، نیازمند هم‌زمانی اصلاحات فناورانه، سیاستی و مالی است؛ به‌گونه‌ای که به موانع ساختاری خاص کشور نیز، در کنار چالش‌های مشترک صنعت توجه شود.

براساس نتایج دیمتل فازی فیثاغورثی، پیشنهادهای مدیریتی و سیاستی این پژوهش باید بر مبنای تقدم مداخله در عوامل علّی نسبت‌به عوامل معلولی تنظیم شوند؛ زیرا عوامل علّی، ریشهٔ شکل‌گیری و تداوم دیگر موانع است و اصلاح آنها بیشترین اثر سیستمی را در بهبود عملکرد زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای قطعات خودرو ایجاد می‌کند. در این میان، متغیر C10 یعنی «لزوم توجه به قابلیت بازتولید در طراحی اولیهٔ قطعات»، با بالاترین مقدار D-R و نیز بیشترین میزان برجستگی کلی، مهم‌ترین عامل اثرگذار در شبکهٔ موانع شناسایی شد. بر این اساس، اولین و اساسی‌ترین پیشنهاد آن است که خودروسازان و قطعه‌سازان، اصول طراحی را برای بازتولید از مرحلهٔ طراحی مفهومی و مهندسی محصول در فرایند توسعهٔ قطعه نهادینه کنند. این اقدام مستلزم بازنگری در معماری محصول، کاهش استفاده از ترکیب‌های ماده‌ای پیچیده، استانداردسازی قطعات، طراحی ماژولار، استفاده از اتصالات جداسازپذیر و مستندسازی مشخصات فنی قطعات به‌گونه‌ای است که امکان تعمیر، جداسازی، بازسازی و بازتولید در پایان چرخهٔ عمر تسهیل شود. به بیان دیگر، تا زمانی که قابلیت بازتولید به‌عنوان یک معیار طراحی در مبدأ شکل نگیرد، بسیاری از اقدامات پایین‌دستی در حوزهٔ بازیافت، تعمیر و بازگردانی قطعات، با هزینهٔ بالا و اثربخشی محدود مواجه خواهند بود.

پس از C10، عامل C1 یعنی «پیچیدگی قطعات و ترکیب مواد اولیه»، یکی از مهم‌ترین عوامل علّی و در عین حال یکی از گره‌های پیونددهندهٔ شبکه است که باید در اولویت دوم مداخله قرار گیرد. با توجه به اینکه پیچیدگی ساختاری و تنوع مواد، فرایندهای دمونتاژ، تفکیک، ارزیابی فنی و بازتولید را دشوار و پرهزینه می‌کند، پیشنهاد می‌شود بنگاه‌ها به‌سوی ساده‌سازی طراحی، کاهش تنوع غیرضروری مواد، به‌کارگیری مواد سازگارتر با فرایندهای بازیافت و بازتولید و تدوین دستورالعمل‌های طراحی مشترک میان واحدهای مهندسی، تولید و خدمات پس از فروش حرکت کنند. درواقع، اگرچه C10 ازنظر اثرگذاری خالص در رتبهٔ اول قرار دارد، C1 نیز به‌دلیل نقش مرکزی خود، حلقهٔ واسطی میان طراحی محصول، امکان‌پذیری عملیاتی بازتولید و کاهش موانع فنی در کل زنجیره است.

در گام بعد، توجه به عامل C2 یعنی «محدودبودن بازار خارج از مرزها» ضروری است. اثرگذاربودن این متغیر نشان می‌دهد که توسعهٔ بازتولید در صنعت قطعه‌سازی تنها یک مسئلهٔ درون‌کارخانه‌ای نیست و به ظرفیت بازار، مقیاس اقتصادی و امکان توسعهٔ تقاضا نیز وابسته است؛ از این رو، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران و بنگاه‌ها به‌صورت هم‌زمان ازطریق ایجاد مشوق‌های صادراتی، توسعهٔ همکاری‌های منطقه‌ای، تدوین استانداردهای پذیرفتنی

در بازارهای هدف، ایجاد بسترهای شفاف برای معرفی کیفیت و قابلیت اطمینان قطعات بازتولیدشده، برای توسعهٔ بازار محصولات بازتولیدشده اقدام کنند. بدون توسعهٔ بازار، حتی در صورت اصلاح طراحی و ارتقای توان فنی، انگیزهٔ کافی برای سرمایه‌گذاری پایدار در بازتولید شکل نخواهد گرفت.

عامل علّی بعدی، C5 یعنی «قوانین و مقررات بازدارنده» است که نشان می‌دهد بخشی از موانع اقتصاد دایره‌ای در صنعت قطعه‌سازی ریشهٔ نهادی و سیاستی دارد. بر این اساس، اصلاح چارچوب‌های قانونی، حذف یا کاهش موانع مقرراتی، تدوین استانداردهای رسمی برای قطعات بازتولیدشده و بازنگری در ضوابط مرتبط با استفاده از مواد بازیافتی و قطعات بازساخته، ازجمله اقدامات ضروری به شمار می‌رود. همچنین لازم است نهادهای تنظیم‌گر با رویکردی تسهیلگر، فضای حقوقی مطمئن‌تری را برای سرمایه‌گذاری در بازتولید فراهم کنند. در شرایطی که قوانین موجود با منطق زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای هم‌راستا نباشند، حتی بنگاه‌های دارای آمادگی فنی و مدیریتی نیز، با محدودیت جدی مواجه خواهند شد.

همچنین C6 یعنی «کمبود مشوق‌های حمایتی»، از دیگر عوامل علّی مهم است که لزوم مداخلهٔ هدفمند دولت و نهادهای پشتیبان را برجسته می‌کند. در این راستا، ارائهٔ تسهیلات مالی کم‌بهره، معافیت‌های مالیاتی، یارانه برای نوسازی فناوری، حمایت از پروژه‌های مشترک تحقیق و توسعه، تضمین خرید برای برخی محصولات منتخب و ایجاد برنامه‌های تشویقی برای خودروسازان و قطعه‌سازان فعال در حوزهٔ بازتولید، مسیر گذار به الگوی دایره‌ای را تسهیل می‌کند. اهمیت این عامل نشان می‌دهد که توسعهٔ بازتولید تنها با اتکا به انگیزه‌های درون‌بنگاهی محقق نمی‌شود و نیازمند سازوکارهای حمایتی بیرونی و سیاست‌های مشوق‌محور است.

در مقابل، عوامل C3، C4، C7، C8 و C9 در زمرهٔ عوامل معلولی قرار می‌گیرند؛ بنابراین این متغیرها بیشتر حوزه‌های اثرپذیر و پیامدهای عملکردی نظام تفسیرپذیرند و مدیریت آنها باید در امتداد اصلاح عوامل علّی انجام شود؛ برای مثال، کاهش دشواری دمونتاژ و مونتاژ قطعات (C9)، تا حد زیادی پیامد بهبود طراحی اولیه و کاهش پیچیدگی محصول است و به همین دلیل، این مسئله علاوه بر آموزش عملیاتی یا اقدامات اجرایی مقطعی، باید از مبدأ طراحی نیز کنترل شود. به‌طور مشابه، مشکلات مرتبط با تأمین مالی و سودآوری (C3 و C4) نیز، با اصلاح مقررات، ایجاد مشوق‌ها، توسعهٔ بازار و کاهش هزینه‌های ناشی از طراحی نامناسب، قابلیت بهبود بیشتری خواهند داشت. همچنین موانعی مانند سهمیه‌بندی مواد اولیه (C7) و نگرش منفی مصرف‌کننده نسبت‌به قطعات بازتولیدشده (C8)، ازطریق مجموعه‌ای از اصلاحات ساختاری، شفاف‌سازی کیفیت، استانداردسازی، برندسازی و تضمین عملکرد محصولات بازتولیدشده کنترل می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل ساختار علّی موانع پیاده‌سازی اقتصاد دایره‌ای در صنعت قطعه‌سازی خودرو، انجام شد. با بهره‌گیری از روش دیمتل فازی فیثاغورثی، روابط متقابل میان موانع استخراج و عوامل اثرگذار و اثرپذیر تفکیک شد. نتایج نشان داد پنج مانع «پیچیدگی طراحی و ترکیب مواد»، «وابستگی به بازارهای صادراتی»، «قوانین بازدارنده»، «مشوق مالیاتی و قانونی» و «در نظر نگرفتن امکان بازتولید در طراحی»، در زمرهٔ عوامل علّی قرار دارند و دارای بیشترین قدرت اثرگذاری سیستمی‌اند.

درمجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که پیشنهادهای مدیریتی در صنعت قطعه‌سازی ایران، باید از تمرکز صرف بر پیامدها فاصله بگیرند و بر مداخله در ریشه‌های اصلی مسئله استوار شوند. بر این مبنا، نهادینه‌سازی قابلیت بازتولید در طراحی اولیهٔ قطعات، کاهش پیچیدگی ساختاری و ماده‌ای محصولات، توسعهٔ بازار، اصلاح مقررات بازدارنده و تقویت مشوق‌های حمایتی، پنج محور اولویت‌دار برای گذار مؤثر به زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای در این صنعت به شمار می‌روند. تنها در صورت تحقق این مداخلات ریشه‌ای است که انتظار می‌رود دیگر موانع عملیاتی، مالی، بازارمحور و اجرایی نیز به‌صورت پایدار کاهش یابند. با وجود دستاوردهای پژوهش، محدودیت‌هایی وجود دارد که باید در تفسیر نتایج به آنها توجه شود.

ماهیت ذهنی داده‌ها: روش دیمتل فازی فیثاغورثی، با وجود قدرت بالا در مدل‌سازی روابط علّی، مبتنی بر ارزیابی‌های ذهنی خبرگان است؛ درنتیجه، ساختار استخراج‌شده منعکس‌کننده ادراک و تجربهٔ حرفه‌ای مشارکت‌کنندگان است و به داده‌های عینی عملکردی مربوط نیست.

ایستایی مدل: تحلیل ارائه‌شده، ماهیت مقطعی دارد و پویایی زمانی موانع را لحاظ نمی‌کند؛ در حالی که گذار به اقتصاد دایره‌ای، فرآیندی تدریجی و تحول‌محور است و ممکن است روابط میان موانع در طول زمان تغییر کند.

مدل‌سازی‌نکردن کمی عملکرد عملیاتی: پژوهش حاضر ساختار علّی را شناسایی کرده است؛ اما اثر کمی هر مانع بر شاخص‌های عملکردی نظیر هزینه، زمان چرخه، بهره‌وری یا سطح خدمات اندازه‌گیری نشده است.

با توجه به محدودیت‌ها و دستاوردهای مطالعهٔ حاضر، پیشنهاد می‌شود به توسعهٔ مدل‌های ترکیبی کمی–کیفی در پژوهش‌های آتی توجه شود.

همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، روش‌های ساختاری مانند دیمتل با مدل‌های کمّی بهینه‌سازی شبکهٔ زنجیرهٔ تأمین حلقه‌بسته ترکیب شود تا اثر موانع شناسایی‌شده بر شاخص‌های عملکرد عملیاتی به‌صورت عددی سنجیده شود. به‌کارگیری روش پویایی سیستم‌ها، رفتار بلندمدت موانع و تعاملات آنها را در گذار به اقتصاد دایره‌ای مدل‌سازی و سناریوهای سیاستی مختلف را ارزیابی می‌کند. با توجه به نقش بازیگران مختلف در زنجیرهٔ تأمین (تولیدکنندگان، دولت، بازیافت‌کنندگان، مصرف‌کنندگان)، استفاده از چارچوب نظریهٔ بازی‌ها برای تحلیل رفتار استراتژیک و طراحی سازوکارهای انگیزشی پیشنهاد می‌شود. مطالعهٔ نقش فناوری‌های دیجیتال مانند بلاک‌چین، اینترنت اشیا و هوش مصنوعی در بهبود ردیابی مواد، کاهش عدم اطمینان و ارتقای شفافیت زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای، افق‌های جدیدی را در مدیریت عملیات پایدار ایجاد می‌کند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، اقتصاد دایره‌ای در چارچوب «تاب‌آوری–پایداری» بررسی و مشخص شود کدام مداخلات طراحی و سیاستی، هم‌زمان کارایی عملیاتی و پایداری زیست‌محیطی را بهبود می‌دهند. آزمون تجربی مدل‌های «محصول به‌عنوان خدمت» و «بازتولید مبتنی بر تقاضا» در صنعت خودرو، شکاف میان تحلیل ساختاری و پیاده‌سازی عملی را کاهش می‌دهد. طراحی یک چارچوب ارزیابی بلوغ برای واحدهای قطعه‌سازی، امکان پایش پیشرفت و مقایسهٔ عملکرد شرکت‌ها را فراهم خواهد کرد.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که گذار به زنجیرهٔ تأمین دایره‌ای در صنعت قطعه‌سازی خودرو، مستلزم مداخلات ساختاری در سطح طراحی محصول، سیاست‌گذاری صنعتی و مدیریت شبکهٔ تأمین است. تمرکز بر عوامل علّی شناسایی‌شده، به ایجاد آثار سیستمی مثبت و کاهش تدریجی موانع عملیاتی و فرهنگی منجر می‌شود.

پیوند این یافته‌ها با رویکردهای نوین مدیریت تولید و عملیات، زمینه‌ساز توسعهٔ چارچوب‌های تصمیم‌گیری پیشرفته در حوزهٔ عملیات پایدار خواهد بود.

References

Ahmadov, T., Durst, S., & Gerstlberger, W. (2025). Unveiling success factors for implementing and sustaining circular economy practices in small and medium-sized firms: multi-level perspective. *The Bottom Line*, *38*(1), 71–98. https://doi.org/10.1108/BL-12-2023-0320.

Alizadeh Afroozi, M., Gramifar, M., Hazratifar, B., Keshvari, M.M., & Razavian, S.B. (2025). Optimization of Lithium-Ion Battery Circular Economy in Electric Vehicles in Sustainable Supply Chain. *Battery Energy*, *4*(2). https://doi.org/10.1002/bte2.20240057.

Baldassarre, B., Maury, T., Tazi, N., Mathieux, F., & Sala, S. (2025). Increasing plastic circularity in the automotive sector: Supply chain analysis and policy options from the European Union (EU). Resources, *Conservation and Recycling*, 218, 108216. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108216.

Balakrishnan, A.S., Ramanathan, R., Ramanathan, U., & Srinivasan, R. (2025). Responsible battery disposal management practices: An investigation in the electric vehicle industry from a circular economy perspective. *Journal of Environmental Management*, *383*, 125488. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125488.

Gaur, T.S., Yadav, V., Mittal, S., & Sharma, M.K. (2024). A systematic review on sustainable E-waste management: challenges, circular economy practices, and a conceptual framework. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, *35* (4), 858–884. https://doi.org/10.1108/MEQ-05-2023-0139.

Gaur, T.S., Yadav, V., Prakash, S., Panwar, A. (2025). Integration of industry 4.0 and circular economy for sustainable E-waste management. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, *36*(5), 1304–1325. https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2024-0277.

Giri, B. C., Molla, M. U., & Biswas, P. (2022). Pythagorean fuzzy DEMATEL method for supplier selection in sustainable supply chain management. *Expert Systems with Applications*, *193*, 116396. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116396.

González-Sánchez, R., Settembre-Blundo, D., Maria Ferrari, A., & García-Muiña, F.E. (2020). Main Dimensions in the Building of the Circular Supply Chain: A Literature Review. *Sustainability*, *12*(6), 2459. HTTPS://DOI.ORG/10.3390/SU12062459.

Hosseini, S. Kh., Momeni, M., & Saryazdi, Gh. (2024). Identification and ranking of barriers to implementing the 4th generation industry based on supply chain sustainability and circular economy. *Journal of technology development management*, *12*(4), 48. https://doi.org/10.22104/jtdm.2025.7298.3380.

Iglesias-Émbil, M., Ortego, A., Valero, A., & Villalba, G. (2025). Evolution in the content of strategic metals in a passenger car and its implications for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, *495*, 145048. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145048.

Jensen, H.H. (2025). *Connected Products and Components – The Senses of the Circular Economy. In: Circular Economy Opportunities and Pathways for Manufacturers*. Future of Business and Finance. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75279-7_13.

Kiani, M., Andalib Ardakani, D., Mirfakhroddin, S.H., & Zare Ahmad Abadi, H. (2024). Analysis of the barriers to circular economy and industry 4.0 implementation: approach of meta-analysis and fuzzy DANP. *Journal of industrial management vision*, *13*(4), 9-45. https://doi.org/10.48308/JIMP.13.4.9.

Luo, A.A., Apelian, D., & Taub, A.I. (2025). Toward Material Circularity and Manufacturing Sustainability in the Automotive Industry. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, e70017. HTTPS://DOI.ORG/10.1002/AMP2.70017.

Mahboubkheirkhah, M., Karimi, R., Motamedi, M. (2025). A framework to manufacturing in car industry with attention to lean production and circular economy in the era of industry 4.0. *Journal of investment knowledge*, *59*, 407-430, https://doi.org/10.22034/jik.2025.23922.

Martin, H. (2025). Skills for a Circular Economy Transformation—A Regional Case Study From Sweden. *International Journal of Training and Development*, *29*(3), 299-308. HTTPS://DOI.ORG/10.1111/IJTD.12360.

Martins, A. V., Godina, R., Azevedo, S. G., & Carvalho, H. (2021). Towards the development of a model for circularity: The circular car as a case study. *Sustainable energy technologies and assessments*, *45*, 101215. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101215.

Mousavi, P., Yousefi Z., R. & Hassanpour, A. (2015). Identification of organizational information security risks using the fuzzy Delphi method in the banking industry. *Information Technology Management, 7*(10). HTTPS://DOI.ORG/10.22059/JITM.2015.53555.

Nagamalini, T., & Wesley, J.R. (2025). Pathway for a circular economy: facilitating circularity using the ADKAR model for waste management. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, *36*(4), 990–1012. https://doi.org/10.1108/MEQ-09-2023-0320.

Roshanbakhsh, A., Farsijani, H., & Motadel, M.R. (2025). Analyzing the Role of Supply Chain Risk Management in Achieving World-Class Status for Iran's Automotive Industry. *Research in production and operation management*, *16*(1), 40, 71-90. https://doi.org/10.22108/POM.2025.141073.1557.

Sabale, D.B., Kaswan, M.S., Rathi, R., & Yadav, V. (2025). Investigating and modeling the circular economy enablers in product development process: net zero as a moderator. *Benchmarking: An International Journal*, *32*(1), 241–260. https://doi.org/10.1108/BIJ-06-2023-0401.

Salmannejad, M., & Karimi Taklo, S. (2023). Evaluating the Barriers to Circular Supply Chain Implementation Using a Rank Prioritization Approach. Supply Chain Management, *25*(80), 89-100.

Sesana, M., Antonello, V., Calabresi, M., Fontana, A., Rossi, L., Nika, J., Landolfi, G., Sorlini, M. & Rosa, P. (2024). *Advancing Sustainability and Circularity in the Automotive Industry: A Data-Driven Platform Approach*. *In 2024 Electronics Goes Green 2024+(EGG)*, *IEEE*., 1-11. https://doi.org/10.23919/EGG62010.2024.10631254.

Suman, D., & Rajak, S. (2025). Assessing the key enablers for circular economy adoption for industrial symbiosis: evidence from an Indian automotive component manufacturing industry. *Environment, Development and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/s10668-024-05920-8.

Van Keeken, M., Dullaert, W. E. H., Inghels, D. A. M., & Wissink, P. L. J. (2024). The effects of product lifetime extension on short-and long-term supply chain circularity: A case study of the European aluminum automotive supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, *211*, 107836. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107836.

Wamane, G.V. (2025). A “new deal” for a sustainable future: enhancing circular economy by employing ESG principles and biomimicry for efficiency. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, *36*(4), 930–947. https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2022-0189.

Yager, R.R. (2013). Pythagorean fuzzy subsets. 2013 joint IFSA world congress and NAFIPS annual meeting (IFSA/NAFIPS), *Edmonton, Canada*, 57-61.

Yang, C. (2025). A novel Pythagorean fuzzy FUCA driven MCGDM algorithm for evaluating green economy oriented corporate sustainability. *scientific reports*, *16*, 1656, https://doi.org/10.1038/s41598-025-31159-y.

[1] Baldassarre et al.
[2] Sesana et al.
[3] Van Keeken et al.
[4] Martins et al.
[5] Gonzalez-Sanchez et al.
[6] Ahmadov et al.
[7] Wamane
[8] Gaur et al.
[9] Jensen
[10] Martin
[11] Balakrishnan et al.
[12] Iglesias-Émbil et al.
[13] Alizadeh Afroozi et al.
[14] Yager
[15] Trapezoidal Fuzzy Number
[16] Normalized Relation Matrix
[17] Luo et al.
[18] González-Sánchez et al.
[19] Salmannejad & Karimi Taklo
[20] Kiani et al.